



UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“Planeación óptima de la alimentación sustentable en zonas
marginadas de México”**

TESIS presentada por:

Sergio Iván Martínez Guido

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como requisito parcial
para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Asesor: **Dr. José María Ponce Ortega**

Morelia, Michoacán

Marzo del 2019

ABSTRACT

“Optimal planning of sustainable food supply in disenfranchised communities in Mexico”

By

M.C. Sergio Iván Martínez Guido

March, 2019

PhD in Chemical Engineering

Supervised by Dr. Jose Maria Ponce Ortega

Nowadays our planet faces several problems due to the excessive extraction of resources and the associated environmental damage, so to feed 9,100 million people estimated for the year 2050, it will not be an easy task, given that it would be necessary to increase food production by 70%; putting the areas of greatest marginalization at a point of greatest fragility. In this context, Chemical Engineers have developed methodological tools, in which the supply chain of industrial processes is evaluated, as well as its integration with other processes, the optimal development to ensure its operation and thus extract the greatest economic and social benefit, satisfying current environmental regulations and promoting a sustainable industrial culture. Based on the lack of sustainable planning in the food supply (especially in the areas of greatest marginalization), this project proposes the application of these methodologies (proposed by the process engineering area), with the objective of designing an optimal planning of sustainable food supply, which can be integrated into current government programs, as well as contemplating the future projection of the problem and its solution.

Keywords: Food, disenfranchised community, supply chain, optimization.

M.C. Sergio Iván Martínez Guido

RESUMEN

“Planeación óptima de la alimentación sustentable en zonas marginadas de México”

Por

M.C. Sergio Iván Martínez Guido

Marzo del 2018

Doctorado en Ingeniería Química

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega

Actualmente nuestro planeta enfrenta grandes problemas debidos a la extracción excesiva de recursos y el consecuente daño al ambiente, por lo que alimentar 9,100 millones de personas estimadas para el año 2050, no será una tarea fácil, dado que sería necesario aumentar la producción de alimento un 70%; poniendo a las zonas de mayor marginación en un punto de mayor fragilidad. En los últimos, los Ingenieros Químicos han desarrollado herramientas metodológicas, en las que se evalúa la cadena de suministro de procesos industriales, así como su integración con otros procesos, el desarrollo óptimo para asegurar su funcionamiento y con ello extraer el mayor beneficio económico y social, satisfaciendo las regulaciones ambientales actuales, promoviendo una cultura industrial sustentable. A partir de la falta de una planificación sustentable en el suministro de alimentos (especialmente en las zonas de mayor marginación), en este proyecto se propone la aplicación de dichas metodologías (propuestas por el área de ingeniería de procesos), con el objetivo de diseñar una planificación óptima del suministro sustentable de alimentos, que pueda ser integrado a programas gubernamentales actuales, además de contemplar la proyección a futuro del problema y su solución.

Palabras clave: Alimento, zona marginada, cadena de suministro, optimización.

M.C. Sergio Iván Martínez Guido

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme guiarme a este punto percibido en algún punto tan lejano, un logro más cosechado con dicha y salud.

A mi madre Maclovia Guido Ponce

Mi fiel guerra invencible, por haberme dado la vida, amor y apoyo incondicional de madre, y ser mi profesora en la materia de la vida; que gracias a sus esfuerzos y sacrificios y amor incondicional hoy en día soy el hombre en el que me he convertido educado por una reina, un logro tan importante compartiéndolo contigo.

A mi hermana Miriam Gretel Martínez Guido

Mi amiga, mi confidente, mi guía, mi hermana, otra más de mis guerreras gracias por hacer de esta etapa un momento más grato lleno de alegría, aprendiendo juntos, y apoyando para nunca rendirme y seguir siempre adelante.

A mi papá German Martínez García

Hoy puedo contestar a esa pregunta que algún día me hicieron ¿Eso le enseñó su papá de ser un hombre? Con la cabeza en alto lleno de orgullo y decir SI, me enseñó a superarme día tras día y a levantarme cuando me caigo y enmendar mis errores, gracias papá espero hacerte sentir orgulloso siempre.

A mi querido Valens Andrade Romero

Sin querer han pasado ya 4 años juntos, en los que hemos aprendido a labrar nuestro camino, gracias por todas las experiencias, amor y aprendizaje compartido.

A mis amigos inseparables Mariana, Olimpia, Claudia, Ceci, Guillermo, Paco y José

Algunos de ustedes aun en la distancia, me han enseñado a creer en mí siempre, a sacar lo mejor de mí como persona, los amigos son familia que afortunadamente he elegido de la mejor manera, les agradezco por cada uno de los detalles con los que han hecho de este camino la carga ligera,

Los adoro!

ÍNDICE

ABSTRACT	II
RESUMEN	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA	X
ÍNDICES	X
VARIABLES	X
PARÁMETROS	XIII
CAPÍTULO 1	XV
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 MARCO TEÓRICO.....	2
1.2.1 EL PLATO DEL BIEN COMER	2
1.2.2 CARACTERÍSTICAS DEL PLATO DEL BIEN COMER	3
1.2.3 ÍNDICE DE POBREZA.....	4
1.2.3.1 ÍNDICE DE DESARROLLO HUMANO.....	6
1.3 ANTECEDENTES	9
1.4 HIPÓTESIS	11
1.5 OBJETIVOS	11
1.5.1. GENERAL.....	11
1.5.2. PARTICULARES:.....	11
1.6 METODOLOGÍA	12
CAPÍTULO 2	14
2.1. PANORAMA GENERAL.....	15
2.2 PROBLEMÁTICA A RESOLVER	18

2.3 ESTRATEGIA USADA PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA	19
2.3.1 DISEÑO DE LA SUPERESTRUCTURA	19
2.4 MODELO MATEMÁTICO.....	23
2.4.1 PRODUCTOS VEGETALES.....	23
2.4.2 BALANCE DE ÁREA DE CULTIVO	23
2.4.3 PRODUCTOS DE ORIGEN ANIMAL.....	24
2.4.4 PRODUCCIÓN DE CARNE, HUEVOS Y LECHE	25
2.4.5 DISTRIBUCIÓN DE LOS PRODUCTOS.....	26
2.4.6 DEMANDA DE NUTRIENTES	28
2.4.7 COSTOS.....	29
2.4.8 PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS ANIMALES.....	30
2.4.9 COSTO DE TRANSPORTE	31
2.4.10 COSTO POR ALMACENAMIENTO	32
2.4.11 COSTO GENERADO POR LA COMPRA DE ALIMENTO	33
2.4.12 VENTAS.....	33
2.4.13 COSTO TOTAL ANUAL (TAC)	34
2.4.14 FUNCIÓN OBJETIVO	34
2.5 RECOLECCIÓN DE DATOS.....	34
2.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	38
2.6.1 ESCENARIOS B, C Y D.....	41
2.7 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 2.....	47
CAPÍTULO 3	48
3. CASO DE ESTUDIO 2. OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS: UNA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE LA DESNUTRICIÓN A TRAVÉS DE MÚLTIPLES TOMADORES DE DECISIONES	49

3.1 PANORAMA GENERAL.....	49
3.2 PROBLEMA A RESOLVER	50
3.3 ESTRATEGIA USADA PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA.....	52
3.3.1 DECISIONES EN EL MTD	54
3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	56
3.4.1 PRODUCTOS DE ALMACENAMIENTO.....	59
3.4.2 VENTAS.....	60
3.4.3 INTERCAMBIO DE PRODUCTIVOS	64
3.5 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO 3.....	65
CAPÍTULO 4 LOGROS ALCANZADOS.....	67
CAPÍTULO 5	75
5. REFERENCIAS.....	76
AGRADECIMIENTOS	81

ÍNDICE DE TABLAS	Página
Tabla 1.1 Características de una dieta correcta.....	2
Tabla 2.1. Municipios en Michoacán con un IP alto.....	20
Tabla 2.2. Municipios en Michoacán con un IDH bajo.....	21
Tabla 2.3. Distribución de área en cada municipio seleccionado.....	24
Tabla 2.4. Etapas de vida.....	29
Tabla 2.5. Distribución de la población en los municipios seleccionados (%).....	36
Tabla 2.6. Necesidades nutricionales (Toneladas/persona*año).....	37
Tabla 2.7. Demanda de nutrientes, y aportación generada por la producción escenario A (toneladas/año).....	40
Tabla 2.8. Costo por el suministro de productos de origen vegetal (USD\$/año).....	42
Tabla 2.9. Demanda satisfecha de nutrientes en los escenarios B, C y D (toneladas/año).....	43
Tabla 3.1. Índice de Desarrollo Humano (HDI).....	55
Tabla 3.2. Intervalos de priorización.....	55
Tabla 3.3. Grupos de prioridad considerados.....	57
Tabla 3.4. Costos por almacén.....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1.1. Plato del Bien Comer	3
Figura 1.2. Diagrama de índice de pobreza.....	5
Figura 1.3. Metodología propuesta.....	12
Figura 2.1. Distribución de desnutrición en regiones marginadas.....	15
Figura 2.2. Alimentación sustentable para las zonas marginadas de México.....	18
Figura 2.3. Integración del plato del buen comer a las zonas marginadas del país.....	19
Figura 2.4. Superestructura alimentación sustentable para las zonas marginadas de Michoacán.....	22
Figura 2.5. Plato del buen comer (mi pirámide).....	28
Figura 2.5. Distribución de los productos.....	31
Figura 2.7. Efecto en los costos, según el suministro de productos de origen animal.....	38
Figura 2.8. Distribución de productos vegetales.....	41
Figura 2.9. Cantidad de productos de origen animal suministrada.....	41
Figura 2.10. Costos de producción de alimentos vegetales y animal.....	44
Figura 2.11. Diagrama de flujo para Escenarios A y B.....	45
Figura 2.12. Diagrama de flujo para Escenarios C y D.....	46
Figura 3.1. Descripción grafica del problema asociado.....	51
Figura 3.2. Superestructura propuesta.....	53
Figura 3.3. Diagrama de distribución.....	56
Figura 3.4. Soluciones Pareto.....	58
Figura 3.5. Costos de producción vegetal.....	59
Figura 3.6. Ventas en los sitios de cultivo (toneladas/año).....	62
Figure 3.7. Ventas en los almacenes.....	63
Figura 3.8. Diagrama de flujo para el municipio de Tacámbaro (12).....	65

NOMENCLATURA

Índices

- m1 Sitios de cultivo (municipio seleccionado) (1-14)
- m2 Sitios de almacén en cada municipio (1-14)
- m3 Población seleccionada (1-14)
- Np Etapas de edad consideradas, [2-3, 4-8, 9-13 (chicos y chicas), 14-18 (chicos y chicas)], 19-30 (Mujeres y hombres), 31-50 (Mujeres y hombres), más de 51 (Mujeres y hombres).
- Nut Tipo de nutriente (1-5).
- Pa Tipo de producto animal (1= Carne, 2= Leche, 3= Huevo)
- R Tipo de producto vegetal (1= Frijoles, 2= Maíz, 3= Tomate verde, 4= Tomate rojo 5= Sorgo, 6= Avena, 7= Chile, 8= Aguacate, 9= Calabaza, 10= Mango, 11= Cebolla, 12= Trigo y 13= Caña de azúcar)
- Ra Tipo de animal (1=Pollo, 2= Vaca, 3= Cerdos)
- T Tiempo en semanas (Periodos 1-52)

Variables

- $A_{r,m1,t}^{used}$ Área usada para agricultura (km²)
- $A_{r,m1,t}^{new}$ Área nueva designada para los cultivos (km²)
- $A_{ra,m1,t}^{used-animal-food}$ Área usada para alimentar animales (km²)
- $Af_{ra,m1,t}^{usedfood}$ Toneladas de alimento animal usado (toneladas)
- $Af_{ra,m1,t}^{cultivatedfood}$ Toneladas de comida animal cultivada (toneladas)
- $Af_{ra,m1,t}^{purchasedfood}$ Toneladas comida animal comprada (toneladas)
- $AF_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal}$ Cantidad de comida animal cultivada (toneladas)
- $AF_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal}$ Cantidad de comida animal comprada (toneladas)
- $C_{ra,m1,t}^{animal-purchase}$ Costos generados por la compra de animales (USD\$)

$C_{r,m1,t}^{vegetable-production}$	Total production cost of the vegetal raw material (USD\$)
$C_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal}$	Costo por la compra de animales (USD\$)
$C_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal}$	Costo por la producción de comida animal (USD\$)
$C_{pa,m1,t}^{animal-production}$	Costo por los residuos de comida animal (USD\$)
$C_{pa,t}^{trans-ap-prod-hub}$	Costo por el transporte de productos animales al almacén (USD\$)
$C_{pa,t}^{trans-ap-prod-hubmarket}$	Costo por el transporte de productos animales del almacén a los mercados (USD\$)
$C_{pa,t}^{trans-ap-prod-market}$	Costo por el transporte de productos animales de los sitios de cultivo a los mercados (USD\$)
$C_{r,t}^{Trans-vegetabletohub}$	Costo por el transporte de productos vegetales al almacén (USD\$)
$C_{r,t}^{Trans-vegetable-product-market}$	Costo por el transporte de productos vegetales del almacén a los mercados (USD\$)
$C_{pa,m2,t}^{storage-ap}$	Costo por el almacén de productos animales (USD\$)
$C_{r,m2,t}^{storage-vegetable}$	Costo por el almacén de productos vegetales (USD\$)
$C_{pa,m2,t}^{ap-sales}$	Ganancias por la venta de productos animales (USD\$)
$C_{r,m2,t}^{vegetable-sales}$	Ganancias por la venta de productos vegetales (USD\$)
$D_{nut,m3,t}$	Demanda de nutrientes (toneladas por cada grupo)
$F_{pa,m1,t}^{animal-production}$	Flujo de comida animal producida (toneladas)
$F_{pa,m3,t}^{animalproduct-markets}$	Flujo de producto animal enviado a los mercados (toneladas)
$F_{pa,m1,m2,t}^{animal-product-hub}$	Flujo de producto animal enviado a los almacenes (toneladas)
$F_{pa,m2,m3,t}^{animal-hub-market}$	Flujo de producto animal enviado a los mercados de los almacenes (toneladas)

$F_{pa,m1,m3,t}^{animal-product-market}$	Flujo de producto animal enviado a los mercados (toneladas)
$F_{pa,m2,t}^{animalproduct-hub-sale}$	Flujo de producto animal vendido en los almacenes (toneladas)
$F_{pa,m3,t}^{animalproduct-purchase}$	Flujo de producto animal comprado (toneladas)
$F_{r,m1,t}^{vegetable}$	Flujo de producto animal producido (toneladas)
$F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub}$	Flujo de producto vegetal enviado a los almacenes (toneladas)
$F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-market}$	Flujo de producto vegetal distribuido directamente del sitio de cultivo (toneladas)
$F_{r,m3,t}^{vegetable-purchase}$	Flujo de producto vegetal comprado (toneladas)
$F_{r,m2,m3,t}^{vegetable-hub-market}$	Flujo de producto vegetal enviado de almacenes a mercados (toneladas)
$F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-product-market}$	Flujo de producto vegetal enviado de sitios de cultivo a mercados (toneladas)
$F_{r,m2,t}^{vegetable-hub-sale}$	Flujo de producto vegetal vendido en mercados (toneladas)
$NA_{ra,m1,t}$	Número de animales producido en cada sitio
$Na_{ra,m1,t}^{purchased}$	Número de animales comprado en cada sitio
$Na_{ra,m1,t}^{sale}$	Número de animales vendido en cada sitio
$RM_{r,m1,t}^{vegetal}$	Toneladas de vegetales producidas
$S_{pa,m2,t}^{animalproduct-stored}$	Producto animal almacenado (toneladas)
$S_{pa,m2,t-1}^{animalproduct-stored}$	Producto animal almacenado en un periodo anterior (toneladas)
$S_{r,m2,t}^{vegetable-stored}$	Producto vegetal almacenado (toneladas)
$S_{r,m2,t-1}^{vegetable-stored}$	Producto vegetal almacenado en un periodo anterior (toneladas)
TAC	Costo total anual (USD\$)

Parámetros

$A_{ra,m1,t}^{usedanimalfood}$	Área usada para el alimento animal (km ²)
$A_{r,m1,t}^{Current}$	Área actual designada para cada cultivo (km ²)
$A_{r,m1,t}^{Total-Vegetable}$	Restricción de área para cada municipio (km ²)
$A_{ra,m1,t}^{Total-animal-food}$	Área disponible para el alimento animal (km ²)
GE_{nut}	Grupo de nutrientes (tipo)
$Population_{m3,t}$	Habitantes de cada municipio (número)
$\beta_{r,m1,t}^{harvesting\ sites}$	Rendimiento de cada cultivo (toneladas/km)
$\theta_{ra,m1,t}^{YieldPA}$	Rendimiento de animales (animales/tonelada de comida)
$\xi_{nut,pa}^{nut-ap}$	Cantidad de nutrientes de origen animal demandados (toneladas)
$\xi_{nut,r}^{nut-vegetable}$	Cantidad de nutrientes de origen vegetal demandados (toneladas)
$\phi_{ra,r,m1,t}^{residePA}$	Rendimiento de residuos a partir de los cultivos (toneladas/toneladas)
$\lambda_{pa,ra,m1,t}$	Rendimiento de productos de origen animal (toneladas/número de animales)
$\sigma_{ra,m1,t}^{animal-purchased}$	Precio unitario por la compra de animales (USD\$/animal)
$\sigma_{pa,m1,t}^{animal-production}$	Precio por la producción de animales (USD\$/animal)
$\sigma_{r,m1,t}^{vegetable-production}$	Costo unitario por la producción de vegetales (USD\$/toneladas)
$\sigma_{pa,m1,m2,t}^{Trans-ap-prod-hub}$	Costo por el transporte de productos animales de los sitios de cultivo a los almacenes (USD\$/toneladas)
$\sigma_{pa,m2,m3,t}^{Trans-ap-prod-hubmarket}$	Costo por el transporte de productos animales de almacenes a los mercados (USD\$/toneladas)

$\sigma_{pa,m1,m3,t}^{Trans-ap-prod-market}$ Costo por el transporte de productos animales de los sitios de cultivo a los mercados (USD\$/toneladas)

$\sigma_{r,m1,m2,t}^{transp-veg-hub}$ Costo por el transporte de productos vegetales de los sitios de cultivo a los almacenes (USD\$/toneladas)

$\sigma_{r,m1,m3,t}^{transp-veg-product-market}$ Costo por el transporte de productos animales de los sitios de cultivo a los mercados (USD\$/toneladas)

$\sigma_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal}$ Costo de la comida animal (USD\$/tonelada)

$\sigma_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal}$ Costo por la compra de comida animal (USD\$/tonelada)

$\sigma_{pa,m2,t}^{ap-stored}$ Precio de almacén a productos de origen animal (USD\$/tonelada)

$\sigma_{r,m2,t}^{vegetable-stored}$ Precio de almacén a productos de origen vegetal (USD\$/tonelada)

$\sigma_{pa,m2,t}^{ap-sale}$ Precio unitario de productos animales (USD\$/tonelada)

$\sigma_{r,m2,t}^{vegetable-sale}$ Precio unitario de productos vegetales (USD\$/tonelada)

Capítulo 1

1.1 INTRODUCCIÓN

La ingeniería química ha sido la responsable de la investigación, desarrollo, aplicación y generación de procesos, que han traído beneficio a la humanidad a lo largo de la historia. En los últimos años, la línea de investigación de ingeniería de procesos se ha enfocado en el desarrollo de herramientas de optimización y análisis de cadena de suministro para el sector energético (Qin *et al.*, 2009; Rastegar *et al.*, 2011), con lo que se han logrado aportaciones al desarrollo de este sector integrando nuevos procesos a los existentes; por ejemplo, el incluir biorefinerías a partir de los desechos de otros procesos (Santibañez-Aguilar *et al.*, 2011; Zondervan *et al.*, 2011).

En todas estas aportaciones se ha realizado una evaluación económica, incluyendo la incertidumbre de mercados y precios (Wafa *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2012; Santibañez-Aguilar *et al.*, 2012), evaluaciones ambientales (Grossmann *et al.*, 2004; Santibañez-Aguilar *et al.*, 2014), evaluando con ello el daño en diferentes categorías (salud humana, recursos naturales, calidad del ecosistema, etc.). Algunas otras aportaciones involucradas en la ingeniería de procesos se han enfocado en la optimización de las cadenas de suministro evaluando aspectos ambientales, económicos y sociales (Martínez-Guido *et al.*, 2014; 2015).

Cabe destacar que incluso cuando se incluyen aspectos sociales en los trabajos mencionados anteriormente, todas estas contribuciones se han dirigido al sector industrial. Hoy en día, el mundo entero enfrenta una de las mayores problemáticas, las cuales deben abordar la siguiente pregunta: *¿Cómo satisfacer el suministro de alimento?*. Problema que se ve agravado por el constante crecimiento poblacional, el desgaste de tierras, la disminución en la disponibilidad del agua así como la falta de un lineamiento optimizado a esta cadena de producción.

Ante dicho problema, el uso de todas las herramientas generadas por la ingeniería de procesos aplicadas al desarrollo de un plan de trabajo óptimo para la cadena de suministro alimentaria, pueden tener un beneficio global, aminorando principalmente los problemas de desnutrición en zonas marginadas.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 El Plato del Bien comer

El Plato del Bien Comer forma parte de la Norma Oficial Mexicana para la promoción y educación para la salud en materia alimentaria, la cual da los criterios para la orientación alimentaria (NOM-043-SSA2-2005). El objetivo fundamental de esta norma es establecer los criterios generales para la orientación alimentaria dirigida a brindar a la población, opciones prácticas con respaldo científico para la integración de una alimentación correcta que pueda adecuarse a sus necesidades y posibilidades. Así como promover el mejoramiento del estado de nutrición de la población y a prevenir problemas de salud relacionados con la alimentación. La **Tabla 1.1** muestra con claridad las características de una dieta correcta bajo criterios de la Norma.

Tabla 1.1 Características de una dieta correcta

Completa:	Que contenga todos los nutrimentos. Se recomienda incluir en cada comida alimentos de los tres grupos.
Equilibrada:	Que los nutrimentos guarden las proporciones apropiadas entre sí.
Inocua:	Que su consumo habitual no implique riesgos para la salud porque está exenta de microorganismos patógenos, toxinas y contaminantes y se consuma con moderación.
Suficiente:	Que cubra las necesidades de todos los nutrimentos.
Variada:	Que incluya diferentes alimentos de cada grupo en las comidas, ajustada a sus recursos económicos, sin que ello signifique que se deban sacrificar sus otras características.

El Plato del Bien Comer (Véase **Figura 1.1**), es una guía de alimentación para México, es un gráfico donde se representan y resumen los criterios generales que unifican y dan congruencia a la Orientación Alimentaria, dirigida a brindar a la población opciones prácticas, con respaldo científico, para la integración de una alimentación correcta que pueda adecuarse a sus necesidades y posibilidades.



Figura 1.1. Plato del Bien Comer

1.2.2 Características del Plato del Bien Comer

- En el diseño de **El Plato** se puso particular énfasis en evitar transmitir la idea de importancia o predominio de alguno de los grupos. Se llegó así a la elección de un círculo, que luego se convirtió en plato para alejarse del frío concepto técnico de una gráfica circular y hacerlo un símbolo claramente alimentario.
- El concepto geométrico de un círculo es que no tiene principio ni fin, dando a entender que todos los grupos son igualmente importantes.
- Este plato está dividido en tercios con un área equivalente para cada rebanada.
- Dos de los tres grupos de alimentos están a su vez subdivididos en dos sectores: en el caso del grupo de verduras y frutas las rebanadas son del mismo tamaño; sin embargo, en el grupo de las leguminosas y alimentos de origen animal dos terceras partes del área se destinan a las leguminosas y el resto a los alimentos de origen animal, sugiriendo la proporción de ellos que se recomienda consumir.
- Es interesante notar que en el plato mexicano la papa está localizada en el grupo de los cereales, ya que es un alimento feculento con un elevado contenido de almidón.
- Con la palabra “combina” colocada entre el grupo de cereales y leguminosas, se pretende promover la combinación de cereales y leguminosas, con la finalidad de obtener una proteína de mejor calidad.
- En el Plato se decidió no incluir las grasas y los azúcares. La razón de esto fue que estos productos son ingredientes y no alimentos primarios; y el incluirlos en el esquema como un grupo aparte indicaría la recomendación de su consumo obligado, situación por demás indeseable.

- En cuanto a los colores utilizados: se recurre a colores que en general pueden relacionarse con los alimentos incluidos en los distintos grupos: amarillo para los cereales, verde para verduras y frutas y un color rojizo para leguminosas y alimentos de origen animal.
- En el Plato se evitó dar recomendaciones cuantitativas, esto fue porque las necesidades nutrimentales difieren en forma muy notable con la edad, el tamaño corporal, el sexo, la actividad física y el estado fisiológico (crecimiento, embarazo, lactancia). Por lo que, según el grupo que realizó este esquema, de señalarse cantidades se podría fomentar el consumo excesivo en algunos individuos y el consumo deficiente en otros, promoviendo, de esta manera, obesidad o desnutrición.
- En el diseño gráfico del Plato, se tuvo especial cuidado en evitar que los dibujos de alimentos discordaran en su tamaño real y de las cantidades razonables de consumo; un ejemplo de esto es que en la ilustración se incluyó sólo un huevo o una pieza de pollo.

1.2.3 Índice de Pobreza

En el 2004, en la ciudad de México fue promulgada la Ley General de Desarrollo Social (LGDS), con el objeto de asegurar el acceso a toda la población del pueblo Mexicano al desarrollo social, (tanto en derechos individuales como colectivos), a partir de esta promulgación se generó el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), organismo público encargado de normar y coordinar la evaluación de programas de desarrollo social, así como la ponderación de pobreza en el país. Teniendo que para la ponderación de este factor (pobreza) por ley deben de ser considerados al menos los siguientes 8 indicadores (CONEVAL, 2006):

- a) Ingreso corriente per cápita
- b) Rezago educativo promedio en el hogar
- c) Acceso a los servicios de salud
- d) Acceso a la seguridad social
- e) Calidad y espacios de la vivienda
- f) Acceso a los servicios básicos en la vivienda
- g) Acceso a la alimentación
- h) Grado de cohesión social

A partir de estos parámetros, el CONEVAL define a una persona con pobreza como: *“Una persona se encuentra en situación de pobreza multidimensional cuando no tiene garantizado el ejercicio de al menos de uno de sus derechos para el desarrollo social, y si sus ingresos son insuficientes para adquirir los bienes y servicios que requiere para satisfacer sus necesidades”¹*.

A partir de este concepto se propone un método de clasificación mostrado en la **Figura 1.2**, los datos usados en la calificación son los proporcionados por las bases de datos de INEGI reportados; con respecto al diagrama de clasificación mostrados el eje vertical representa el espacio del bienestar económico, el cual se mide por medio del ingreso de las personas, mientras que la línea de bienestar permite diferenciar si las personas tienen un ingreso suficiente o no. En el eje horizontal se representa el espacio de los derechos sociales, mediante el índice de privación social. En el gráfico la población que se encuentra más cercana al eje horizontal presenta más carencias, así mismo se considera más carente a la población que presenta la falta de una o más carencias sociales.

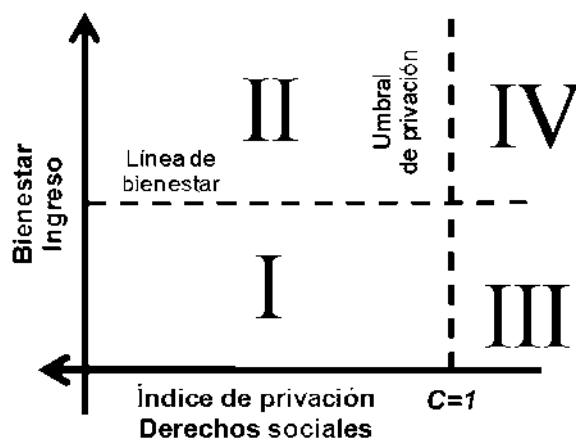


Figura 1.2. Diagrama de índice de pobreza

De acuerdo a la **Figura 1.2**, las personas pueden clasificarse en sólo un cuadrante, esto posteriormente evaluado el ingreso e índice de privación social, como se describe a continuación:

¹ CONEVAL, 2006

- I. Pobres multidimensionales. Población con ingreso inferior al valor de línea de bienestar y que padecen al menos una carencia social.
- II. Vulnerables por carencias sociales. Población que presenta una o más carencias sociales, pero cuyo ingreso es superior a la línea de bienestar.
- III. Vulnerables por ingresos. Población que no presenta carencias sociales y cuyo ingreso es inferior o igual a la línea de bienestar.
- IV. No pobre multidimensional ni vulnerable. Población cuyo ingreso es superior a la línea de bienestar y que no tiene carencia social alguna.

1.2.3.1 Índice de Desarrollo Humano

El primer Informe Mundial sobre Desarrollo Humano fue realizado 1990, con el objeto de describir y entender el progreso social, ponderando además indicadores como el progreso económico, enfocado a promover una vida larga, saludable, creativa y digna. Es así que el Índice de Desarrollo Humano (IDH) permitió monitorear el progreso de las naciones con un instrumento que conjuga la longevidad de las personas, su educación y el nivel de ingreso necesario para una vida digna.

En el año 2010, en el veinte aniversario de su aparición, el IDH se presentó en el Informe sobre Desarrollo Humano a nivel mundial como una medida reestructurada, que incrementa su capacidad de evaluación y su precisión para capturar algunas características de libertad humana. Ante ello, la Oficina de Investigación sobre Desarrollo Humano del PNUD-México realizó, en 2011, el análisis que permitiera la adopción de esta medida para el ámbito mexicano (PUND, 2014). El IDH sintetiza el avance promedio de tres aspectos básicos para el desarrollo humano, ponderando en un rango (0-1), donde los valores más cercanos a 1 significan un IDH más alto. Dentro de esta evaluación se ponderación los siguientes factores:

- A) Factor Salud; definido como una vida larga y saludable, medido por la esperanza de vida al nacer.
- B) Factor de Educación; evaluado mediante el alfabetismo y la tasa de matriculación.
- C) Factor Ingreso; ponderado en base al acceso a una vida digna calculando por medio del Producto Interno Bruto per cápita en poder de compra.

Todos estos factores son descritos con claridad a continuación.

A) Factor Salud: Para medir el progreso referente a la posibilidad de tener una vida larga y saludable, se utiliza la tasa de mortalidad infantil municipal de 2010 que reporta el Consejo Nacional de Población (CONAPO), como aproximación de la esperanza de vida al nacer. Estas variables están altamente correlacionadas y reflejan la capacidad de las instituciones médicas para enfrentar problemas de salud que son evitables y tratables. Para expresar la tasa de mortalidad infantil en términos de supervivencia infantil, es necesario hacerlo de la siguiente forma:

$$SI_m = 1 - \frac{tmi_m}{1000} \quad \text{Ecuación 1}$$

A partir de este dato, se genera el Índice de Salud (IS), mediante el procedimiento que se describe a continuación. Como primer paso, es necesario obtener los valores máximos y mínimos de comparación para la construcción del índice, de la siguiente manera.

El valor máximo del Índice de Salud (IS) se estima a partir de la tasa de mortalidad infantil más baja observada para 2010 en las estadísticas de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Ésta es de dos muertes por cada 1000 nacidos vivos:

$$\max = 1 - \frac{2}{1000} \quad \text{Ecuación 2}$$

Al despejar *min* de la siguiente expresión, se obtiene el valor mínimo de referencia de la supervivencia infantil:

$$IS_{nac} = \frac{SI_{nac} - \min}{\max - \min} \Rightarrow \min = \frac{SI_{nac} - (IS_{nac} * \max)}{1 - IS_{nac}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

SI_{nac} Se refiere al índice de Salud nacional obtenido a partir de la esperanza de vida.

IS_{nac} Es el valor correspondiente a la tasa de supervivencia infantil a nivel nacional.

Ésta se obtiene del promedio, ponderado por población, de la supervivencia infantil de todos los municipios del país. Ambos valores se refieren al año 2010.

B) Factor Educación

El Índice de Educación mide el progreso relativo de un municipio en materia de años promedio de escolaridad para personas mayores de 24 años, y años esperados de escolaridad para personas de entre 6 y 24 años. Ambos indicadores se obtienen del Censo de Población y Vivienda 2010, del INEGI (años promedio de escolaridad y años esperados de escolarización). Los años promedio de escolaridad se calculan como la media de los años acumulados de educación de todas las personas mayores de 24 años a nivel municipal.

$$Años\ promedio_m = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I Años\ promedio_{i,m} \quad \text{Ecuación 4}$$

Los años esperados de escolarización se calculan a partir de las tasas de matriculación de cada edad para cada municipio.

$$Tasa\ de\ matriculación_{i,m} = \frac{personas\ inscritas_{i,m}}{personas_{i,m}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Con esta información, los años esperados se calculan de la siguiente forma:

$$Años\ promedio_m = \sum_{e=6}^{24} Tasa\ matriculación_{e,m} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

m Es el municipio

I Es el total de personas i en el municipio m

e Es la edad, con $e \in [6, 24]$

El Índice de Educación (IE) se obtiene al emplear la media geométrica de ambos índices componentes en conjunto con los umbrales máximos y mínimos mencionados anteriormente:

$$IE_m = \sqrt{\frac{I\ años\ prom\ esc_m * I\ años\ esp\ esc_m - \min}{\max - \min}} \quad \text{Ecuación 7}$$

C) Factor Ingreso

En el IDH, el ingreso representa los aspectos del desarrollo humano que no se reflejan en una vida larga y saludable ni en los conocimientos adquiridos. El ingreso se considera un medio para elegir entre formas de vida valiosas. El Índice de Ingreso (II) utiliza el Ingreso Nacional Bruto (INB) como indicador de los recursos disponibles. Para el cálculo, se propone una estimación del ingreso corriente del que disponen las familias a nivel municipal, que se ajusta al INB proveniente del Sistema de Cuentas Nacionales del INEGI. Éste se expresa anualmente y en dólares PPC (Paridad de Poder de Compra) obtenido de los indicadores del desarrollo mundial del Banco Mundial. Finalmente, se contempla el ingreso ajustado expresado en dólares, con la finalidad de generar el II, utilizando la siguiente fórmula:

$$I_m = \frac{\ln(\text{ingreso}_m) - \ln(\text{min})}{\ln(\text{max}) - \ln(\text{min})} \quad \text{Ecuación 8}$$

El ingreso se expresa a precios de 2010, por lo que las cifras en moneda internacional representan dólares estadounidenses del mismo año.

1.3 ANTECEDENTES

En los últimos años, los temas la calidad y abasto del agua y alimentos han tomado la cima en la agenda global, seguido del incremento de precios de energía y productos alimenticios, que debido a la creciente demanda de estos últimos (dado al aumento de la población), es necesario agregar a la producción el compromiso sustentable (Lele *et al.*, 2013). Por lo que han surgido una serie de metodologías asociadas al diseño sustentable con objetivos a proveer no sólo la satisfacer la demanda si no a prolongar el tiempo de abastecimiento. Los objetivos del diseño sustentable de productos y servicios se basan en que este sea exitoso y cubra los factores involucrados (satisfacción de la demanda y necesidades del cliente, balance económico positivo, así como la disminución del impacto ambiental) (Vallet *et al.*, 2014). Hoy en día el análisis de ciclo de vida (LCA) es muy usado para la evaluación y comparación de productos agrícolas convencionales y orgánicos, reportando una variación de eficiencia de los recursos y productos de ambos sistemas, tomando partido por los productos orgánicos (Grossmann *et al.*, 2003;

Dunnet *et al.*, 2007; Mansoornejad *et al.*, 2009; Amini *et al.*, 2011; Cucek *et al.*, 2012), los cuales muestran una disminución del impacto ambiental (Meier *et al.*, 2015).

Bala *et al.* (2014) realizaron una evaluación para el aseguramiento del abastecimiento del arroz en Malasia, mediante un modelado dinámico, en el que se integraron dos principales objetivos; por un lado el mantener un nivel suficiente de arroz para consumo (contemplando las ventas a otras regiones) así como la investigación y desarrollo de nuevas técnicas de cultivo (bio-fertilizantes con menos insumos), destacando como principales resultados que el problema se centraba en el uso de fertilizantes convencionales ya que estos degastaban los suelos y con ello disminuye el rendimiento de los campos, aunado al alto valor de venta del arroz dado a tantos insumos agregados por su gobierno, proponiendo ensayos con nuevos fertilizantes orgánicos. Por su parte, Soysal *et al.* (2014) desarrollaron un modelo lineal multi-objetivo (minimizar el costo total de la producción y minimizar la cantidad de emisiones de efecto invernadero dadas por el transporte) para un problema de logística en la cadena de suministro de producción de carne en Brasil, deduciendo que el principal problema que afecta de manera multi-objetiva es la baja eficiencia en los vehículos de transporte, por lo que la integración de nuevas infraestructuras en las rutas de transporte generarían incentivos verdes para el proceso.

Se han realizado estudios de campo también con el objetivo identificar ¿Cuáles son los alimentos con alto grado nutricional?, ¿Qué fuentes de información son necesarias para identificar la inseguridad de alimentos y nutrición?, ¿Qué tipo de sistemas de monitoreo y reformas deben de ser implementados para hacer frente a dichos problemas?, con el objetivos de reducir la falta de abastecimiento de alimento y con ello evitar la desnutrición en zonas marginadas (Caso de estudio Republica Kyrgyz, Asia), destacando la necesidad de incrementar el consumo de calorías, implementar indicadores en niños los cuales se basen en peso por edad, y poner mayor atención en grupos pequeños siendo estas las más vulnerables (Babu y Reidhead, 2000).

Si bien es cierto que se necesitan reformas (a las políticas gubernamentales) enfocadas a combatir la desnutrición y abasto de alimento, y la reducción de costos que esto genera, sobresale un factor imperante a evaluar hoy en día, y ese es la sustentabilidad a la que se producen los alimentos, problema a resolver no sólo para los industriales como lo menciona Li *et al.* (2014), ya que aunque las industrias alimenticias se hayan vuelto más eficientes en muchos aspectos, estas

siguen consumiendo grandes cantidades de recursos naturales para satisfacer las demandas. Por ello, el suministro sustentable de alimento se ha convertido en un desafío mundial.

Según Brown (2012), 205 millones (en India y China) tienen una dieta a base de granos, que consumen altas cantidades de energía por el bombeo de agua, sin embargo el 24% de las familias tienen un pobre abastecimiento de comida; lo que indica una falta de distribución equitativa del alimento, o en dado caso la falta de poder adquisitivo dado al estatus social.

Por lo tanto, es necesario realizar un estudio que involucre todas las variables mencionadas en cada uno de los estudios anteriores, modelar las variables y proyectarlas a futuro dado que la población mundial tiende a crecer y con ello la demanda y falta de un abastecimiento satisfactorio, afectando principalmente a las zonas con mayor marginación.

1.4 HIPÓTESIS

La aplicación de técnicas de optimización de distribución asociadas a la industria energética, en programas gubernamentales enfocados a la alimentación de zonas marginadas del país, puede tener efecto benéfico en el impacto social y sustentable, generando la posible reducción del impacto ambiental y de los problemas de salud por ende de dichas regiones.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1. General

Proponer una estrategia para la actual cadena de suministro gubernamental dirigida a la alimentación sostenible en regiones marginadas del país.

1.5.2. Particulares:

- Construir una superestructura en la cual se contemplen aspectos como localización geográfica de la zona.
- Proponer un modelo matemático de optimización, el cual será posteriormente aplicado a diversos escenarios propuestos, los cuales contemplen necesidades energéticas, zona geográfica así como capacidades autosustentables de la región en cuestión.
- Evaluación del impacto económico en los diferentes escenarios para determinar que es mejor, producir alimentos en la región o exportar productos, dando respuesta a ¿Qué opción es más económicamente factible, producir alimentos en la región o exportar productos?
- Evaluación del impacto ambiental y económico así como los efectos sociales en los diferentes escenarios.

1.6 METODOLOGÍA

La estrategia metodológica propuesta se engloba en el siguiente diagrama (**Figura 1.3**) y descrita con detalle en los puntos siguientes:

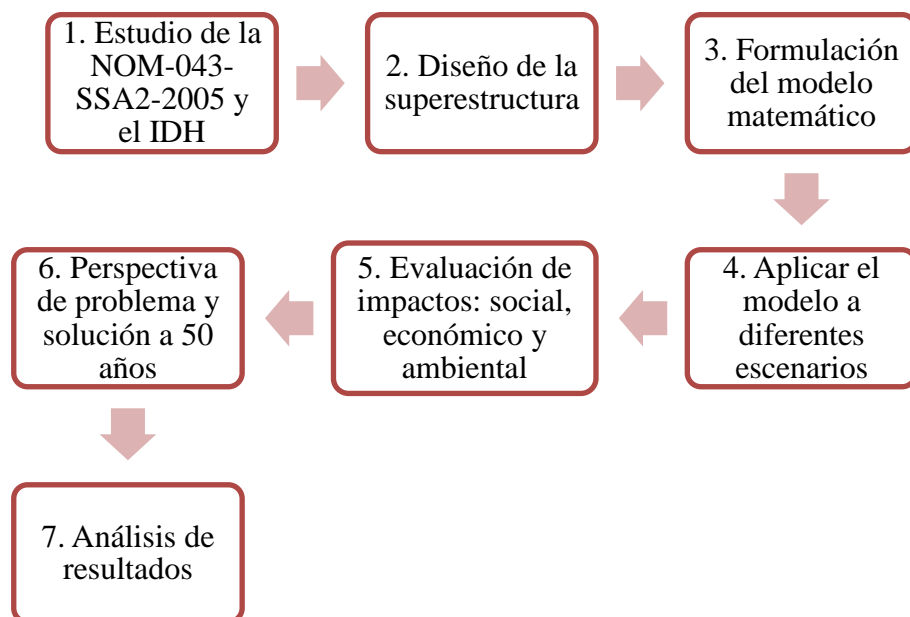


Figura 1.3. Metodología propuesta.

- 1.1 Identificar las zonas con mayor índice de marginación social, en base a parámetros como el índice de desarrollo humano.
- 1.2 Mapeo geográfico en base al tipo de clima, suelo, actividades primarias en base a la localización.
- 1.3 Elección de software de diseño.
- 1.4 Diseño de imágenes que representen las actividades involucradas.
- 2.1 Analizar todas las actividades involucradas en la cadena de suministro de alimentos.
- 2.2 Realizar balances de materia y energía en cada actividad necesaria para llevar a cabo la cadena completa.
- 2.3 Identificación de los parámetros y variables, así como la asignación de nombres respectivamente.
- 2.4 Formulación matemática.

3.1 Dividir la república, en base a su índice de desarrollo humano, en tres regiones zona Alta, Media y Baja.

3.2 Selección de regiones modelo, en cada una de las zonas, las cuales contengan parámetros promedio en cada una de ellas.

3.3 Recolección de parámetros en cada una de las regiones.

3.4 Aplicación del modelo matemático propuesto a cada caso de estudio.

3.5 Revisar la formulación matemática en base al comportamiento frente a los diferentes casos de estudio.

4.1 Recolección de datos generados por el aspecto, económico y social.

4.2 Elaboración de gráficos comparativos entre el aspecto económico y social entre los diferentes escenarios.

5.1 Análisis de cada uno de los parámetros involucrados en el daño ambiental en las tres principales etapas de la cadena de suministro, los cultivos, el procesamiento y transporte.

5.2 Aplicación de la metodología del Eco-indicador-99, para obtener la evaluación de impacto ambiental.

5.3 Diseño de gráficos comparativos del impacto ambiental en cada etapa para los diferentes escenarios.

6.1 A partir de los resultados y datos generados, se realizara una comparativa entre las aportaciones gubernamentales actuales y los costos involucrados en estas, para obtener una comparativa entre el beneficio generado y el gasto involucrado para cada alternativa.

6.2 Evaluación del Índice de fatalidades dadas por una mala nutrición, como indicador social, a partir de parámetros involucrados en la norma Mexicana NOM-043-SSA2-2005.

Capítulo 2

OPTIMIZACIÓN SOSTENIBLE DE REDES ALIMENTARIAS EN COMUNIDADES MARGINADAS

2.1. PANORAMA GENERAL

La deficiencia de nutrientes para una alimentación sustentable alrededor del mundo se ha convertido en uno de los problemas más grandes que la humanidad persigue atacar. Este problema se ve agravado en comunidades empobrecidas, dado que es un problema estrechamente relacionado con la seguridad del suministro de alimentos y la privación de derechos económicos. En todo el mundo, 159 millones de niños menores de cinco años sufren retraso en el crecimiento debido a la ausencia de nutrientes, mientras que 50 millones de niños del mismo grupo de edad tienen bajo peso (FAO, 2016). En 2016, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación informó que 795 millones de personas en todo el mundo están desnutridas y el 98% de ellas se encuentran en regiones en vías de desarrollo (**Figura 2.1**).

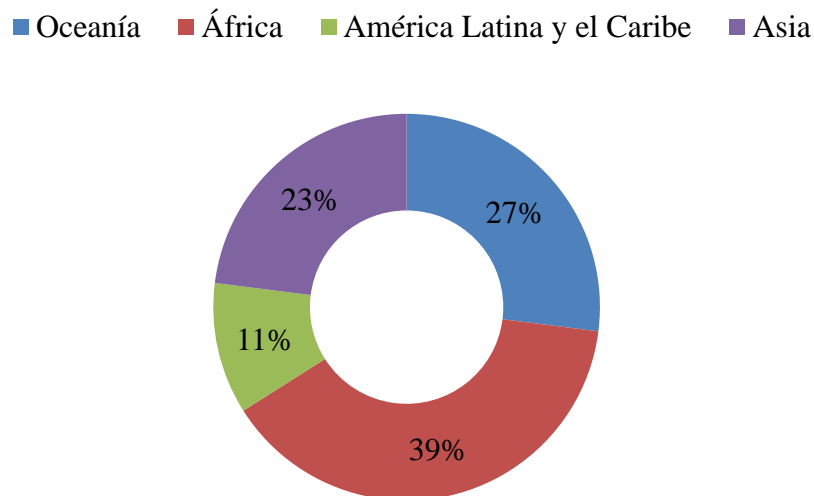


Figura 2.1. Distribución de desnutrición en regiones marginadas

Ante esta problemática, los gobiernos de todo el mundo han aplicado medidas para mitigar este problema centrándose principalmente en la ayuda alimentaria, en los que se incluye

subsidios y los programas de asistencia. Sin embargo, dichas propuestas dejan fuera puntos importantes como el análisis de la cadena de suministro de alimento involucrando aspectos económicos, sociales, políticos y ambientales. Además de lo mencionado, es necesario que las medidas para reducir la desnutrición involucren el desarrollo comunitario, los recursos locales, la oferta y la demanda, la producción de alimentos y los centros de distribución (Bartolini *et al.*, 2016). Conjuntamente, se deben abordar los aspectos de calidad, seguridad, salud y nutrición en las dietas (Rutten *et al.*, 2016). Es por ello que hacer la analogía entre las cadenas de suministro de alimentos y las cadenas de suministro industriales, es una herramienta atractiva que puede ofrecer un beneficio eficiente en involucrando todas las variables de decisión antes mencionadas. Previamente, algunos investigadores han realizado desarrollos teóricos relacionados con cadenas de suministro de diferentes procesos industriales a través de modelos de optimización, en los que se han abordado una amplia gama de casos de estudio. En este contexto, Guillén-Gosálbez y Grossmann (2010) propusieron un enfoque de optimización global para el diseño ambientalmente de las cadenas de suministro de productos químicos. Teniendo en cuenta que dichos objetivos ambientales pueden asociarse a objetivos de sostenibilidad mediante el uso de métricas multidimensionales (El-Halwagi, 2017). Bowling *et al.* (2011) presentaron un enfoque sistemático para la planificación de producción óptima y la ubicación de las instalaciones de un sistema de bio-refinerías, incluyendo la selección de materia prima, centros de pre-procesamiento, distribución e instalaciones de procesamiento centralizado con el objeto de encontrar el tamaño óptimo así como las estrategias operativas y ubicación óptimas. En este contexto, Santibañez-Aguilar *et al.* (2013) desarrollaron un modelo de programación matemática para la planificación óptima de las cadenas de suministro asociadas a la gestión de residuo sólido. Arredondo-Ramírez *et al.* (2016) presentaron un enfoque de optimización para la explotación de gas de esquisto incluyendo el desarrollo de infraestructura en México. Yue *et al.* (2016) incluyeron la optimización del ciclo de vida para la cadena de suministro de bioetanol en el Reino Unido. El-Halwagi *et al.* (2013) desarrollaron una formulación matemática de optimización para incluir consideraciones económicas, ambientales y de seguridad en el diseño de las cadenas de suministro de bio-productos. López-Díaz *et al.* (2016) propusieron un modelo matemático para la cadena de suministro de bio-refinerías que da cuenta de las interacciones con la cuenca hidrográfica

circundante. Martínez-Guido *et al.* (2016) analizaron la reconfiguración de una industria de caña de azúcar a una bio-refinería integrada. Noureldin y El-Halwagi (2015) y El-Halwagi (2016) introdujeron enfoques sistemáticos para la integración de las cadenas de suministro de procesamiento de hidrocarburos y las ciudades industriales. Garcia y You (2010) analizaron el nexo agua-energía-alimentos a través de toda la cadena de suministro. Galán-Martín *et al.* (2017) propusieron un modelo de optimización multiobjetivo para una red agrícola integral. En cuanto a las redes de alimentos, Sgarbossa y Russo (2017) integraron los residuos recuperados de la industria cárnica con el objetivo de mejorar la autosuficiencia y la sostenibilidad. Otros trabajos se han centrado en proponer un sistema alimentario para mantener la seguridad y la calidad de los alimentos (Wang y You, 2017). El problema del transporte (Yu *et al.*, 2016), la red terrestre (Accorsi *et al.*, 2016), la producción y distribución de planificación (Catalá *et al.*, 2016) y el empaquetado (Beitzen-Heineke *et al.*, 2017) se han evaluado como estrategias de mejora del suministro de alimentos, que incluyen aspectos ambientales, económicos y sociales. Cabe señalar que ninguno de los trabajos mencionados se ha dirigido a la red de suministro de alimentos de las comunidades marginadas para satisfacer las necesidades nutricionales a través de los recursos disponibles y teniendo en cuenta la interacción comercial entre las diferentes comunidades marginadas.

Por otro lado, las cadenas de suministro de alimentos de todo el mundo consumen entre un 20% y un 35% de la energía mundial en función del ciclo de vida (Gurnett *et al.*, 2011). Esto corresponde a aproximadamente el 15% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el mundo (Rutten *et al.*, 2016). Cabe mencionar que un tercio de los alimentos producidos se pierde o se desperdicia (Young y Dhanda, 2012). Además, la población mundial aumenta a una tasa de aproximadamente 1,18% por año (The World Bank, 2015), lo que significa una mayor demanda de alimentos, agua, energía y tierra (Wang y Yue, 2017). Además, los desafíos actuales del cambio climático, la salud pública y los desechos agrícolas están estrechamente relacionados con la seguridad alimentaria. En consecuencia, el análisis de las cadenas de suministro de alimentos es una fuente de creciente preocupación en todo el mundo. Algunas investigaciones se han centrado en la localización de sitios de producción que involucran aspectos ambientales y económicos (Nicholson *et al.*, 2015), así como la calidad y seguridad del producto (Bala *et al.*, 2014)

para reducir el costo (Manzini y Accorsi, 2013) y las emisiones asociadas de algunos productos (Özbayark *et al.*, 2007). Otros trabajos se han centrado en la integración de nuevas tecnologías (Ma *et al.*, 2013) y gestión (Soysal *et al.*, 2014) para obtener granjas sostenibles (Mosleh *et al.*, 2017). A partir de ello los modelos como los encontrados en las referencias previamente mencionadas (aplicados a diferentes procesos industriales) pueden ser la base para generar modelos matemáticas para la suministro de alimento.

2.2 PROBLEMÁTICA A RESOLVER

El problema abordado implica considerar un grupo de comunidades marginadas en el estado de Michoacán, de las que se consideraron factores como: recursos disponibles de cada comunidad, incluyendo el cultivo de la tierra, las condiciones climáticas, el agua dulce disponible y la infraestructura instalada para producir productos alimenticios. A partir de ellos, el objetivo fue encontrar la planificación óptima de la cadena de suministro (incluyendo el transporte y distribución de productos a nivel local y grupal) para satisfacer las necesidades nutricionales de las personas de estas comunidades, considerando el mínimo costo anual neto, el cual puede obtenerse al considerar el uso de recursos locales así como con la promoción de una interacción comercial entre estas comunidades (**Figura 2.2**).

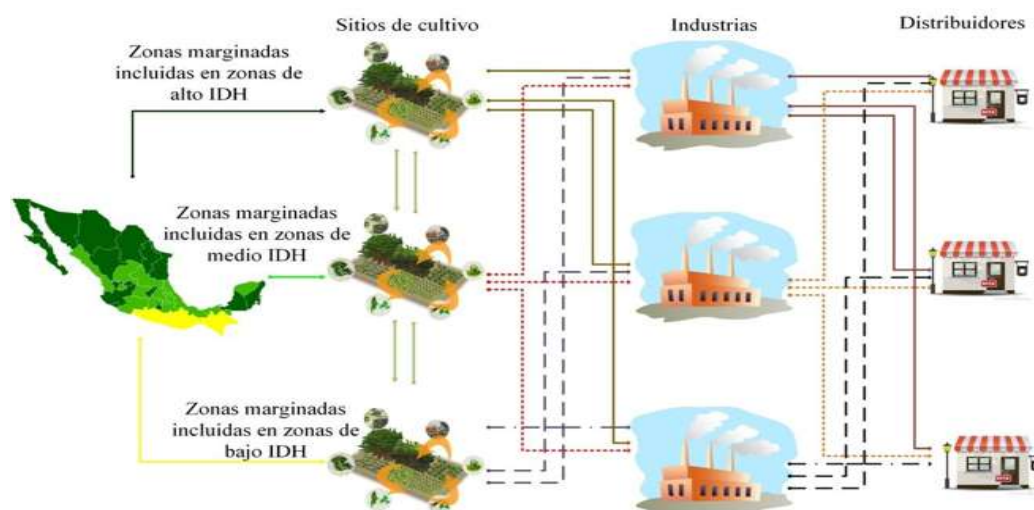


Figura 2.3. Alimentación sustentable para las zonas marginadas de México.

El modelo matemático propuesto se basa en la superestructura que se muestra en la **Figura 2.3**, incluye balances de masa para las materias primas en las diferentes comunidades, los balances de productos y las actividades de transporte para satisfacer las necesidades nutricionales de las personas en estas comunidades. La función objetivo consiste en minimizar los costos anuales totales, los cuales involucran todos los costos de producción de materias primas, producción de productos alimenticios, distribución de materias primas y productos, así como la compra externa de productos alimenticios.

2.3 ESTRATEGIA USADA PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA

2.3.1 Diseño de la superestructura

Tomando en cuenta la propuesta por el plato del buen comer a nivel nacional, surge la idea de la integración del plato del buen comer a nivel nacional como lo muestra la **Figura 2.4**, sin embargo dada la principal problemática encontrada en base a necesidades nutricionales diferentes para cada localidad, sexo y edad; se optó por inicializar el estudio del proyecto a partir la población únicamente en el estado de Michoacán, de donde fueron seleccionados 12 municipios; de los cuales se hizo un análisis de Índice de Pobreza (IP) e IDH por municipio, tomando en cuenta los estudios realizados por la CONEVAL (2012) y al PUND (2014) respectivamente; obteniendo como dato principal los tres municipios con IDH más bajo del estado y los 10 municipios con IP en el estado, los datos estudiados son mostrado por las **Tablas 2.1** y **2.2**.



Figura 2.4. Integración del plato del buen comer a las zonas marginadas del país

A partir de este análisis se encontró que el 64% de la población del estado vive en pobreza (Extrema y moderada), es decir aproximadamente 2,795,541 habitantes; el 86.6% población de Susupuato vive en pobreza, y sólo 53 municipios del estado se encuentran sobre la media de estatus económico estable. Posterior a esta evaluación se diseñó una superestructura que represente la cadena de suministro de una alimentación sustentable, pero en esta ocasión se tomó como primera estancia la selección de los 14 municipios del estado con mayor IP y menor IDH. Esto con el objeto de tener una comparación con el resto de la población aunado a la ideología que si se satisface la demanda para estos municipios es posible aplicarlos al resto del estado, es decir identificar el peor de los casos. La **Figura 2.3** muestra superestructura correspondiente. Una vez que se seleccionaron los 14 municipios como casos de estudios (Charapan, Churintzio, Churumuco, Huaniqueo, Nahutzen, Nocupétaro, Susupuato, Tacámbaro, Tangamandapio, Tiquicheo de Regules, Tumbiscatío, Turicato, Tuzantla y Tzizio), se realizó un análisis de la distribución de la población en cada uno por edades (siendo este de ayuda para la evaluación de las necesidades nutrimentales por edad), así como la caracterización de cada municipio seleccionado por materia prima producida.

Tabla 2.1. Municipios en Michoacán con un IP alto

		Pobreza (%)			
		Población (miles)	IDH	Moderada	Extrema
1	Charapan	8.517	0.7587	45	36
2	Churintzio	4.197	0.7681	43	6
3	Churumuco	10.153	0.7670	43	39
4	Huaniqueo	6.786	0.7369	47	14
5	Nahuatzen	24.644	0.7651	46	36
6	Nocupétaro	6.181	0.7188	37	49
7	Susupuato	5.257	0.7359	38	48
8	Tacámbaro	73.962	0.8042	45	15
9	Tangamandapio	21.761	0.7625	51	23
10	Tiquicheo	11.672	0.7659	42	38
11	Tumbiscatío	5.613	0.7628	44	40
12	Turicato	22.633	0.7613	41	37
13	Tuzantla	13.671	0.7593	40	39
14	Tzitzio	6.715	0.7651	41	45

CONEVAL (2010)

Tabla 2.2. Municipios en Michoacán con un IDH bajo

Municipio	Alto	Bajo
Nocupétaro	0.57	0.302
Susupuato	0.57	0.31
Huaniqueo	0.60	0.34
Referencia a nivel nacional	Benito Juárez 0.917	Cochoapa el Grande 0.30
CONEVAL (2012)		

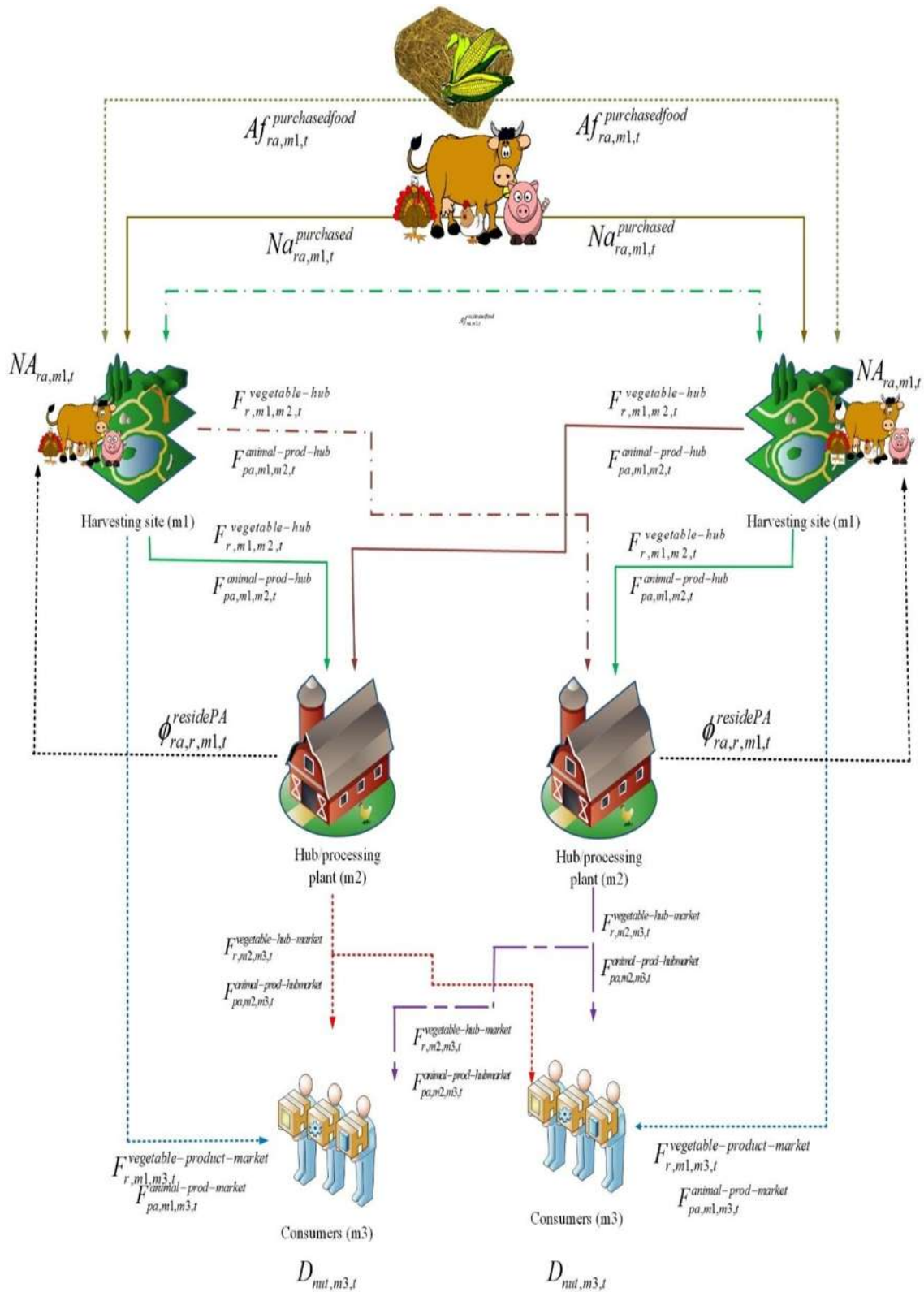


Figura 2.4. Superestructura alimentación sustentable para las zonas marginadas de Michoacán

2.4 MODELO MATEMÁTICO

2.4.1 Productos vegetales.

La **Ecuación 9** muestra el balance para el rendimiento que se obtiene del producto de origen vegetal (r), en cada municipio [sitio de cultivo ($m1$)], producido en un periodo de tiempo (t). El total de materia prima producida ($RM_{r,m1,t}^{vegetal}$) es igual al rendimiento ($\beta_{r,m1,t}^{harvesting\ sites}$) multiplicado por la cantidad de área usada para cada producto ($A_{r,m1,t}^{used}$).

$$RM_{r,m1,t}^{vegetal} = \beta_{r,m1,t}^{harvesting\ sites} A_{r,m1,t}^{used} \quad \forall r \in R, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 9}$$

2.4.2 Balance de área de cultivo

Estos balances de uso agrícola de suelo (área) deben de estar limitados por la cantidad de área (tierras disponibles), esto con el objeto de no afectar negativamente al ambiente por el uso de suelo, dichos balances son mostrados por las **Ecuaciones 10 y 11**; en la **Ecuación 10** se cuantifica el área usada por los cultivos ($A_{r,m1,t}^{used}$), siendo igual a la suma entre el área de uso agrícola actual asignada en cada municipio ($A_{r,m1,t}^{current}$) y el área que podría ser usada para el mismo fin ($A_{r,m1,t}^{new}$). El uso de tierra tiene que ser finito con el objeto de que el cambio de suelo sea menor no impacte de manera negativa, por lo que la **Ecuación 11** muestra el límite para el área total usada para la agricultura ($A_{r,m1,t}^{Total-Vegetable}$) en cada municipio.

$$A_{r,m1,t}^{used} = A_{r,m1,t}^{Current} + A_{r,m1,t}^{new} \quad \forall r \in R, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 10}$$

$$A_{r,m1,t}^{used} \leq A_{r,m1,t}^{Total-Vegetable} \quad \forall m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 11}$$

Tabla 2.3. Distribución de área en cada municipio seleccionado

	Área actual	Área nueva	Área Máxima	Área total
Charapan	117	77.33	194.33	233
Churintzio	74.06	54.63	128.69	229
Churumuco	186.71	223	409.71	1115.26
Huaniqueo	74.25	70.91	145.16	201.06
Nahuatzen	138.11	29.71	167.82	304.35
Nocupétaro	38.32	266.07	304.39	548.03
Susupuato	91.03	75.69	166.72	264.94
Tacámbaro	341.35	72.08	413.43	788.69
Tangamandapio	138.26	61.98	200.24	315.5
Tiquicheo	120.81	365.54	486.35	1493.46
Tumbiscatío	63.48	1252.44	1315.92	2064.49
Turicato	314.91	630.61	945.52	1544.17
Tuzantla	138.46	363.4	501.86	1017.28
Tzitzio	21.32	402.79	424.11	941.21

INEGI (2013)

2.4.3 Productos de origen animal.

En el caso de productos de origen animal es necesario contemplar diferentes análisis matemáticos; primero, la **Ecuación 12** es usada para medir la cantidad de animales producidos en cada municipio ($NA_{ra,m,t}$), ésta dependerá de la cantidad de alimento disponible ($A_{ra,m,t}^{usedfood}$) para cada especie de animal contemplada (ra), multiplicada por el rendimiento de crecimiento de cada especie alimentada ($\theta_{ra,m,t}^{YieldPA}$), a esto se le suman la cantidad de animales comprados ($Na_{ra,m,t}^{purchased}$) a otros sitios así como la resta de animales vendidos respectivamente ($Na_{ra,m,t}^{sale}$).

$$NA_{ra,m1,t} = \theta_{ra,m1,t}^{YieldPA} Af_{ra,m1,t}^{usedfood} + Na_{ra,m1,t}^{purchased} - Na_{ra,m1,t}^{sale} \forall ra \in Ra, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 12}$$

Las toneladas de alimento usado ($Af_{ra,m1,t}^{usedfood}$), pueden provenir de dos fuentes principales: las que se compran ($Af_{ra,m1,t}^{purchasedfood}$) y las que se producen en el mismo sitio (estas pueden provenir también de residuos generados de los cultivos principales) ($Af_{ra,m1,t}^{cultivatedfood}$). Este balance lo define la **Ecuación 13**:

$$Af_{ra,m1,t}^{usedfood} = Af_{ra,m1,t}^{cultivatedfood} + Af_{ra,m1,t}^{purchasedfood} \forall ra \in Ra, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 13}$$

El alimento que se contempla ($Af_{ra,m1,t}^{cultivatedfood}$) puede provenir como se mencionó anteriormente de residuos ($RM_{r,m1,t}^{vegetable}$), éste será definido por el rendimiento que tenga cada cultivo, es decir si se habla de maíz el elote es el único usado, mientras que el rastrojo puede ser usado como alimento para animales ($\phi_{ra,r,m1,t}^{residePA}$); pero también pueden ser alimentos cultivados estrictamente para uso animal ($A_{ra,m1,t}^{usedanimalfood}$) multiplicados por su respectivo rendimiento ($\theta_{ra,m1,t}^{YieldPA}$). La **Ecuación 14** nos enuncia este evento.

$$Af_{ra,m1,t}^{cultivatedfood} = \theta_{ra,m1,t}^{YieldPA} A_{ra,m1,t}^{used-animal-food} + \sum_r (\phi_{ra,r,m1,t}^{residePA} RM_{r,m1,t}^{vegetable}) \forall ra \in Ra, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 14}$$

En la ecuación anterior se menciona que pueden cultivarse algunos alimentos ($A_{ra,m1,t}^{used-animal-food}$) para uso animal por lo que es necesario delimitar el uso de suelo para esta actividad, mediante la **Ecuación 15** podemos modelar este límite ($A_{ra,m1,t}^{Total-animal-food}$).

$$A_{ra,m1,t}^{used-animal-food} \leq A_{ra,m1,t}^{Total-animal-food} \forall ra \in Ra, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 15}$$

2.4.4 Producción de carne, huevos y leche

Dentro de los alimentos humanos contemplados de origen animal se encuentra la carne, huevo y leche, estos pueden ser medidos mediante el rendimiento de cada especie

productora $(\lambda_{pa,ra,m1,t})$ por la cantidad de animales contemplada $(NA_{ra,m1,t})$ para la producción (**Ecuación 15**).

$$F_{pa,m1,t}^{animal-product} = NA_{ra,m1,t} \lambda_{pa,ra,m1,t} \quad \forall pa \in PA, ra \in RA, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 15}$$

2.4.5 Distribución de los productos

Vegetales: El total de vegetales producidos es igual $(F_{r,m1,t}^{vegetable})$ a la cantidad de vegetales recibidos en el almacén $(\sum_{m2} F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub})$ en el periodo (t) , más la cantidad que puede ser enviada directamente a la población $(\sum_{m3} F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-products})$ como se muestra en la **Ecuación 16**:

$$F_{r,m1,t}^{vegetable} = \sum_{m2} F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub} + \sum_{m3} F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-product-market}, \quad \forall r \in R, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 16}$$

El balance de vegetales en el almacén es representado mediante la **Ecuación 17**, en el cual la cantidad almacenada $(S_{r,m2,t}^{vegetable-stored})$ es igual a lo almacenado en un periodo anterior de tiempo $(S_{r,m2,t-1}^{vegetable-stored})$, más el flujo proveniente de otros sitios de cultivo $(\sum_{m1} F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub})$, menos la cantidad que fue enviada a los mercados $(\sum_{m3} F_{r,m2,m3,t}^{vegetable-hub-market})$ y el flujo vendido $(F_{r,m2,t}^{vegetable-hub-sale})$.

$$S_{r,m2,t}^{vegetable-stored} = S_{r,m2,t-1}^{vegetable-stored} + \sum_{m1} F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub} - \sum_{m3} F_{r,m2,m3,t}^{vegetable-hub-market} - F_{r,m2,t}^{vegetable-hub-sale}, \quad \forall r \in R, m2 \in M2, t \in T \quad \text{Ecuación 17}$$

La **Ecuación 18**, por otro lado, representa el balance de vegetales en los mercados $(F_{r,m3,t}^{vegetable-markets})$, donde la cantidad de vegetales en los mercados es igual al flujo recibido

de los almacenes $\left(\sum_{m2} F_{r,m2,m3,t}^{vegetable-hub-market} \right)$, y el flujo recibido directamente de los sitios de cultivo (en los que no fue ningún tratamiento) $\left(\sum_{m1} F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-product-market} \right)$, a esto se suma los vegetales comprados de otros sitios o productores externos $\left(F_{r,m3,t}^{vegetable-purchase} \right)$.

$$F_{r,m3,t}^{vegetable-markets} = \sum_{m1} F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-product-market} + \sum_{m2} F_{r,m2,m3,t}^{vegetable-hub-market} + F_{r,m3,t}^{vegetable-purchase}, \forall r \in R, m3 \in M3, t \in T$$

Ecuación 18

Productos de origen animal: En este mismo sentido fueron formulados balances para los productos de origen animal, para este tipo de productos es necesario un pre-tratamiento o empaque especial (ya que son alimentos perecederos), es por ello que la **Ecuación 19** que representa el flujo de productos de origen animal $\left(F_{pa,m1,t}^{animal-product} \right)$ es igual a la cantidad de producto en el almacén $\left(\sum_{m2} F_{pa,m1,m2,t}^{animal-product-hub} \right)$ más la cantidad de producto que se manda a los mercados $\left(\sum_{m3} F_{pa,m1,m3,t}^{animal-product-market} \right)$.

$$F_{pa,m1,t}^{animal-product} = \sum_{m2} F_{pa,m1,m2,t}^{animal-product-hub} + \sum_{m3} F_{pa,m1,m3,t}^{animal-product-market}, \forall pa \in PA, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 19}$$

El balance para los productos de origen animal en los almacenes es representado por la **Ecuación 20**, en el cual se señala que la cantidad de productos almacenados $\left(S_{pa,m2,t}^{animalproduct-stored} \right)$, es igual a la cantidad de productos recibidos en un periodo de tiempo anterior $\left(S_{pa,m2,t-1}^{animalproduct-stored} \right)$, más el flujo que se recibe de otros sitios actualmente $\left(\sum_{m1} F_{pa,m1,m2,t}^{animalproduct-hub} \right)$, menos los enviados a los mercados $\left(\sum_{m3} F_{pa,m2,m3,t}^{animalproduct-hub-market} \right)$ y los productos vendidos $\left(F_{pa,m2,t}^{animalproduct-hub-sale} \right)$.

$$S_{pa,m2,t}^{animalproduct-stored} = S_{pa,m2,t-1}^{animalproduct-stored} + \sum_{m1} F_{pa,m1,m2,t}^{animalproduct-hub} - \sum_{m3} F_{pa,m2,m3,t}^{animalproduct-hub-market} - F_{pa,m2,t}^{animalproduct-hub-sale}, \forall pa \in PA, m2 \in M2, t \in T$$

Ecuación 20

La **Ecuación 21** presenta el balance para productos de origen animal en los mercados $(F_{pa,m3,t}^{animalproduct-markets})$, el cual es igual al flujo recibido de los almacenes $(\sum_{m2} F_{pa,m2,m3,t}^{animalproduct-hub-market})$, y el flujo que se envía directamente desde los sitios de cultivo $(\sum_{m1} F_{pa,m1,m3,t}^{animalproduct-market})$, más la cantidad de productos comprados $(F_{pa,m3,t}^{animalproduct-purchase})$.

$$F_{pa,m3,t}^{animalproduct-markets} = \sum_{m1} F_{pa,m1,m3,t}^{animalproduct-market} + \sum_{m2} F_{pa,m2,m3,t}^{animalproduct-hub-market} + F_{pa,m3,t}^{animalproduct-purchase}, \forall pa \in PA, m3 \in M3, t \in T$$

Ecuación 21

2.4.6 Demanda de nutrientes

Para la demanda de productos por la población se dividió en 5 grupos principales en base a lo reportado por el “*Plato del buen comer*”, estos grupos están representados por una pirámide (**Figura 2.5**); los grupos son aceites, frutas, granos, vegetales, productos lácteos, frijoles y carne. Los kilogramos de cada producto demandados dependen de la cantidad de pobladores en cada una de las regiones seleccionadas.



Figura 2.5. Plato del buen comer (mi pirámide), (NOM-043-SSA2-2005, 2006)

La población fue segmentada primeramente por edad y posteriormente por sexo. Si la población seleccionada se encuentra en el género femenino es necesario definir si están se encuentran en etapa de embarazo o amamantando. Todos estos factores (etapas de vida) hacen cambios en la demanda. La **Tabla 2.4** muestra los estratos en los que la población fue dividida.

Tabla 2.4. Etapas de vida

Maternal	2 to 3	Adultos	Embarazo	1° Trimestre
Primaria	4 to 8	Mujeres	19 to 30	2° Trimestre
Chichas	9 to 13		31 to 50	3° Trimestre
Chicos	9 to 13	Hombres	19 to 30	Lactancia 1° Trimestre
Adolescentes			31 to 50	2° Trimestre
Chicas	14 to 18	Adultos mayores		3° Trimestre
Chicos	14 to 18	Mujeres	Más de 51	
		Hombres	Más de 51	

Bourgues *et al.* (2009)

La **Ecuación 22**, evalúa la demanda en términos de la edad de grupo o de la población asociada con las distribuciones de la población obtenidas (INEGI, 2012). Mientras que la **Ecuación 23** muestra la demanda ($D_{nut,m3,t}$) en términos de flujo animal y vegetal ($F_{r,m3,t}^{vegetable-markets}$, $F_{pa,m3,t}^{animalproduct-markets}$), multiplicados por el factor de cada nutriente (grupo alimenticio) demandada por cada población ($\xi_{nut,r}^{nut-vegetable}$, $\xi_{nut,pa}^{nut-ap}$).

$$D_{nut,m3,t} = Population_{m3,t} GE_{nut}, \forall nut \in NUT, m3 \in M3, t \in T \quad \text{Ecuación 22}$$

$$D_{nut,m3,t} = \sum_r F_{r,m3,t}^{vegetable-markets} \xi_{nut,r}^{nut-vegetable} + \sum_{pa} F_{pa,m3,t}^{animalproduct-markets} \xi_{nut,pa}^{nut-ap}, \forall nut \in NUT, m3 \in M3, t \in T \quad \text{Ecuación 23}$$

2.4.7 Costos

Producción de vegetales: El costo generado por la producción de materia prima vegetal ($C_{r,m1,t}^{vegetable-production}$) es igual a la multiplicación del flujo producido ($RM_{r,m1,t}^{vegetable}$) por el factor de costo en (USD\$) de cada cultivo ($\sigma_{r,m1,t}^{vegetable-production}$). Este balance está representado mediante la **Ecuación 24**.

$$C_{r,m1,t}^{vegetable-production} = RM_{r,m1,t}^{vegetable} \sigma_{r,m1,t}^{vegetable-production}, \forall r \in R, m1 \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 24}$$

2.4.8 Producción de productos animales

Animales comprados: Para satisfacer la demanda de algún municipio primeramente se debe recurrir a lo cultivado localmente; sin embargo, si la producción es menor a la demanda, entonces será necesario la compra a municipios externos. Para el caso de productos de origen animal es necesario contar con cierta cantidad de animales, si esta cantidad no satisface la demanda estos animales tendrán que adquiridos de vendedores externos a la región, dando como resultado el costo por la compra de animales $(C_{ra,m1,t}^{animal-purchase})$ mostrado en la **Ecuación 25** que se obtiene mediante la multiplicación del costo $(\sigma_{ra,m1,t}^{animal-purchased})$ por la cantidad de animales $(NA_{ra,m1,t}^{purchased})$.

$$C_{ra,m1,t}^{animal-purchase} = NA_{ra,m1,t}^{purchased} \sigma_{ra,m1,t}^{animal-purchased}, \forall ra \in RA, ml \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 25}$$

Alimento Animal: Como se había mencionada con anterioridad, el alimento para los animales considerados puede obtenerse de dos formas; por producción $(C_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal})$ y compra, este ultima genera un costo, el cual se obtiene mediante la **Ecuación 26** $(AF_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal})$, multiplicando el costo $(\sigma_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal})$ por la cantidad de toneladas compradas. Por otro lado, si se considera el cultivo $(AF_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal})$ también se genera un costo (USD\$/ton) $(\sigma_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal})$, pero este está dado en base al flujo (toneladas) por el costo de obtención de estas (**Ecuación 27**).

$$C_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal} = AF_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal} \sigma_{ra,m1,t}^{purchased-food-animal}, \forall ra \in RA, ml \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 26}$$

$$C_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal} = AF_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal} \sigma_{ra,m1,t}^{cultivatedfood-animal}, \forall ra \in RA, ml \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 27}$$

Una vez que se cuenta con las materias primas de productos de origen animal el proceso de obtención de estos genera un costo representado por la **Ecuación 28** $(C_{pa,m1,t}^{animal-production})$, en el que es considerado el flujo producido $(F_{pa,m1,t}^{animal-production})$ multiplicado por el costo (USD\$/ton) $(\sigma_{pa,m1,t}^{animal-production})$.

$$C_{pa,m1,t}^{animal-production} = F_{pa,m1,t}^{animal-production} \sigma_{pa,m1,t}^{animal-production}, \forall pa \in PA, ml \in M1, t \in T \quad \text{Ecuación 28}$$

2.4.9 Costo de transporte

El transporte es otra de las actividades involucradas en la cadena de suministro que tiene un costo asociado, es necesario transportar tanto materias primas como productos; en este sentido el análisis para los vegetales debe ser en dos sentidos ya que pueden ser enviados en dos rutas distintas, directamente a los mercados o a los almacenes (en los que recibirán tratamiento, empaquetado o procesamiento específico), como se muestra en la **Figura 2.6**. Para el caso de productos animales, es necesario la toma de las mismas consideraciones que en los vegetales, el transporte a los almacenes (en los que reciben actividades de producción o empaquetado) y posteriormente los productos son transportados a los mercados, o de manera directa a los mercados. Los factores de costo son constantes y dependen directamente de las distancias entre el sitio que los envía y el destino final.

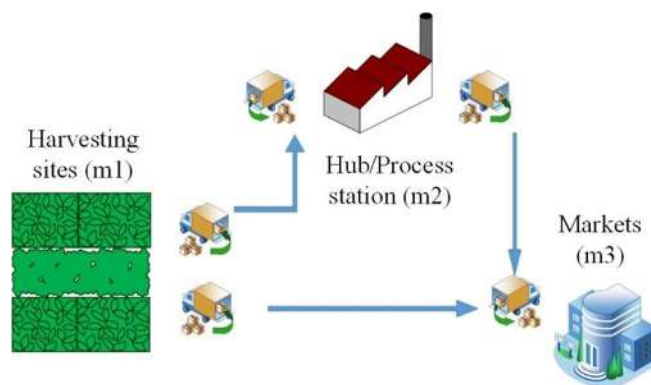


Figura 2.6. Distribución de los productos

Las **Ecuaciones 29, 30 y 31** representan el balance de costos para transporte, en las que se incluye la multiplicación del flujo de vegetales transportado $\left[e.g. \left(\sum_{m1} \sum_{m2} F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub} \right) \right]$ por el costo de esta actividad $\left[e.g. \left(\sigma_{r,m1,m2,t}^{transp-veg-hub} \right) \right]$. Las **Ecuaciones 29 y 30** muestran el transporte de la ruta sitio de cultivo-almacén-mercado, mientras que la **Ecuación 31** muestra el transporte directo de los sitios de cultivo a mercados.

$$C_{r,t}^{Trans-vegetabletohub} = \sum_{m1} \sum_{m2} F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub} \sigma_{r,m1,m2,t}^{transp-veg-hub}, \forall r \in R, t \in T \quad \text{Ecuación 29}$$

$$C_{r,t}^{Trans-vegetable-hub-market} = \sum_{m2} \sum_{m3} F_{r,m2,m3,t}^{vegetable-hub-market} \sigma_{r,m2,m3,t}^{transp-veg-hub-market}, \forall r \in R, t \in T \quad \text{Ecuación 30}$$

$$C_{r,t}^{Trans-vegetable-product-market} = \sum_{m1} \sum_{m3} F_{r,m1,m3,t}^{vegetable-product-market} \sigma_{r,m1,m3,t}^{transp-veg-produc-market}, \forall r \in R, t \in T \quad \text{Ecuación 31}$$

En este mismo sentido se proponen ecuaciones para evaluar el costo generado por el transporte de productos de origen animal, las **Ecuaciones 32** y **33** para la ruta sitio de cultivo-almacén-mercado, y la **Ecuación 34** para la ruta directa entre el sitio de cultivo y los mercados. Las tres ecuaciones incluyen la multiplicación de los flujos $\left[e.g. \left(\sum_{m1} \sum_{m3} F_{pa,m2,m3,t}^{animal-prod-market} \right) \right]$ por el costo en relación a la distancia $\left[e.g. \left(\sigma_{pa,m2,m3,t}^{Transp-ap-prod-market} \right) \right]$.

$$C_{pa,t}^{trans-ap-prod-hub} = \sum_{m1} \sum_{m2} F_{pa,m1,m2,t}^{animal-prod-hub} \sigma_{pa,m1,m2,t}^{Transp-ap-prod-hub}, \forall pa \in PA, t \in T \quad \text{Ecuación 32}$$

$$C_{pa,t}^{trans-ap-prod-hubmarket} = \sum_{m2} \sum_{m3} F_{pa,m2,m3,t}^{animal-prod-hubmarket} \sigma_{pa,m2,m3,t}^{Transp-ap-prod-hubmarket}, \forall pa \in PA, t \in T \quad \text{Ecuación 33}$$

$$C_{pa,t}^{trans-ap-prod-market} = \sum_{m1} \sum_{m3} F_{pa,m1,m3,t}^{animal-prod-market} \sigma_{pa,m1,m3,t}^{Transp-ap-prod-market}, \forall pa \in PA, t \in T \quad \text{Ecuación 34}$$

2.4.10 Costo por almacenamiento

Otra de las actividades contempladas en la cadena de suministro es el almacenamiento de productos, lo cual genera un costo dependiendo al periodo de tiempo involucrado o de estadía de los productos. Este costo es generado por el hecho de que muchos de los productos requieren condiciones especiales para su mantenimiento, como por ejemplo refrigeración. De esta forma, las **Ecuaciones 35** y **36**, representan los balances de costo por almacenamiento. En ambas ecuaciones se multiplica el costo unitario $\left[e.g. \left(\sigma_{r,m2,t}^{stored-vegetable-product} \right) \right]$ por el volumen $\left[e.g. \left(S_{r,m2,t}^{vegetable-stored} \right) \right]$ de producto almacenado durante el periodo de tiempo.

$$C_{r,m2,t}^{storage-vegetables} = S_{r,m2,t}^{vegetable-stored} \sigma_{r,m2,t}^{stored-vegetable-product}, \forall r \in R, m2 \in M2, t \in T \quad \text{Ecuación 35}$$

$$C_{pa,m2,t}^{storage-ap} = S_{pa,m2,t}^{animal-product-stored} \sigma_{pa,m2,t}^{ap-stored}, \forall pa \in PA, m2 \in M2, t \in T \quad \text{Ecuación 36}$$

2.4.11 Costo generado por la compra de alimento

En las ecuaciones previas se considera el caso en el que la demanda es satisfecha por la producción local, sin embargo si demanda excede la producción es necesario aumentar dicha producción externamente, en este sentido se generan costos por la compra de productos tanto de origen animal como vegetal. Las **Ecuaciones 37** y **38** representan los balances respectivos para cada grupo de alimento, en las que se multiplica el flujo ($F_{r,m3,t}^{vegetable-purchase}$) por el factor monetario asociado ($\sigma_{r,m3,t}^{vegetable-purchase}$).

$$C_{pa,m3,t}^{animal-product-purchase} = F_{pa,m3,t}^{animal-product-purchase} \sigma_{pa,m3,t}^{ap-purchase}, \forall pa \in PA, m3 \in M3, t \in T \quad \text{Ecuación 37}$$

$$C_{r,m3,t}^{vegetable-purchase} = F_{r,m3,t}^{vegetable-purchase} \sigma_{r,m3,t}^{vegetable-purchase}, \forall r \in R, m3 \in M3, t \in T \quad \text{Ecuación 38}$$

2.4.12 Ventas

Anteriormente se mencionó que si un sitio no era capaz de satisfacer su demanda de alimento, éste tendría que comprar productos externos, dichos vendedores pueden ser otros sitios incluyendo los alrededores. Las **Ecuaciones 39** y **40** muestran el balance de ganancia generada para los sitios de venta (que en este caso son los almacenes), con la venta de productos almacenados se evitan pérdidas de productos perecederos principalmente, y con ello no se afecta al balance global económico. En el caso de la **Ecuación 39** se multiplica el flujo de productos de origen animal ($F_{pa,m2,t}^{animal-product-hub-sale}$) vendidos por el precio de la compra que se genere ($\sigma_{pa,m2,t}^{an-sale}$), de la misma forma se realiza para los productos vegetales (**Ecuación 40**).

$$C_{pa,m2,t}^{ap-sales} = F_{pa,m2,t}^{animal-product-hub-sale} \sigma_{pa,m2,t}^{an-sale}, \forall pa \in PA, m2 \in M2, t \in T \quad \text{Ecuación 39}$$

$$C_{r,m2,t}^{vegetable-sales} = F_{r,m2,t}^{vegetable-hub-sale} \sigma_{r,m2,t}^{vegetable-sale}, \forall r \in R, m2 \in M2, t \in T \quad \text{Ecuación 40}$$

2.4.13 Costo total anual (TAC)

El balance general económico es evaluado mediante el costo total anual, en este se engloban todos los valores de costos generados por cada actividad en toda la cadena de suministro, estos costos son restados de las ganancias globales generadas por las ventas de cada producto.

$$\begin{aligned} TAC = & \sum_r \sum_{m1} \sum_t C_{r,m1,t}^{vegetable-production} + \sum_{ra} \sum_{m1} \sum_t C_{ra,m1,t}^{animal-purchase} + \sum_{ra} \sum_{m1} \sum_t C_{ra,m1,t}^{cultivated-food-animal} \\ & + \sum_{ra} \sum_{m1} \sum_t C_{ra,m1,t}^{purchased-animal-food} + \sum_{pa} \sum_{m1} \sum_t C_{pa,m1,t}^{animal-production} + \sum_r \sum_t C_{r,t}^{Trans-vegetabletohub} + \\ & \sum_r \sum_t C_{r,t}^{Trans-vegetable-product-market} + \sum_r \sum_t C_{r,t}^{Trans-vegetable-hub-market} + \sum_{pa} \sum_t C_{pa,t}^{trans-ap-prod-hub} + \\ & \sum_{pa} \sum_t C_{pa,t}^{trans-ap-prod-market} + \sum_{pa} \sum_{m2} \sum_{m3} \sum_t C_{pa,m2,m3,t}^{trans-ap-hub-market} + \sum_r \sum_{m2} \sum_t C_{r,m2,t}^{storage-vegetable} + \\ & \sum_{pa} \sum_{m2} \sum_t C_{pa,m2,t}^{storage-ap} + \sum_r \sum_{m3} \sum_t C_{r,m3,t}^{vegetable-purchase} + \sum_{pa} \sum_{m3} \sum_t C_{pa,m3,t}^{animal-product-purchase} - \\ & \sum_p \sum_{m2} \sum_t C_{p,m2,t}^{vegetable-sales} - \sum_{pa} \sum_{m2} \sum_t C_{pa,m2,t}^{ap-sales} \end{aligned}$$

Ecuación 41

2.4.14 Función objetivo

La forma de aterrizar todas las formulas planteadas es mediante la función objetivo en la que se rige la dirección de programa propuesto, para este caso la idea principal es satisfacer la necesidad de suministro y aseguramiento de alimento bajo el menor costo económico global, regido bajo la **Ecuación 42**.

$$\text{Objective Function} = \min TAC$$

Ecuación 42

2.5 RECOLECCIÓN DE DATOS

Se seleccionaron los municipios con el IDH más bajo del estado de Michoacán; posteriormente, para cada municipio considerado se realizó una distribución para la

población por grupos de edad, teniendo en cuenta el informe del INEGI (2017). La **Tabla 2.4** muestra los grupos de edad considerados; mientras tanto, la **Tabla 2.5** presenta la distribución por grupos de edad en cada sitio seleccionado. Además, la **Tabla 2.6** se generó utilizando el enfoque informado por Bourges *et al.* (2009) para las necesidades nutricionales de los diferentes grupos de edad. Además, se realizó un análisis para identificar los activos económicos en cada municipio, que incluye agricultura, ganadería, tierras agrícolas disponibles, agua potable y condiciones de agua disponibles, como se puede ver en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.5. Distribución de la población en los municipios seleccionados (%).

Municipios	Niños		Chicas	Chicos	Chicas	Chicos	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	
	0-1	2 a 3	4 a 8	9 a 13	9 a 13	14 a 18	14 a 18	19 a 30	19 a 30	31 a 50	31 a 50	Más de 51	Más de 51
Charapan	0,93	1,87	11,21	5,99	5,29	2,52	2,41	6,31	6,05	19,84	15,18	12,51	9,88
Churintzio	1,74	3,49	8,72	5,90	4,55	4,92	3,79	11,92	9,17	13,57	10,44	12,31	9,49
Churumuco	0,99	2,00	11,97	5,93	6,04	2,22	2,24	5,57	5,60	17,75	17,60	11,12	10,97
Huaniqueo	1,40	2,81	7,02	4,87	3,53	4,06	2,94	11,60	8,41	17,95	13,00	12,99	9,41
Nahuatzen	0,91	1,83	10,95	5,40	5,55	4,27	3,80	10,66	9,50	6,15	5,34	18,74	16,92
Nocupétaro	1,06	2,14	12,79	7,23	5,56	2,18	2,18	5,44	5,46	17,40	16,30	11,43	10,84
Susupuato	0,93	1,89	11,31	6,00	5,31	2,34	2,10	5,81	5,24	18,45	17,76	11,55	11,32
Tacámbaro	1,00	2,01	12,06	6,00	6,06	4,20	3,90	10,50	9,76	5,80	5,20	17,61	15,89
Tangamandapio	2,74	5,49	13,71	8,97	7,49	7,47	6,24	14,99	12,51	6,15	5,14	4,96	4,14
Tiquicheo	0,80	1,61	9,66	4,85	4,81	2,21	2,13	5,52	5,34	19,11	19,17	12,37	12,41
Tumbiscatío	1,03	2,05	12,31	5,42	6,89	2,26	2,13	5,64	5,33	17,19	17,67	10,86	11,23
Turicato	2,91	5,83	14,57	9,35	8,13	7,80	6,75	13,86	12,04	3,72	3,23	6,31	5,49
Tuzantla	2,98	5,96	14,90	9,21	8,67	7,67	7,23	13,80	13,00	1,38	1,29	7,16	6,74
Tzitzio	0,91	1,84	10,98	5,80	5,19	2,04	2,10	5,09	5,23	17,94	18,75	11,88	12,26

Table 2.6. Necesidades nutricionales (Toneladas/persona*año).

Sexo	Edad	Carbohidratos	Fibra	Grasas	Ácidos grasos poli-insaturados (n-3)	Ácidos grasos poli-insaturados (n-6)	Colesterol	Proteína
Ambos	0 a 1	0.000539	0.000133	0.000217	0.0000308	0.0000035	8.75E-07	0.00007
Ambos	2 a 3	0.00091	0.000133	0.00021	0.0000322	0.0000322	8.75E-07	0.0000091
Ambos	4 a 8	0.00091	0.000175	0.000245	0.000049	0.000049	8.75E-07	0.000133
Chicas	9 a 13	0.00091	0.000182	0.000245	0.00007	0.00007	8.75E-07	0.000238
Chicos	9 a 13	0.00091	0.000217	0.000245	0.000084	0.000084	8.75E-07	0.000238
Chicas	14 a 18	0.00091	0.000182	0.000245	0.00007	0.00007	8.75E-07	0.000322
Chicos	14 a 18	0.00091	0.000266	0.000245	0.000077	0.000077	8.75E-07	0.000364
Mujeres	19 a 30	0.00091	0.000175	0.00021	0.000084	0.000084	8.75E-07	0.000322
Hombres	19 a 30	0.00091	0.000266	0.00021	0.000119	0.000119	8.75E-07	0.000392
Mujeres	31 a 50	0.00091	0.000175	0.00021	0.000084	0.000084	8.75E-07	0.000322
Hombres	31 a 50	0.00091	0.000266	0.00021	0.000119	0.000119	8.75E-07	0.000392
Mujeres	Más de 51	0.00091	0.00021	0.00021	0.000077	0.000077	8.75E-07	0.000322
Hombres	Más de 51	0.00091	0.00021	0.00021	0.000098	0.000098	8.75E-07	0.000392

2.6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El modelo formulado es un modelo lineal (Linear-Programming LP), el cual tiene 169,938 restricciones y 650,418 variables continuas; la compilación como se mencionó con anterioridad fue realizada en la plataforma de GAMS, tomando un tiempo de cómputo de 2.62 segundos usando como resolvidor CPLEX (Brooke *et al.*, 2017).

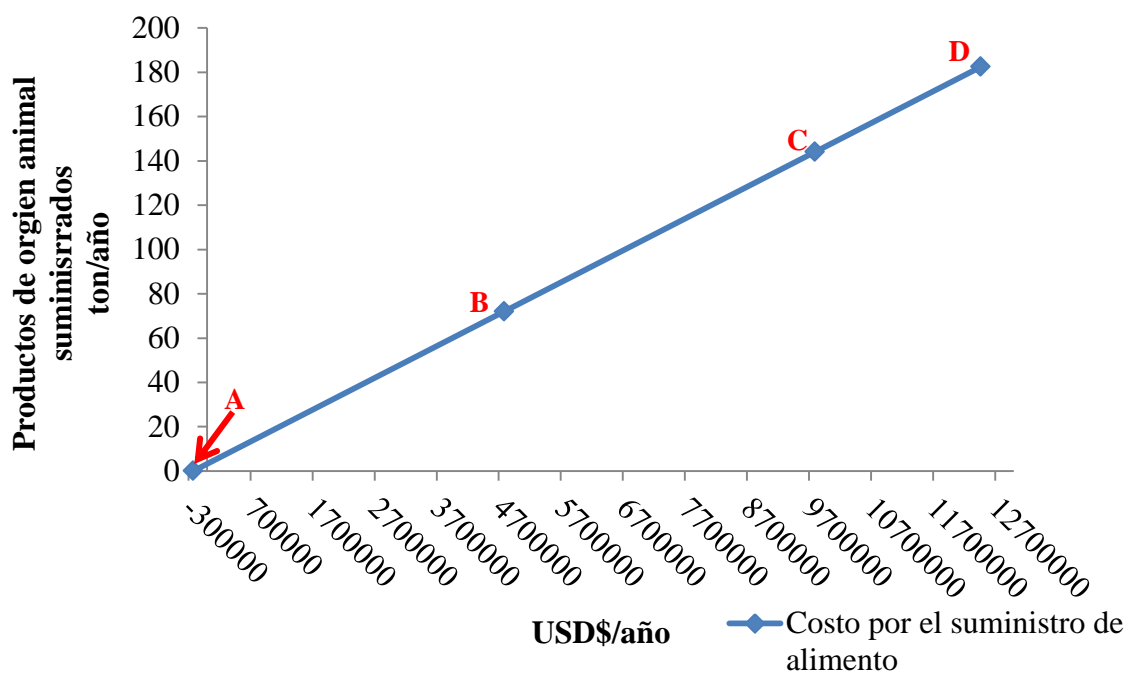


Figura 2.7. Efecto en los costos, según el suministro de productos de origen animal.

En primera instancia el objetivo se direcciona en minimizar el costo total anual (TAC), sin embargo al atender dicha acción, solamente los nutrientes de tipo vegetal son seleccionados como medida de alimentación, la cual no resulta una estrategia factible ya que no es posible convertir a toda una sociedad en vegana, además de que no se cumple con los planes de la norma. Por consiguiente, se agregó dentro de la misma programación una restricción que atienda por lo menos la cantidad mínima de productos de origen animal además de los de origen vegetal. Los resultados para cada escenario analizado se muestran en la **Figura 2.7**.

Escenario A Parar el escenario A se genera un TAC de USD\$-224,475, el signo negativo representa una ganancia generada anualmente, obtenido a partir del balance económico general (**Ecuación 41**). El balance global que muestra los nutrientes satisfechos y no satisfechos, se presentan en la **Tabla 2.7**, se puede observar que nueve de los 12 grupos nutricionales con sólo la producción de alimentos de origen vegetal son satisfechos en la totalidad de la demanda (lo valores con un signo negativo), e incluso excede las necesidades, estos excedentes en cada grupo son los que se pueden vender a compradores externos y así generar las ganancias mostradas por el TAC.

Sin embargo el grupo de colesterol, proteína animal y grasas vegetales no son satisfechos (valores de signo negativo), por lo que además del inconveniente de representar el cambio de costumbres a la sociedad a régimen vegetariano, este escenario no se considera como una alternativa factible incluso aunque se tenga una ganancia. Se podría considerar que con la ganancia comprar a productores externos y satisfacer las deficiencias, sin embargo el objetivo de este análisis es hacer a las comunidades auto-sostenibles, por lo que se considera el análisis de los siguientes escenarios, aunado a este Young y Dhanda (2013) reportan que a nivel mundial sólo el 7% de la comida consumida por las comunidades marginadas es comida local mientras que el 93% proviene de productores externos de zonas industriales, por lo que crear un ambiente auto sostenible se hace aún más atractivo. Dentro de este escenario, los transportes e intercambio entre un municipio y otro son desactivados ya que las distancias representan un costo elevado.

En la **Figura 2.8** se muestra una los porcentajes de cada producto vegetal anualmente, teniendo que en total se cosechan 4,058,958 toneladas por año, se observar que la mayor aportación la tiene la cebolla, avena, tomate rojo y maíz (casi un 60% del total de la producción).

Tabla 2.7. Demanda de nutrientes, y aportación generada por la producción escenario A (toneladas/año)

Concepto	Carbohidratos	Fibra	Grasa vegetal	Ácidos grasos poliinsaturados		Colesterol	Proteína vegetal	Proteína animal	Calcio	Grasa animal	Hierro	Magnesio
				(n-6)	(n-8)							
Demanda	12049	2729	2368	1097	113	12	3159	788	12	572	2,E-01	4
Aportación vegetal	2293853	127257	69427	29869	29869	8	152408	0	1538	0	75	2108
Aportación animal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Balance global	-2281804	-124529	-67059	-28772	-29756	<u>4</u>	-149249	<u>788</u>	-1526	<u>592</u>	-74	-2104

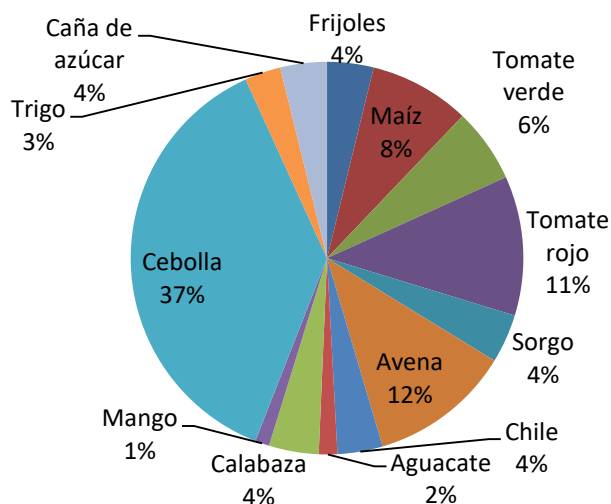


Figura 2.8. Distribución de productos vegetales

2.6.1 Escenarios B, C y D

Par los escenarios B, C y D, se considera la misma cantidad de productos de origen animal, más la restricción de toneladas de productos de origen animal mostradas en la **Figura 2.9**, para cada evaluación, con el objetivo de satisfacer los grupos nutricionales aun con demanda.

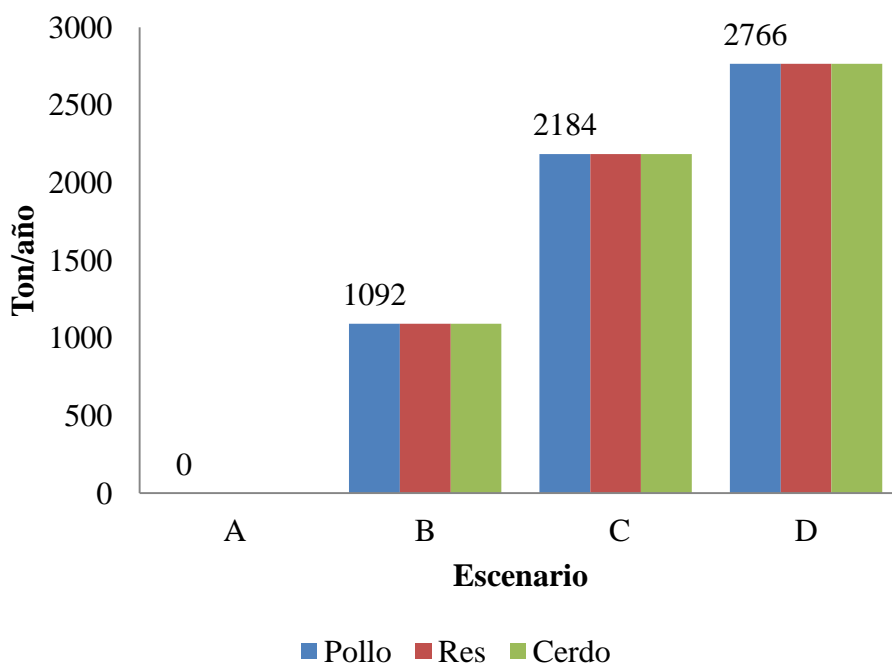


Figura 2.9. Cantidad de productos de origen animal suministrada

Los costos generados por el suministro de estas toneladas de cada producto de origen animal se muestran en la **Tabla 2.8**, los cuales son proporcionales a la cantidad de toneladas demandadas.

Tabla 2.8. Costo por el suministro de productos de origen vegetal (USD\$/año).

Producto	A	B	C	D
Pollo	0	2,511,600	5,023,200	6,362,720
Res	0	1,092,000	2,184,000	2,766,400
Cerdos	0	1,310,400	2,620,800	3,319,680

A partir de estas restricciones se obtuvieron los resultados mostrados en la **Tabla 2.8**, para el escenario B, los grupos de grasas y proteínas de origen animal aun no cumplen con la demanda necesaria.

Mientras que en los resultados para los escenarios C y D, todos los grupos nutricionales se satisfacen, sin embargo, para este caso la opción con mayor factibilidad es el escenario C, ya que el TAC del escenario C es menor en un 22% comparado con el escenario D, y 52% mayor que en el escenario B.

En la **Figura 2.10** se tiene la comparación entre los costos de producción de alimentos de origen animal y vegetal, se puede observar que a pesar de que la producción de vegetales es un monto de toneladas constante para todos los escenarios, para el escenario B representa el 97% de los costos de producción, mientras que para los escenarios C y D, es el 94% y 92% respectivamente. En todos los escenarios, el modelo considera el intercambio entre un municipio y otro, sin embargo para ningún caso estudiado este costo fue activado ya que las distancias representan un costo alto, aunado a que los mismos municipios considerados tienen la capacidad de satisfacer sus demandas de manera autosuficiente. Los diagramas de flujo de cada uno de los escenarios estudiados, se muestran en las **Figuras 2.11** y **2.12**, en las que $(RM_{r,m,t}^{vegetal})$ representa el flujo de productos de origen vegetal y $(NA_{n,m,t})$ el flujo de productos de origen animal generados y distribuidos en cada uno de los municipios seleccionados para la validación del modelo $(m1)$.

Tabla 2.9. Demanda satisfecha de nutrientes en los escenarios B, C y D (toneladas/año).

Tipo de nutriente		Carbohidratos	Fibra	Grasa vegetal	Ácidos grasos poliinsaturados		Colesterol	Proteína Vegetal	Proteína animal	Calcio	Grasa animal	Hierro	Magnesio
					(n-6)	(n-8)							
Demanda		12049	2729	2368	1097	113	12	3159	788	12	572	2,E-01	4
Balance global(Ton/año)	Escenario B	-2281870	-124529	-67059	-28772	-29756	-1	-149249	<u>325</u>	-1528	<u>423</u>	-74	-2104
	Escenario C	-2281937	-124529	-67059	-28772	-29756	-6	-149249	-138	-1530	-8	-75	-2105
	Escenario D	-2281972	-124529	-67059	-28772	-29756	-9	-149249	-385	-1531	-57	-75	-2105

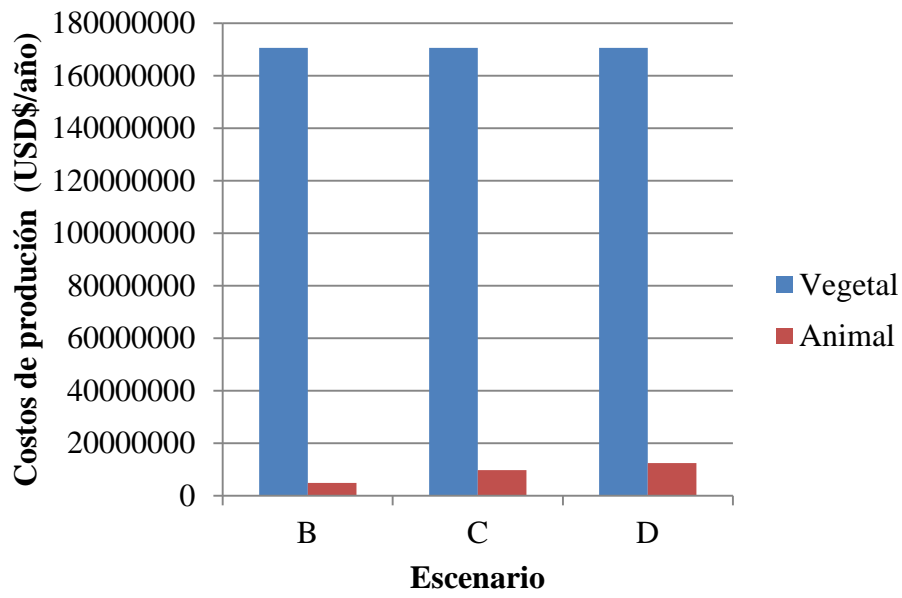


Figura 2.10. Costos de producción de alimentos vegetales y animal

Escenario A

$$RM_{r,m,t}^{vegetal} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$

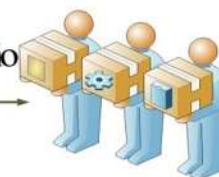


$$F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$



$$S_{r,m2,t}^{vegetable-stored} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$

$$F_{r,m2,t}^{vegetable-hub-sale} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$



$$TAC = \text{USD\$} - 2.2 \times 10^5$$

Escenario B

$$RM_{r,m,t}^{vegetal} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$



$$F_{r,m1,m2,t}^{vegetable-hub} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$

$$F_{pa,m1,m2,t}^{animal-product-hub} = 3276 \text{ ton/año}$$

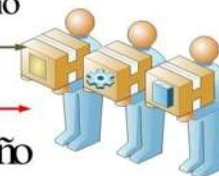
$$F_{pa,m1,t}^{animal-product} = 3276 \text{ ton/año}$$



$$S_{r,m2,t}^{vegetable-stored} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$

$$F_{r,m2,t}^{vegetable-hub-sale} = 4 \times 10^6 \text{ ton/año}$$

$$F_{pa,m2,t}^{animal-product-hub-sale} = 3276 \text{ ton/año}$$

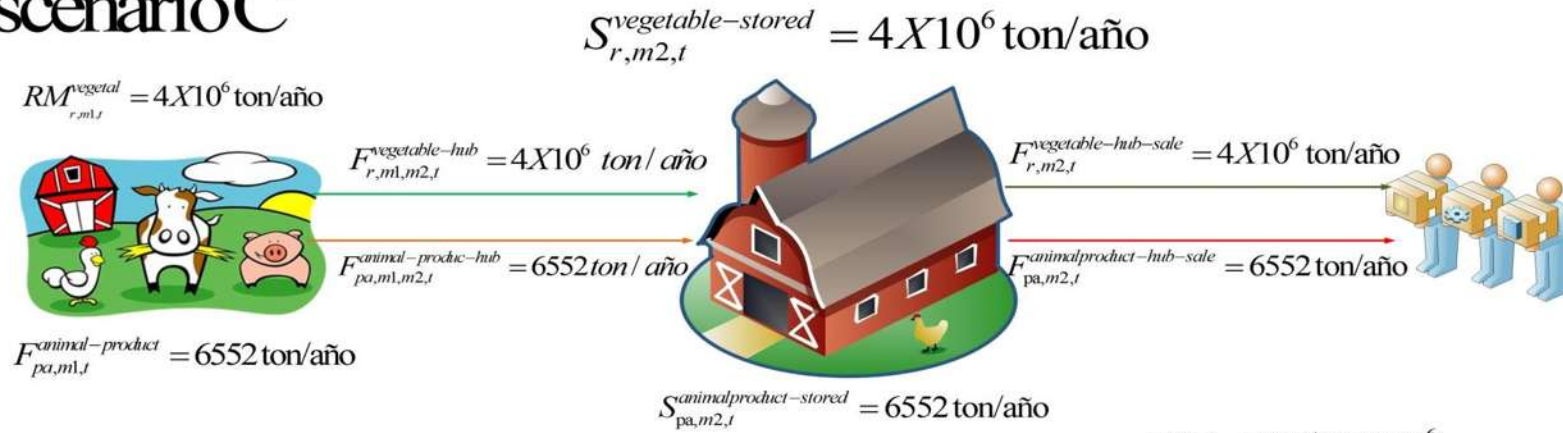


$$S_{pa,m2,t}^{animal-product-stored} = 3276 \text{ ton/año}$$

$$TAC = \text{USD\$} 4.7 \times 10^6$$

Figura 2.11. Diagrama de flujo para Escenarios A y B

Escenario C



Escenario D

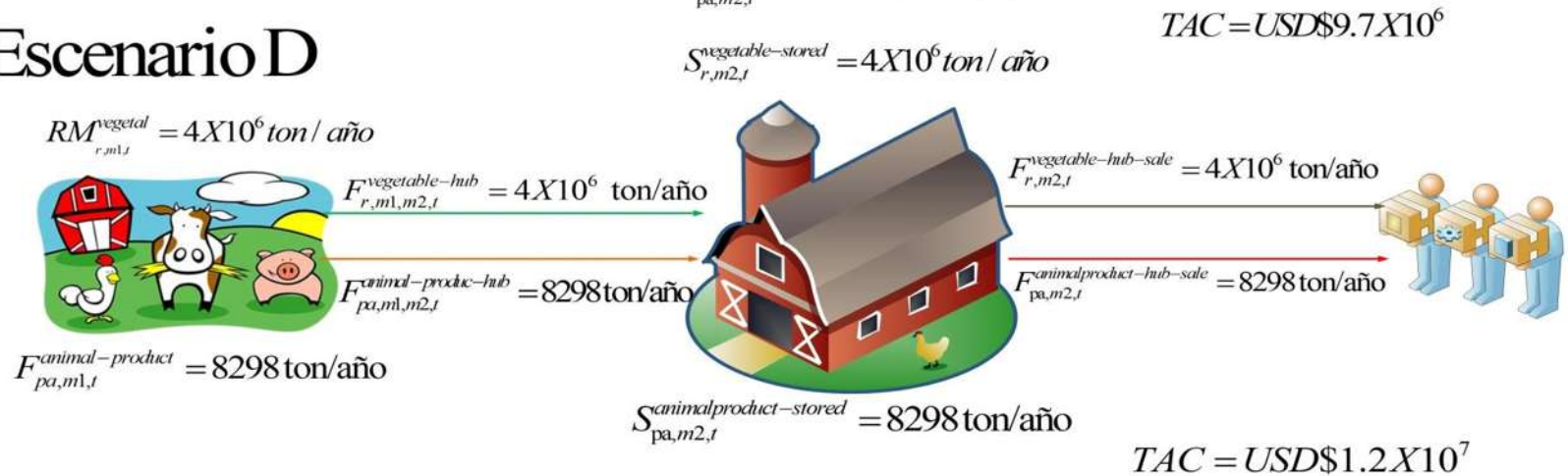


Figura 2.12. Diagrama de flujo para Escenarios C y D

2.7 Conclusiones parciales del Capítulo 2

En este Capítulo 2 se ha presentado una formulación de optimización para la planificación de la red alimentaria sostenible en zonas pobres. El modelo propuesto incorpora la idea de satisfacer las necesidades nutricionales en comunidades pobres a través del cultivo y distribución de sus propios recursos. El enfoque de optimización propuesto incorpora las principales tareas asociadas a la cadena de suministro de alimentos, considera las necesidades nutricionales que pueden satisfacerse a través de diferentes alimentos y también se han considerado los costos involucrados.

Se ha presentado un estudio de caso del Estado de Michoacán en México para aplicar el enfoque propuesto. Este estudio de caso es atractivo porque las regiones consideradas forman parte de la región más pobre de México, lo que conlleva deficiencias nutricionales para la población. Parámetros como producción de rendimiento y capacidad, dieta sana y nutritiva, eficiencia de los recursos y configuración del diseño fueron parte del modelo matemático para proporcionar una innovación en la optimización del suministro de alimentos a través de metodologías previamente utilizadas sólo para procesos industriales. Los resultados indican que es posible satisfacer las necesidades nutricionales de estas comunidades pobres con sus propios recursos, y también el comercio de sus productos puede ayudar a mejorar la economía de estas regiones, lo que puede ayudar a eliminar la dependencia de los programas sociales asistidos, y de esta manera mejorar la sostenibilidad de estas comunidades.

Capítulo 3

3. CASO DE ESTUDIO 2. OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE ALIMENTOS: UNA ESTRATEGIA DE REDUCCIÓN DE LA DESNUTRICIÓN A TRAVÉS DE MÚLTIPLES TOMADORES DE DECISIONES

3.1 PANORAMA GENERAL

Recientemente, Martínez-Guido *et al.* (2017) integró la planificación estratégica y la sostenibilidad a las redes alimentarias de las zonas desfavorecidas, considerando objetivos económicos y medioambientales. El modelo matemático propuesto incluyó los recursos locales de cada comunidad, las necesidades nutricionales específicas y el crecimiento económico, generando una estrategia confiable para satisfacer las necesidades nutricionales de las comunidades marginadas y al mismo tiempo mejorar la sostenibilidad y el crecimiento económico local. Sin embargo, la estrategia propuesta ataca el problema de manera global sin dar ninguna prioridad a ninguno de los municipios, por lo que puede que alguno de los seleccionados tenga mayores necesidades como puede ser mayor cantidad de población con pobreza o condiciones con índices más precarios. En este sentido, el uso de metodologías como múltiples tomadores de decisiones (MTD) pueden ayudar a encontrar el equilibrio ante este tipo de variedad en la demanda de nutrientes, influyendo significativamente en la planificación estratégica. Las redes de alimentos en las zonas desfavorecidas tienen factores que pueden ser resueltos con metodología de múltiples tomadores de decisiones, como pueden ser intereses específicos de cada municipio, tipos de recursos naturales, índice de desarrollo humano (IDH), actividades económicas, diversas necesidades nutricionales según la edad y el género, o la capacidad de producción de un producto específico.

En este contexto, Miranda-Ackerman *et al.* (2017) incorporaron un análisis ambiental en una optimización multi-objetivo para la cadena de zumo de naranja basada en la evaluación del ciclo de vida. Sus resultados mostraron que la mejora de la sostenibilidad en este proceso se basa en tres puntos principales: la inversión de capital (viabilidad económica), el costo operativo unitario y los precios de venta, y el potencial de calentamiento global. Sin embargo, para satisfacer todos los objetivos al mismo tiempo y por igual porcentaje de aceptación, es necesario aplicar un método de optimización MTD. Dowling *et al.* (2016) propusieron un marco multi-objetivo que utiliza el valor condicional en riesgo (CVaR), que equilibraba las prioridades de las partes

involucradas. La función CVaR reduce la insatisfacción utilizándola como variable aleatoria en la nueva optimización, obteniendo soluciones óptimas. Bajo el contexto de MTD, Banasik *et al.* (2017) optimizaron la cadena de suministro de champiñones, obteniendo soluciones compensadas que representan los objetivos económicos y ambientales utilizando el método de restricción épsilon (Ehrgott, 2005).

Vale la pena notar que a pesar de todos estos estudios sobre las cadenas de suministro de alimento, no se ha informado acerca de un enfoque de optimización para la planificación estratégica de las cadenas de suministro de alimentos en comunidades marginadas, teniendo en cuenta la sostenibilidad local y la participación de los interesados. Por lo tanto, en este capítulo se presenta un modelo de optimización para la planificación estratégica de las cadenas de suministro de alimentos para satisfacer las necesidades nutricionales de las comunidades marginadas, incorporando la compensación para la alimentación y los recursos locales de las comunidades con índices de IDH bajos. El modelo propuesto representa los objetivos particulares de todas las comunidades seleccionadas, modelado a través de una formulación de optimización MTD, que mejora el desarrollo de la economía local, sin afectar el medio ambiente, teniendo el gobierno la función de coordinar las actividades. Se presenta un caso de estudio de México, el cual involucra a 14 de municipios más pobres del estado de Michoacán. Las necesidades nutricionales de estas comunidades se tomaron de Bourges *et al.* (2009) y la Norma Oficial Mexicana 043 (2006).

3.2 PROBLEMA A RESOLVER

Para muchas familias en comunidades marginadas, alimentar a los niños es una lucha global, y México no es la excepción. De acuerdo con Shamah-Levy *et al.* (2017), el 45.2% de los mexicanos viven en la pobreza y más de la mitad tiene inseguridad alimentaria (debido a la cantidad o calidad), con estos números en 2016, México tuvo un 7.2 como puntaje del Índice de Hambre, con 4.3% de población desnutrida y 1.3% de la tasa de mortalidad de niños menores de cinco años (Índice Global del Hambre, 2016). En este contexto, el problema abordado se expresa de la siguiente manera: dado un conjunto de comunidades pobres, ubicadas en la misma localización geográfica, con población conocida y recursos propios (cultivo de tierra, agua, infraestructura, ganadería). El problema consiste en determinar la planificación óptima de la cadena de suministro de alimentos para satisfacer las necesidades nutricionales de la población en

los diferentes municipios, mejorar la economía local, minimizar el impacto ambiental y con el mínimo apoyo gubernamental. Para garantizar la aceptabilidad de la solución para todas las partes interesadas, la solución debe dar cuenta de todos los objetivos involucrados, incluida la seguridad alimentaria (Pérez-Escamilla *et al.*, 2017).

En la **Figura 3.1** puede observarse que entre un grupo de comunidades con menor índice de desarrollo humano podría haber un intercambio de productos animales y vegetales, los flujos (vegetales y animales) pueden enviarse de una Comunidad A a una Comunidad (B/C) o usado para satisfacer la demanda local, con el objetivo de satisfacer las necesidades alimentarias en un determinado período de tiempo en cada comunidad, mejorando así la economía y los aspectos sociales. Cabe destacar que en la **Figura 3.1** se hace referencia a la mejora social para reducir la desnutrición y aumentar el crecimiento económico en cada comunidad.

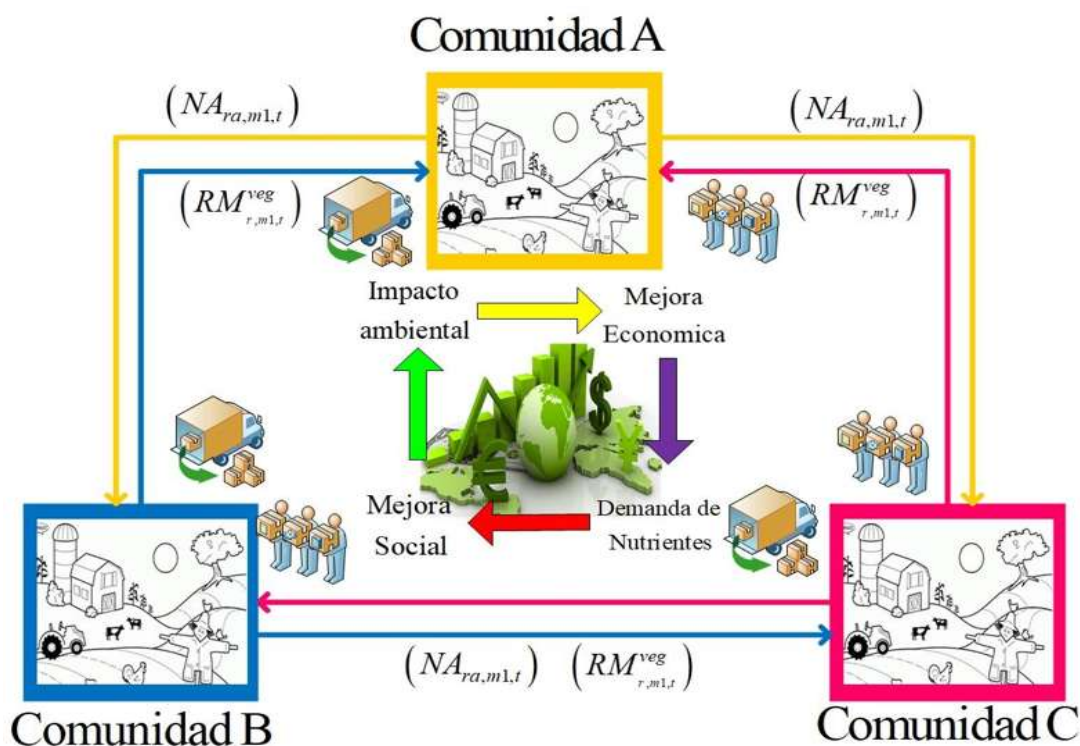


Figura 3.1. Descripción grafica del problema asociado

3.3 ESTRATEGIA USADA PARA RESOLVER LA PROBLEMÁTICA

La **Figura 3.2** muestra la superestructura propuesta para resolver el problema abordado. Los flujos y posibles configuraciones para la cadena de suministro de alimento en comunidades marginadas. Primero, hay dos opciones principales de productos alimenticios (vegetales y animales), ambos están ubicados en cada sitio de cosecha (considerando solo especies nativas), la producción está determinada por la demanda local y las demandas nutricionales externas. La razón para considerar solo especies nativas de cada sitio es evitar daños ambientales, promoviendo el intercambio entre todos los municipios involucrados. Los productos se pueden enviar directamente a los consumidores o a los almacenes, y luego a los consumidores. Los almacenes se utilizan para almacenar y procesar los alimentos (limpieza, transformación y envasado). La función de almacenamiento tiene una gran importancia porque a veces los alimentos se producen en un período de tiempo dado y es preferible consumirlos en un período de tiempo diferente o en otra comunidad. Cabe destacar que para este análisis se usó de la misma forma el modelo propuesto con anterioridad (Descrito en el Capítulo 2) pero la forma de dar solución fue por medio de la metodología MTD. Para ello se codificó en GAMS 24.9.2 64bit/MS Windows (Brooke *et al.*, 2017) como un modelo de programación lineal (LP). Con el objetivo de reducir el TAC y al mismo tiempo satisfacer la demanda de nutrientes de cada municipio individualmente, se genera un conflicto en los objetivos óptimos para todos los municipios, de esta forma fue necesario implementar un método que considerara todas las soluciones óptimas de Pareto y se genera un enfoque de suma ponderada de los objetivos individuales dados como resultado, como (Zavala *et al.*, 2012; Fuentes-Cortés *et al.*, 2016) se implementó el enfoque Utopía-tracking.

Para resolver este problema y satisfacer las relaciones entre todos los sitios seleccionados, primero se obtuvo la optimización única de minimización para la comunidad 1 ($M=1$), obteniéndose como resultado el valor de TAC límite inferior (TAC_{LB}) para el municipio M1, y el mismo enfoque se implementó para el resto de los municipios. Con este procedimiento, se generaron los límites inferiores para cada sitio, dando como resultado las coordenadas del punto de utopía. Simultáneamente, con la minimización TAC individual de cada municipio, también se

obtuvieron límites superiores (TAC_{UB}) para cada caso, que definen las coordenadas del punto nadir, esto significa que cuando el menor consolidado en el municipio 1 se obtuvo uno/s de los límites superiores del resto. Las coordenadas de utopía y nadir se usan para escalar la función objetivo global entre cero y uno. Luego, se determinó la solución de Pareto más cercana al punto de la utopía, resolviendo el siguiente problema (considerando todas las restricciones del Capítulo 2):

$$\min \left(\left| \frac{TAC - TAC_{LB}}{TAC_{UB} - TAC_{LB}} \right| \right) \quad \text{Ecuación 43}$$

Finalmente, para obtener soluciones compensadas adicionales, se puede usar un conjunto de ponderaciones para priorizar los diferentes objetivos.

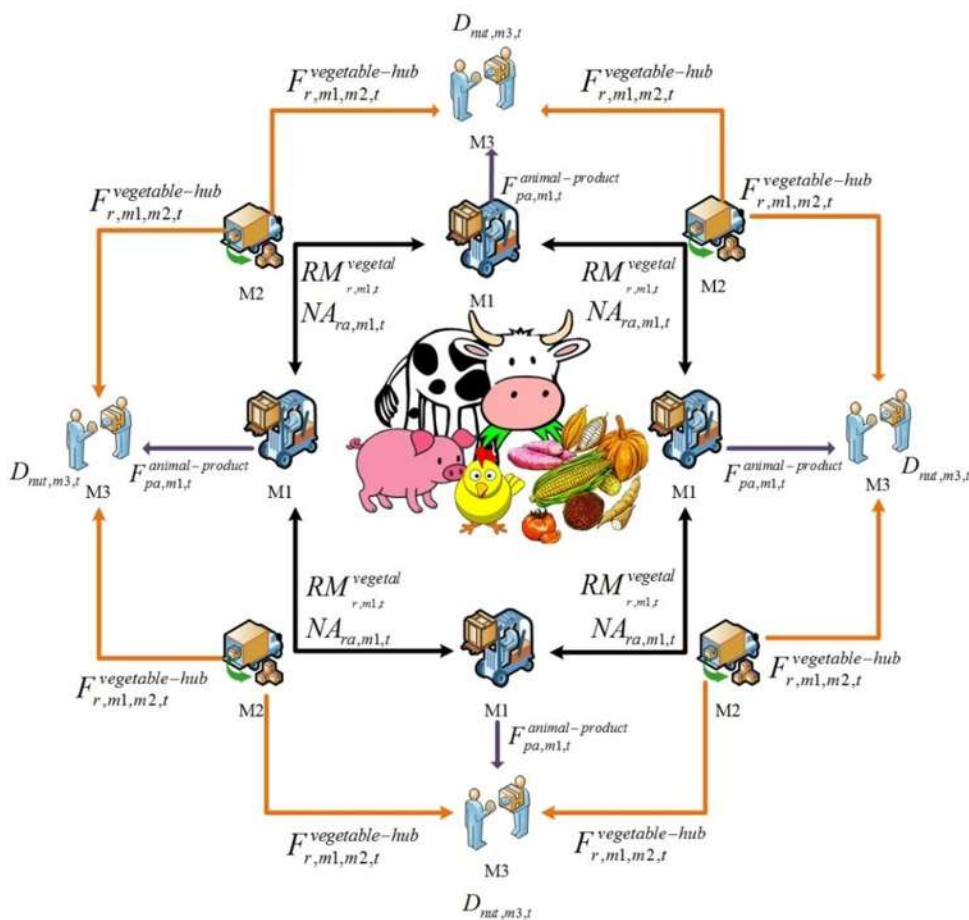


Figura 3.2. Superestructura propuesta.

3.3.1 Decisiones en el MTD

Los 14 municipios considerados tienen diferentes IDH, y el número de personas en extrema pobreza es diferente, como se muestra en la **Tabla 3.1**. De esta manera, estas diferencias pueden traducirse en necesidades de alimentos más bajas o más altas en cada sitio. Esto significa que los requisitos para satisfacer las necesidades alimentarias de 53.944 habitantes en Nocupétaro son diferentes de los necesarios para satisfacer las necesidades alimentarias de 3130 habitantes en Churintzio, incluso cuando su HDI difiere sólo en un 7%. Por lo tanto, se consideró un análisis MTD (Zavala y Flores-Tlacuahuac, 2012) para compensar estas diferencias. En este caso, el objetivo de utilizar un enfoque MTD es priorizar los municipios con necesidades más altas (IDH más bajos). Considerando este método alternativo, se realizó una tabla de distribución de frecuencia, teniendo en cuenta el número de personas en extrema pobreza como parámetro para crear los límites de cada grupo de priorización (**Tabla 3.2**). Del mismo modo, las variables estadísticas, como media y desviación estándar, se incluyeron en la distribución normal (**Figura 3.2**), la cual muestran de forma gráfica el rango de población en el que se incluyen todos los municipios seleccionados (mostrados por la línea negra), y su conexión con una distribución grupal basada en la cantidad de personas que viven en condiciones de pobreza. Estos grupos están representados por líneas de puntos, y cada uno se obtuvo a partir de la distribución normal. Atendiendo a la distribución mostrada en el orden de la **Figura 3.3**, se asignaron diferentes valores de priorización a cada grupo, respetando siempre que la suma de todos ellos fuera igual a 1. Los valores asignados fueron diferentes en cada ensayo para todos los grupos, generando como resultado los límites inferiores y superiores de TAC para cada caso. Posteriormente, se utilizó el enfoque de seguimiento de Utopía para obtener una compensación de la solución para los múltiples interesados considerados (Fuentes-Cortés *et al.*, 2016).

Tabla 3.1. Índice de Desarrollo Humano (HDI)

Municipio	Población (10e ⁴)	Pobreza extrema (%)	HDI
1. Nocupétaro	11.09	49	0.7188
2. Susupuato	8.87	48	0.7359
3. Tzitzio	8.37	45	0.7369
4. Tumbiscatío	5.33	40	0.7587
5. Tuzantla	5.01	39	0.7593
6. Churumuco	4.44	39	0.7613
7. Tiquicheo	3.96	38	0.7625
8. Turicato	3.07	37	0.7628
9. Nahuatzen	3.03	36	0.7651
10. Charapan	3.02	36	0.7651
11. Tangamandapio	2.52	23	0.7659
12. Tacámbaro	2.25	15	0.7670
13. Huaniqueo	0.95	14	0.7681
14. Churintzio	0.52	6	0.7682

Tabla 3.2. Intervalos de priorización

Número	Intervalos		Municipios incluidos
	Límite inferior	Límite superior	
1	A	A+0.65σ	Churintzio, Huaniqueo, Tacámbaro, Tangamandapio
2	A+0.65σ	A+1.17σ	Churumuco, Tiquicheo, Turicato, Nahuatzen, Charapan
3	A+1.17σ	A+1.69σ	Tumbiscatío, Tuzantla
4	A+1.69σ	A+2.22σ	Susupuato, Tzitzio
5	A+2.22σ	A+2.74σ	Nocupétaro
*A=5,200 (Valor inferior)			

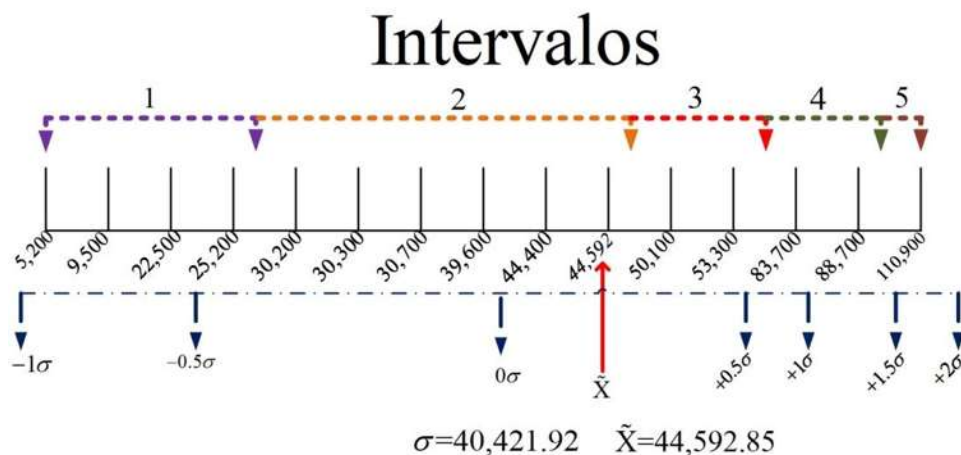


Figura 3.3. Diagrama de distribución.

En primera estancia, el modelo matemático se resolvió como un problema de objetivo único para encontrar los límites inferiores que logran la minimización de TAC, como una función objetivo única para cada comunidad considerada. Con todos los valores obtenidos, fue posible determinar las coordenadas de la solución de punto de utopía. Posteriormente, los límites superiores se obtuvieron de manera similar a partir de estas soluciones, y con esta información, se puede determinar el punto nadir. Posteriormente, todos los puntos de utopía y nadir se usaron para escalar la función objetivo que tiene sus puntos entre (0-1) tal como se representa en la **Ecuación 44**.

$$\text{Objective Function} = \min \{TAC\} \qquad \text{Ecuación 44}$$

3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La formulación de optimización propuesta se codificó en el software GAMS 24.9.2, esta incluye 169,967 restricciones y 650,461 variables continuas, con un tiempo promedio de ejecución de 2,78 segundos de CPU por ensayo (incluidas las soluciones de utopía, compromiso y nadir). Para cada prueba, se utilizó el solucionador CPLEX (Brooke *et al.*, 2017), todas las evaluaciones se

llevaron a cabo en un procesador Intel que funcionaba a 2,40 GHz y con 8 GB de RAM de memoria.

Todas las soluciones se obtuvieron con base en la Norma Oficial Mexicana-043 "NOM-043" (Secretaría de Salud de México, 2006) focalizadas en obtener soluciones para una dieta saludable y balanceada. Las soluciones de compromiso (CS) se evaluaron asignando diferentes valores de priorización a cada grupo (**Tabla 3.3**); sin embargo, todos los valores de respuesta del CS fueron cero, independientemente de que grupo recibió la mayor prioridad. Esto significa que la mayoría de las comunidades ($\min TAC_{G1,2,3,4,5}$) lograron su óptimo simultáneamente, por lo que todos los valores asociados obtenidos del modelo matemático no tienen ningún cambio. Por esta razón, la solución del diagrama de Pareto (**Figura 3.4**) solo tiene dos puntos, que corresponden a la solución óptima (A_1) y al análisis de múltiples partes interesadas (A_2) de la solución de compromiso. En este diagrama de Pareto, solo se incluyó la producción de vegetales porque la producción animal se consideró como un límite inferior para evitar producir solo vegetales.

Tabla 3.3. Grupos de prioridad considerados.

Grupo "Gn" (n=1-5)	Municipios
1	Churintzio, Huaniqueo, Tacámbaro, Tangamandapio
2	Churumuco, Tiquicheo, Turicato, Nahuatzen, Charapan
3	Tumbiscatío, Tuzantla
4	Susupuato, Tzitzio
5	Nocupétaro

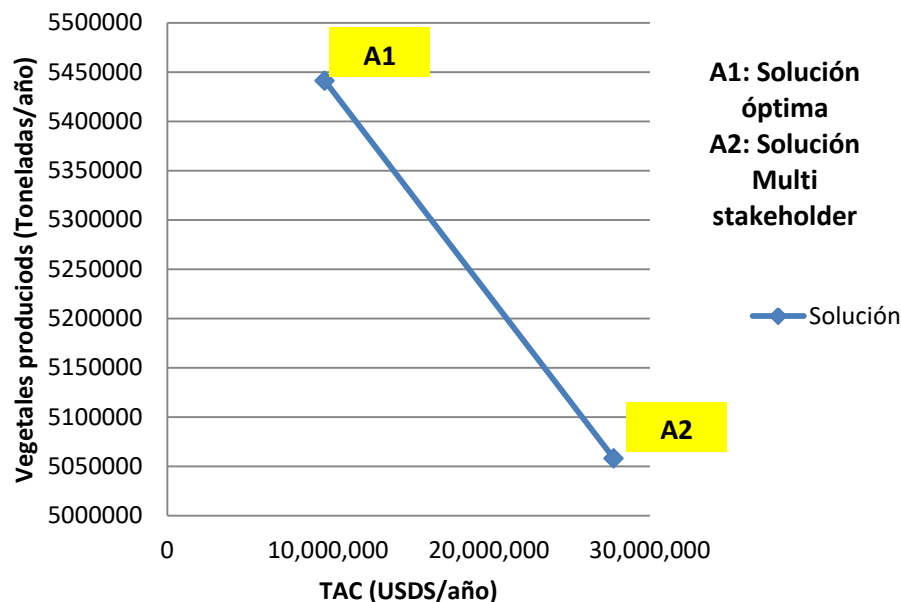


Figura 3.4. Soluciones Pareto.

La solución óptima (A1) genera un TAC de USD\$9,795,500 por año para satisfacer las demandas de alimentos de las comunidades consideradas (es decir, en los 14 municipios), y 5,440,900 toneladas/año de producción de vegetales, y se requieren 3 toneladas de productos animales por semana. Si bien, para la solución del punto (A2), el TAC es de USD \$ 27,748,959, necesitando una producción vegetal de 5,058,175 toneladas/año, y las mismas toneladas de productos animales del punto (A1). Si ambas soluciones se comparan en términos de TAC, esto significa que si dividimos el TAC obtenido de la solución de optimización (A1) por el TAC obtenido de la solución (A2), representa un 35% superior a la solución (A1). Sin embargo, la producción de hortalizas difiere en un 8%, siendo la solución (A1) con mayor cantidad de toneladas recolectadas; por lo tanto, la principal diferencia entre los puntos (A1) y (A2) está asociada a la venta de exceso de producción. Los costos de cosecha se muestran en la **Figura 3.5** para todas las hortalizas tomadas en cuenta. Tenga en cuenta que el producto con el mayor costo de producción es la caña de azúcar; sin embargo, este es el producto con la producción más alta en toneladas.

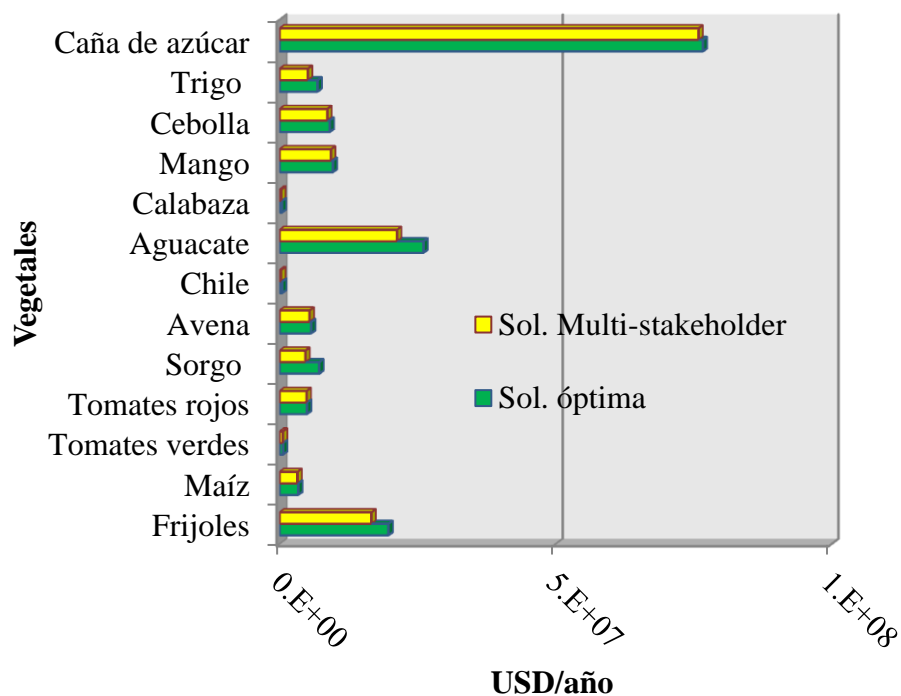


Figura 3.5. Costos de producción vegetal.

3.4.1 Productos de almacenamiento

El almacenamiento es otra actividad con un costo asociado. La **Tabla 3.4** muestra la reducción del costo de almacenamiento comparando los valores de las soluciones óptimas (A1) y de compromiso (A2), respectivamente. Solo la comunidad de Nocupétaro tuvo un incremento en el costo de almacenamiento (el único con valor negativo), esto es congruente con su IDH y el número de personas en extrema pobreza, ya que este municipio es el que tiene el IDH más bajo y el mayor número de personas en extrema pobreza, por lo tanto, esto implica mayores requerimientos de suministro de alimentos de otros municipios. Por otro lado, la reducción del costo de almacenamiento en el resto de los municipios puede interpretarse como un efecto opuesto; los municipios envían su producción de alimentos a otras comunidades que tienen mayores demandas de suministro de alimentos (como por ejemplo, Nocupétaro) en lugar de

almacenarla, promoviendo así el intercambio de productos alimenticios con otros municipios y evitando la implementación de programas de asistencia social.

Tabla 3.4. Costos por almacén

M2	(USD\$/año)		%
	(A ₁)	(A ₂)	Reducción de costos por almacén
1. Nocupétaro	1,359,370	3,347,981	-245.289
2. Susupuato	13,326,312	445,996	2.347
3. Tzitzio	26,824,775	79,032	0.705
4. Tumbiscatío	2,005,718	133,461	5.654
5. Tuzantla	3,419,962	9,369	0.726
6. Churumuco	531,857	66,610	11.524
7. Tiquicheo	1,429,010	34,189	1.393
8. Turicato	10,002,033	518,402	4.183
9. Nahuatzen	17,337,891	19,249	0.889
10. Charapan	1,803,999	52,539	1.912
11. Tangamandapio	1,973,149	37,587	0.905
12. Tacámbaro	37,336,335	130,093	0.652
13. Huaniqueo	8,629,610	115,202	0.335
14. Churintzio	954,973	288,384	29.198

3.4.2 Ventas

Las **Figuras 3.6** y **3.7** muestran las ventas locales (sitios de cultivo) y en los almacenes, respectivamente. Ambas soluciones tienen barras de fracción divididas en 13 colores diferentes. Cada color representa los valores de venta de cada tipo de producto vegetal [Frijoles, Maíz, Tomates verdes, Tomates rojos, Sorgo, Avena, Chile, Aguacate, Calabaza, Mango, Cebolla, Trigo, Caña de azúcar], seleccionados en función de la producción local de cada municipio y evitando la inclusión de productos no endémicos.

Cabe señalar que, en ambos casos, las ventas en solución son más bajas para todos los productos cosechados por encima del 50%, incluso algunos productos de algunos lugares no se venden a compradores externos; por ejemplo, en Nocupétaro, municipio (1), las ventas de frijoles en la solución MTD son cero. La disminución en las ventas se debe a dos razones: una relacionada con

el decremento en la producción de algunos vegetales, y el otro porque todos los productos cosechados no consumidos se intercambian con otros municipios. De esta manera, los ingresos obtenidos por las ventas en la solución óptima no son alcanzados por el análisis de MTD. Además de la reducción de las ventas, el intercambio de productos aumenta los costos de transporte en un 80%, proporcionando un incremento de TAC en la solución de MTD. Esto es, porque en la solución (A1) parte de los productos cosechados producidos por un municipio fue consumido por su población para satisfacer sus requerimientos, y el exceso se vendió a compradores externos, de esta manera no hay costos asociados al transporte. Sin embargo, en el análisis de la solución (A2), el objetivo principal fue la priorización de las necesidades del municipio en función del número de personas que viven en la pobreza, por lo que todo el exceso de producción en algunos municipios se envía a otros municipios con mayores necesidades alimentarias.

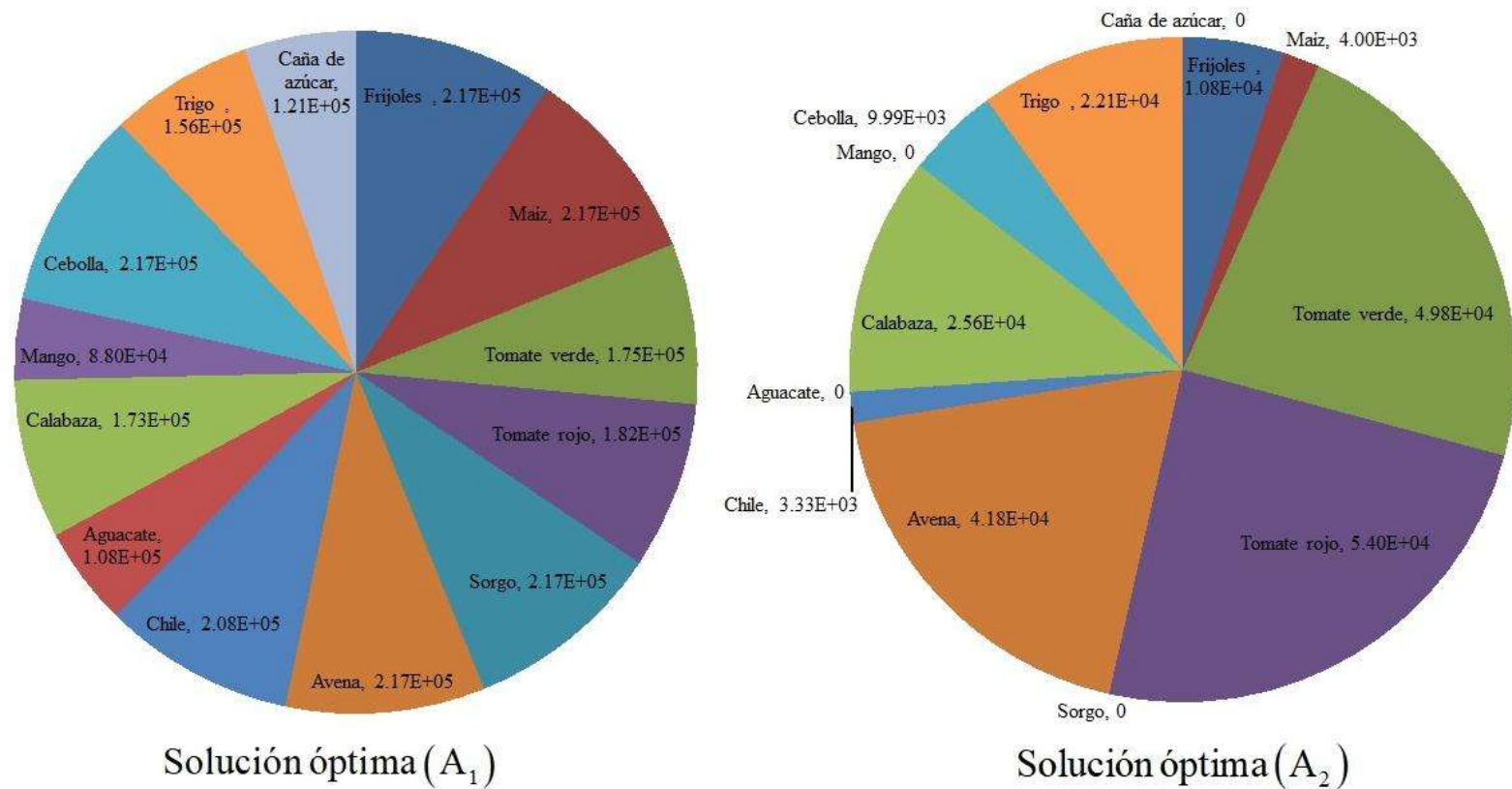


Figura 3.6. Ventas en los sitios de cultivo (toneladas/año).

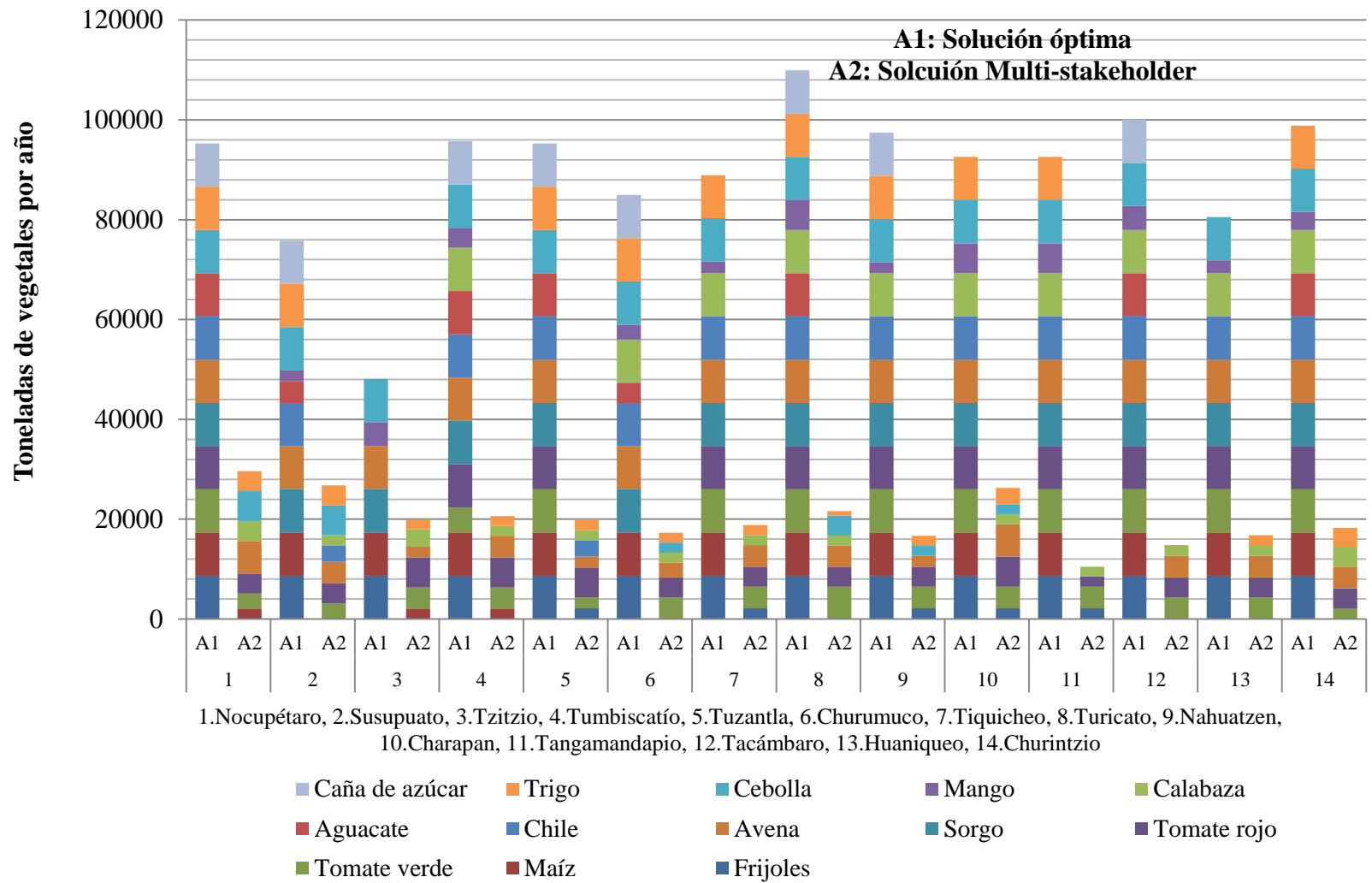


Figure 3.7. Ventas en los almacenes.

3.4.3 Intercambio de productivos

Los resultados para las interacciones de todos los municipios son proporcionados por la solución del modelo matemático; sin embargo, para evitar presentar los 14 diagramas, solo se presenta el diagrama para el municipio con la mayor integración con otros municipios. En este caso, este municipio corresponde a Tacámbaro y su diagrama se presenta en la **Figura 3.8** (M12). Se puede observar que 8 de cada 10 cultivos cosechados intercambian productos con el municipio Nocupétaro (M1); cada R_n representa un tipo de vegetal y su respectivo porcentaje intercambiado con otro municipio por toneladas de vegetales producidos. Vale la pena observar que se intercambian diferentes flujos de cada producto vegetal con los otros 13 municipios involucrados, esto significa que el exceso de producción (nutrientes) se envía para satisfacer los requisitos (equilibrar la dieta) del resto de los sitios, de acuerdo a la priorización de las necesidades alimentarias por parte de la solución MTD. Se observa que dado a que Tacámbaro es uno de los municipios con la mayor fertilidad de la tierra (debido a las condiciones climatológicas), algunas de las producciones totales de vegetales se envían a otros sitios, y esto significa que los nutrientes suministrados por este tipo de vegetales podrían ser obtenidos de otro. Comparando con la solución óptima, cualquiera de los municipios no tiene una interacción con los demás, por lo que se venden las producciones sobrantes, lo que ayuda a reducir el TAC.

Cabe señalar que cuando se involucran un análisis MTD, no es posible obtener una solución óptima factible que corresponda al óptimo para todas las partes interesadas. De esta forma, las soluciones compensadas ayudan a identificar soluciones factibles con diferentes prioridades para las partes interesadas involucradas y a identificar el nivel de insatisfacción (basado en las soluciones óptimas individuales).

La idea del modelo propuesto es que el uso de recursos propios para satisfacer las necesidades nutricionales ayuda a promover la creación de empleo, lo que mejora la economía local. Simultáneamente, la necesidad de apoyo gubernamental se reduce porque las comunidades pueden producir los alimentos necesarios. Finalmente, el impacto ambiental estuvo involucrado en el modelo al considerar solo especies nativas y evitar el cambio en el uso de la tierra.

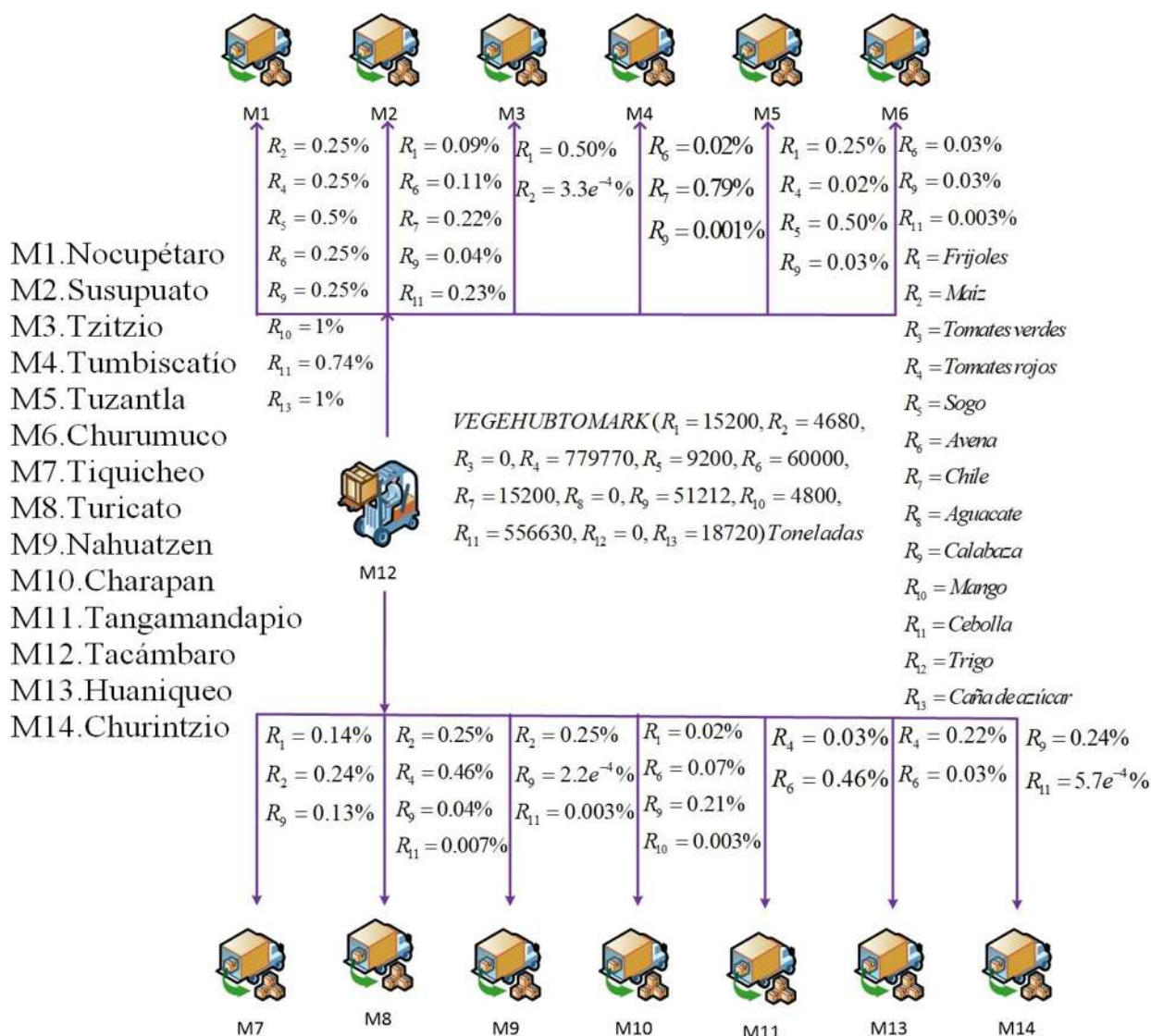


Figura 3.8. Diagrama de flujo para el municipio de Tacámbaro (12)

3.5 Conclusiones Parciales del Capítulo 3

Este capítulo ha presentado un enfoque de optimización para la cadena de suministro asociado a un programa de nutrición alimentaria para comunidades marginadas. El modelo propuesto explica las necesidades nutricionales de las comunidades más pobres, involucrando los recursos locales e incorporando la posibilidad de intercambiar los recursos entre las comunidades

involucradas. Para obtener soluciones de compensación, se consideró un enfoque de múltiples partes interesadas para la priorización de los objetivos particulares de todas las comunidades consideradas. El modelo presentado es un problema de programación lineal de enteros mixtos multiobjetivo, que ha sido codificado en el software GAMS 24.9.2.

Se ha considerado que un estudio de caso del estado mexicano de Michoacán muestra la aplicabilidad del enfoque propuesto. La selección de las comunidades a evaluar en este estudio se basó en el índice de desarrollo humano. Esta información se usó para priorizar los objetivos en el enfoque de múltiples partes interesadas. Los resultados muestran que es posible obtener soluciones que comprometan todos los objetivos para las diferentes comunidades consideradas que satisfacen las necesidades alimentarias de las personas con pobreza extrema. Además, el enfoque propuesto es general y esto se puede aplicar a otros estudios de casos.

Capítulo 4

Logros

alcanzados

A Multiobjective Optimization Approach for the Development of a Sustainable Supply Chain of a New Fixative in the Perfume Industry

Sergio I. Martínez-Guido,[†] J. Betzabe González-Campos,[‡] Rosa E. del Río,[‡] José M. Ponce-Ortega,^{*,†} Fabricio Nápoles-Rivera,[†] Medardo Serna-González,[†] and Mahmoud M. El-Halwagi^{§,||}

[†]Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio VI, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México 58060

[‡]Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio B1, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán, México 58030

[§]Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, United States

^{||}Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

ABSTRACT: *Ambrox* is an important fixative used in the manufacture of perfumes. It is obtained through complex chemical synthesis routes with high costs. Recent research efforts at the Institute of Chemical and Biological Researches at the Universidad Michoacana have led to the one-step synthesis of *Ambrox* from extracts of *Ageratina jocosotepecana* (an endemic plant of the State of Michoacán in Mexico). This new chemical route is attractive from a manufacturing perspective. However, there are several challenges for the industrial application of this plant and its incorporation in the supply chain of the perfume industry. This paper presents a multiobjective optimization approach for the development and assessment of the supply chain of *Ageratina jocosotepecana* to account for its growth in current and reclaimed lands, distribution, processing to yield *Ambrox*, and distribution of products. The approach accounts for the economic, environmental, and social aspects and establishes systematic trade-offs. A case study is solved to consider the supply chain and the trade-offs of the multiple objectives.

KEYWORDS: *Ambrox*, *Ageratina jocosotepecana*, Perfume industry, Optimization, Supply chain



INTRODUCTION

The three main components of a perfume are fragrant oils, fixatives, and solvents. A fixative is a material with low volatility that provides the long-term scent, aids in mixing with the other materials, and extends the shelf life of the perfume. The fixatives are typically expensive ingredients of the perfume.¹ A commonly used fixative is *Ambergris*, which is a waxy material produced in the digestive systems of certain whale species (*Physeter macrocephalus*). Because of the limited supply of *Ambergris* and its relatively high cost, synthetic alternatives have been considered. A particularly effective synthetic fixative substitute, is *Ambrox* ((-)-8 α -12-dihydroxy-13,14,15,16-tetranorlabdane).^{2,3} The chemical structure is shown in Figure 1.

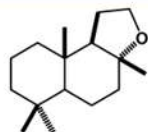


Figure 1. Chemical structure of *Ambrox*.

All the chemical routes reported to synthesize *Ambrox* involve several chemical steps having high processing costs, long reaction times, and severe processing conditions such as high pressure and temperature.^{1,4–7} These routes pose challenges for profitability and manufacturing safety. Recently, *Ageratina jocosotepecana*, an endemic plant of the State of Michoacán in Mexico, has been characterized to contain labdane diterpenes that are precursors of *Ambrox*.⁸ Furthermore, *A. jocosotepecana* extracts also contain (-)-8 α -12-dihydroxy-13,14,15,16-tetranorlabdane, which is a direct precursor for the synthesis of *Ambrox* because it requires only one reaction (chemical cyclization) to obtain *Ambrox* (Figure 2).⁹

The preparation of *Ambrox* by the chemical cyclization of (-)-8 α -12-dihydroxy-13,14,15,16-tetranorlabdane obtained from the stems of *A. jocosotepecana* offers several advantages over current chemical synthesis routes, reducing the synthesis to only one step under mild conditions and high conversion rates. Thus, it is important to determine, at least preliminary, if it has

Received: June 26, 2014

Revised: August 27, 2014

Published: September 2, 2014



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Life cycle assessment for Ambrox[®] production from different chemical routes



Sergio Iván Martínez-Guido^a, Debalina Sengupta^b, Fabricio Nápoles-Rivera^a,
J. Betzabe González-Campos^c, Rosa E. del Río^c, José María Ponce-Ortega^{a,*,}
Mahmoud M. El-Halwagi^{b, d}

^a Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^b Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3122, USA

^c Institute for Chemical and Biological Researches, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^d Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 March 2015

Received in revised form

2 October 2015

Accepted 13 November 2015

Available online 24 November 2015

Keywords:

Ambrox[®]

Environmental impact

Fixatives

Perfume industry

ABSTRACT

Industrial processes usually have significant environmental impacts due to the emissions associated with different production processes, resource depletion, and ecosystem alteration. Since these processes are designed to meet primarily economic aspects, there arises a need to balance with social and environmental issues. Strategies such as process integration and optimization have been used to reduce the overall environmental impact through recycle and reuse of materials or via the adoption of alternative manufacturing routes which may result in enhancing the economic and/or environmental objectives. Ambrox[®] is a high value chemical used in the perfume industry. The traditional chemical processing route represents significant environmental problems. In this paper, an economic and environmental evaluation of the chemical routes from *Sclareol* (the most common chemical route) and from *Ageratina jocotepecana* (an endemic plant from the State of Michoacán in Mexico) is analyzed to determine the feasibility of using the latter as an alternative for the production of Ambrox[®]. The results are analyzed using the Life Cycle Assessment method and show that the chemical pathway from *A. jocotepecana* offers environmental and economic advantages over the current process.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Fixatives are among the most important chemicals used in the perfume industry. These are intended to offer stable and long-term effects for the perfumes. In some cases, fixatives are used in ratios of nine parts of fixative to one part of essence. Because of its attractive properties, Ambrox[®] containing the compound Ambergris has been used as a key fixative in the perfume industry. Traditionally, Ambergris was obtained from intestinal excretion of sperm whales (Frater et al., 1998). More recently, alternative chemical routes have been investigated because of the animal rights issues associated with obtaining the chemical from whales (Costa et al., 2005). Until recently, the most common chemical route involved *Sclareol*, a compound obtained from the *Salvia sclarea* (SS)

which is an herbaceous plant. This synthetic process includes 34–42 chemical stages (Barrero et al., 1993). Recently, a new chemical route from *Ageratina jocotepecana* (AJ), an endemic plant from the State of Michoacán in Mexico, has been proposed (Gutiérrez-Pérez et al., 2012). This route reduces the chemical stages to only one chemical cyclization under mild conditions. Having only one chemical cyclization offers several technological advantages such as reducing the number of required equipment, the land occupation by the process plant, manpower, residues and energy use. Theoretically, all these aspects should yield a more sustainable process from the economic, environmental and safety points of view. Given the process simplification advantage of the AJ route, it is important to explore and quantify the economic and environmental performance of this route compared to the SS route. It is also necessary to consider the chemical synthesis pathway in the overall context of a supply chain. Recent research has highlighted the important economic and environmental implications of considering a chemical pathway in the context of its supply chain

* Corresponding author. Tel.: +52 443 3223500x1277.
E-mail address: jmponce@umich.mx (J.M. Ponce-Ortega).

Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery

Sergio I. Martínez-Guido¹ · J. Betzabe González-Campos² · José M. Ponce-Ortega¹ · Fabricio Nápoles-Rivera¹ · Mahmoud M. El-Halwagi^{3,4}

Received: 19 May 2015 / Accepted: 11 September 2015 / Published online: 21 September 2015
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

Abstract The sugar cane production is one of the main economic activities of the agriculture sector in several places around the world. Nowadays, the sugarcane production zones face different technologic, economic, and social problems that impact negatively their profitability. The low price of sugar in the market demands the search of alternatives; being the bioethanol production from residues of the sugar cane industry an attractive option. This way, this paper presents a new approach for using the residues from the sugar cane industry to yield a sustainable biorefinery. In this approach, process integration techniques have been implemented to optimize the overall process. A case study from the State of Michoacán in Mexico is presented, where the proposed approach shows significant economic, environmental, and social benefits.

Keywords Supply chain · Sugar cane · Bioethanol · Optimization · Biorefineries

Introduction

The climate change has yield significant environmental problems, which mainly have been caused by the high energy consumption from fossil fuels (MäKinen and Lep-pälahti 2009). This way, sustainable energies have been proposed to mitigate the effects of climate change (Sun et al. 2013), and energy from biomass (i.e., biofuels; see Brondani et al. 2014) appears as an attractive option (Cucek et al. 2012); therefore, there has been increased the interest in the identification of cost-effective, clean, and renewable sources of energy (González-Delgado et al. 2015). Bioethanol (used instead of gasoline) has proved to be an attractive option technically (Najafi et al. 2009) and environmentally (Goldemberg et al. 2008). One of the major issues for the biofuels is the biomass availability and the resources used for their production, including water, land, and nutrients (Balat et al. 2008). Therefore, the concept of integrated biorefinery has gain a lot of attention (Chouinard-Dessault et al. 2011), where the main feedstock corresponds to residues (Ponce-Ortega et al. 2012); this is biomass that has been previously processed in other processes and that can be used as raw material to yield biofuels. In this context, Murillo-Alvarado et al. (2014) presented an optimization framework for designing a bioethanol supply chain using the residues of *Agave* as feedstock. Santibañez-Aguilar et al. (2013) proposed a mathematical programming formulation for synthesizing distributed biorefinery networks using water hyacinth as feedstock. In the same way, various investigations have focused on the evaluation of the biotechnological potential

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.1007/s10098-015-1039-1) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ José M. Ponce-Ortega
jmponce@umich.mx

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio V1, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Michoacán, Mexico

² Institute for Chemical and Biological Researches, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio B1, Ciudad Universitaria, 58030 Morelia, Michoacán, Mexico

³ Chemical Engineering Department, Texas A&M University, College Station, TX 77843, USA

⁴ Adjunct Faculty at the Chemical and Materials Engineering Department, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

Sustainable Optimization of Food Networks in Disenfranchised Communities

Sergio Iván Martínez-Guido,[†] J. Betzabe González-Campos,[‡] Mahmoud M. El-Halwagi,^{§,||} and José María Ponce-Ortega^{*,†,||}[†]Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mujica, S/N, Ciudad Universitaria, Edificio V1, Morelia, Michoacán 58060, México[‡]Institute for Chemical and Biological Researches, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mujica S/N, Ciudad Universitaria, Edificio B1, Morelia, Michoacán 58060, México[§]Chemical Engineering Department, Texas A&M University, 0386 Spence Street, College Station, Texas 77843, United States^{||}Department of Chemical and Materials Engineering, Faculty of Engineering, King Abdulaziz University, P.O. Box 80204, Jeddah 21589, Saudi Arabia

ABSTRACT: With the growing concerns about food security around the world, there is a need to develop sustainable strategies and proactive measures especially in developing countries with disenfranchised communities. These strategies must account for the specific nature and resources of each community and should be integrated with the need for economic growth. This work presents a conceptual framework and a mathematical programming model for the strategic planning of a sustainable food assistance program to satisfy the nutritional needs of disenfranchised communities while taking into account the objective of economic growth and the constraints of local resources. A case study from Mexico is presented as an example of applying the proposed approach. Fourteen municipalities with the lowest human development index are considered. The results show that it is possible to satisfy the nutritional needs while simultaneously improving the local economy of these disenfranchised communities.

KEYWORDS: Suitable nutrition, Social development, Food networks, Strategic planning



INTRODUCTION

The deficiency in providing sufficient needs of nutrients for impoverished communities is a problem that is closely related to food supply security and economic disenfranchisement. Around the world, 159 million children under the age of five suffer from nutritional stunting, whereas 50 million children of the same age group have low weight compared to their normal-weight counterparts.¹ In 2016, the Food and Agriculture Organization reported that 795 million people worldwide are undernourished and 98% of them are in developing regions (see Figure 1 for regional distribution). Therefore, governments around the world have applied actions to mitigate this problem by mainly focusing on food aid, subsidy and assistance

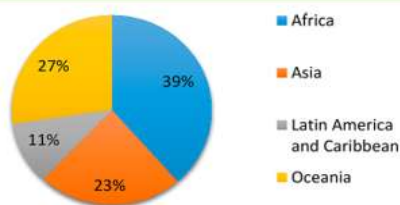


Figure 1. Undernourishment distribution in developing regions.

programs. Several concerns have been raised with respect to the sustainability of these programs and their effectiveness in addressing the more underlying problem of the lack of economic growth and reliable food supply.

The food supply problem must be analyzed taking into account all the steps involved in the supply chain while focusing on economic, social, political and environmental benefits. Consideration should also be given to community development, local resources, supply and demand, food production and distribution centers.² Additionally, the quality, safety, health and nutritional aspects in diets should be addressed³ while creating a symbiosis network between the demand and sustainable production and distribution of food.⁴ The analogy between food supply chains and industrial supply chains offers valuable lessons and efficient tools. The supply chains of different industrial processes have been analyzed through various optimization models addressing a broad range of case studies. For example, Guillén-Gosálbez and Grossmann⁵ proposed a global optimization approach for the environmentally conscious design of chemical supply chains. These

Received: May 29, 2017

Revised: August 15, 2017

Published: August 16, 2017



RESEARCH PAPER

Environmental, Technical, and Economic Evaluation of a New Treatment for Wastewater from Slaughterhouses

Claudia Palomares-Rodríguez¹ · Sergio Iván Martínez-Guido¹ · José Apolinar-Cortés¹ · Ma del Carmen Chávez-Parga¹ · Carmen Cecilia García-Castillo² · José María Ponce-Ortega¹

Received: 21 February 2017 / Revised: 24 July 2017 / Accepted: 4 September 2017
© University of Tehran 2017

Abstract The wastewater treatment has a fundamental role for all the industrial processes, being a crucial part in the water cycle. The meat industry around the world has severe problems associated with the huge freshwater requirements that increase with the population growth. However, nowadays, the most used slaughterhouse wastewater treatment (SWWT) system has negative environment impacts. Hence, the inclusion of the life cycle assessment method, as decision technique in the design and configuration of the treatment train for these industries, results in an attractive innovation. Particularly for the SWWT, the aerobic process is the most used approach; however, its high-energy requirements increase significantly the associated total cost. On the other hand, the upflow anaerobic sludge blanket process has been reported as an attractive treatment, but this needs a secondary treatment for achieving the environmental regulations for some pollutants. Therefore, this paper presents a techno-economic–environmental–social evaluation as a sustainable alternative in wastewater treatment train configuration based on the obtained results of the Trail and Refrigerator of the city of Morelia in Mexico. The results show that with the new configuration, the energetic requirement is reduced by 76%; thus,

the operational cost is minimized in the same way, while the environmental impact is reduced by 30% with the integration of anaerobic and aerobic processes.

Keywords Slaughterhouses wastewater · Treatment train · Environmental impact · Life cycle assessment · Aerobic process · Anaerobic process

Abbreviations

SWWT	Slaughterhouse wastewater treatment
LCA	Life cycle assessment
UASB	Upflow anaerobic sludge blanket
WWS	Slaughterhouse wastewater
MPN	Most probable number
BOD	Biochemical oxygen demand
COD	Chemical oxygen demand
TN	Total nitrogen
TP	Total phosphorous
FOG	Fats, oils, and greases
TSS	Total suspended solids
TDS	Total dissolved solids
EIA	Environmental impact analysis
EIAP	Aerobic process environmental impact analysis
EIANP	Anaerobic process environmental impact analysis
EIA-WW	Untreatment wastewater discharge environmental impact analysis

Electronic supplementary material The online version of this article (doi:10.1007/s41742-017-0047-x) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Sergio Iván Martínez-Guido
micq_guido1989@outlook.com

¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio V1, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Michoacán, Mexico

² Basic Science Department, Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, Carretera Morelia Salamanca Kilómetro 6.5, Los Ángeles, 58100 Morelia, Michoacán, Mexico

Introduction

The water-energy nexus is a very important issue when analyzed the wastewater treatment train performance in developing economies due to the supply, consumption,



A Multi-Stakeholder Optimization of Food Supply Chains: an Undernourishment Reduction Strategy

Sergio Iván Martínez-Guido¹ · J. Betzabe González-Campos² · José María Ponce-Ortega¹

Received: 8 December 2017 / Revised: 13 March 2018 / Accepted: 14 March 2018
 © Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018

Abstract

Food supply has become one of the most important problems and challenges that the world faces nowadays due to the tremendous population growth and resource depletion around the world. In developing countries, where this problem is more noticeable, governments have implemented assistance programs to ensure food supply to disenfranchised people. However, these programs do not guarantee individual food security; besides, the local economic development is not promoted. In this paper, an optimization formulation for the strategic planning of food supply networks in disenfranchised communities is proposed, which includes the use and exchange of local resources between different communities to improve the local economy and satisfy specific nutritional needs according to age and gender, taking into account that the government should coordinate these activities. Since the strategic planning involves multiple interests and priorities, a multi-stakeholder optimization formulation to get trade-off solutions, useful for decision makers, is considered. A case study from Mexico involving 14 of the poorest communities from the State of Michoacán is presented. The results indicate that it is possible to meet nutritional needs of all the considered communities using the local resources and enhancing the local economy, avoiding this way government dependence. An initial inversion of MMUS\$27.7 to supply 5×10^6 t of vegetable products and 6552 t of animal food is needed.

Keywords Nourished health · Food supply chain · Multi-stakeholder optimization · Social development

Nomenclature Index

- L* Type of processed food (1 = cheese, 2 = bred, 3 = chicken meat, 4 = beef, 5 = pork meat, 6 = ham, 7 = milk, 8 = protein, 9 = tortillas, 10 = sugar)
- Nut* Nutrient package (oils, fruits, vegetables, dairy products, beans and meat)
- Pa* Type of animal product (1 = meat, 2 = milk, 3 = eggs)
- R* Type of raw material (1 = beans, 2 = corn, 3 = green tomato, 4 = red tomato, 5 = sorghum, 6 = oats, 7 = chili, 8 = avocado, 9 = pumpkin, 10 = mango, 11 = onion, 12 = wheat and 13 = sugar cane)
- Ra* Type of animal (1 = chicken, 2 = caw, 3 = pig)

T Period of time considered, one period takes 1 week (periods 1–52)

Variables

- $A_{r,m,t}^{used}$ Land used for agriculture (km²)
- $A_{r,m,t}^{new}$ New area designated to cultivation (km²)
- $A_{ra,m,t}^{used-animal-food}$ Area used for animal feed (km²)
- $A_{ra,m,t}^{usedfood}$ Tonnes of animal food used to feed (tonnes)
- $A_{ra,m,t}^{cultivatedfood}$ Tonnes of animal food cultivated, residues from the crops (tonnes)
- $A_{ra,m,t}^{purchasedfood}$ Tonnes of animal food purchased from other sites (tonnes)
- $A_{ra,m,t}^{cultivatedfood-animal}$ Amount of cultivated animal food (tonnes)
- $A_{ra,m,t}^{purchased-animal-food}$ Amount of purchased animal food (tonnes)
- $C_{ra,m,t}^{animal-purchase}$ Generated cost by the animal purchase (USD\$)
- $C_{r,m,t}^{vegetable-production}$ Total production cost of the vegetal raw material (USD\$)

✉ José María Ponce-Ortega
 jmponce@umich.mx

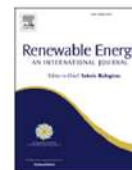
¹ Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58060 Morelia, Michoacán, Mexico

² Institute for Chemical and Biological Researches, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58060 Morelia, Michoacán, Mexico



Contents lists available at ScienceDirect

Renewable Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/renene

Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants



Sergio Iván Martínez-Guido^a, Inés María Ríos-Badrán^b, Claudia Gutiérrez-Antonio^b, José María Ponce-Ortega^{a,*}

^a Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58060, Mexico

^b Faculty of Chemistry, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro 76010, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 January 2018
 Received in revised form
 15 April 2018
 Accepted 20 June 2018
 Available online 26 June 2018

Keywords:

Biomass residues
 Pellets
 Power plants
 Supply chain optimization

ABSTRACT

The environment depletion caused by the intensive use of fossil fuels to produce electricity to satisfy the increasing demands has motivated the searching of alternative energy sources. In this context, residual biomass from different crops has been considered as alternative. However, there are significant issues associated to this energy source, which are mainly related to the low density and high transportation costs. Therefore, in this paper is presented an optimization approach for the strategic planning for the use of waste biomass pellets in power plants for electric energy production. The proposed approach considers all the activities included in the supply chain since the collection of residues until the combustion of pellets in power plants. Particularly, the location and design of the pelleting plants in a macroscopic region, as well as the selection of biomass and transportation routes are considered to satisfy the needs of the power plants at the minimum cost and minimum environmental impact. A case study for the national case of Mexico is presented, where the results show that is possible to satisfy 50% of the national demand of the power plants through the use of residual biomass, and simultaneously the associated CO₂ emissions can be reduced 25%.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Nowadays, 81.7% of world energy demand is satisfied through the combustion of petroleum, coal and natural gas [1]; however, in the energy production process pollutants are also generated (i.e., NO_x, SO₂, particular matter (PM) and CO₂), which impact drastically the environment [2]. These contamination problems along with an insufficient nonrenewable energy source [3] are critical points that need to be taken into account in order to satisfy the increasing energy demands around the world [4]. In the last decades, the reduction of greenhouse gas emissions has been the priority in government policies [5] to mitigate the problems associated to the climate change [6]; therefore, some of the main issues that need to be considered include the diminishing of oil reserves, the mitigating of climate change, the fluctuation and increase of fuel prices, and to guarantee the energy security [7]. Thus, the use of alternative energy sources such as solar, wind, geothermal, tidal and

biomass has been analyzed. Among these sources, biomass is a renewable energy resource that can be used as fuel to provide heat and electricity [8], this form of organic matter can be obtained from residues of animals and plants (including agricultural and municipal residues) [9]. Approximately, 1.3 billion kg per year of biomass residues from different food crops are generated in the world, and usually these are discarded forgetting their heat and power value-added [10]; therefore, providing efficient and adequate strategies for the use of biomass in a sustainable and efficient way is necessary to satisfy the energy needs and helping in mitigation of pollution problems [11]. In this way, process systems engineering has emerged as a tool to achieve economic and environmental analysis [12].

Recently, the use of biomass as energy source in power plants has been considered [13]. An important issue related to biomass use in power plants is the associated logistic for transportation and storage [14]. Other important point is associated to feedstock selection [15]. For instance, Hiloidhari et al. [16] developed an analysis of bioenergy obtained from 39 residues from 26 crops to satisfy the energy demand in 28 states of India, the results showed that wastes from sugar cane, wheat and cotton can be used to satisfy the

* Corresponding author.

E-mail address: jmponce@umich.mx (J.M. Ponce-Ortega).

Capítulo 5

5. Referencias

- Accorsi R.; Cholette S.; Manzini R.; Pini C.; Penazzi S. (2016) The land-network problem: ecosystem carbon balance in planning sustainable agro-food supply chains. *J. Cleaner Prod.* 112(1): 158-171.
- Arredondo-Ramírez K.; Ponce-Ortega J. M.; El-Halwagi M. M. (2016) Optimal planning and infrastructure development for shale gas production. *Energ. Conversi. Manage.* 2016, 119(1): 91-100.
- Bala B. K.; Alias E. F.; Arshad F. M.; Noh K. M.; Hadi A. H. A. (2014) Modelling of food security in Malaysia. *Simulat. Model. Prac. Theo.* 47(1): 152-164.
- Banasik A.; Kanellopoulos A.; Claassen G. D. H.; Bloemhof-Ruwaard J. M.; Van der Vorst J. G. A. J. (2017) Closing loops in agricultural supply chains using multi-objective optimization: A case study of an industrial mushroom supply chain. *International Journal of Production Economics.* 183(1): 409-420.
- Beitzen-Heineke E. F.; Balta-Ozkan N.; Reefke H. (2017) The prospects of zero-packaging grocery stores to improve the social and environmental impacts of the food supply chain. *J. Cleaner Prod.* 140(1): 1528-1541.
- Bortolini M.; Faccio M.; Ferrari E.; Gamberi M.; Pilati F. (2016) Fresh food sustainable distribution: cost, delivery, time and carbon footprint three-objective optimization. *J. Food Eng.* 174(1): 56-67.
- Bourges H.; Casanueva E.; Rosado J. L. (2009) Intake recommendations for the Mexican population, *Medica Panamericana*, Mexico City, Mexico.
- Bowling I. M.; Ponce-Ortega J. M.; El-Halwagi M. M. (2011) Facility location and supply chain optimization for a biorefinery. *Ind. Eng. Chem. Res.* 50(10): 6276-62-86.
- Brooke A.; Kendrick D.; Meeruas A.; Raman R. (2017) *GAMS-Language guide*, GAMS Development Corp: Washington DC, USA.
- Catalá L. P.; Moreno S.; Blanco A. M.; Bandoni A. (2016) A bi-objective optimization model for tactical planning in the pome fruit industry supply chain. *Comput. Electronics Agri.* 130(1): 128-141.

- Dowling A. W.; Ruiz-Mercado G.; Zavala V. M. (2016) A framework for multi-stakeholder decision-making and conflict resolution. *Computers and Chemical Engineering*. 90(1): 136-150.
- Ehrgott M. (2005) *Multicriteria optimization*, Springer. Berlin Heidelberg, New York, USA.
- El-Halwagi A. M.; Rosas C.; Ponce-Ortega J. M.; Jiménez-Gutiérrez A.; Mannan M. S.; El-Halwagi M. M. (2013) Multi-objective optimization of biorefineries with economic and safety objectives. *AIChE J.* 2013, 59(7): 2427–2434.
- El-Halwagi M. M. (2017) A return on investment metric for incorporating sustainability in process integration and improvement projects. *Clean Technol. Environ. Policy*. 19: 611-617
- El-Halwagi M.M. (2017) A shortcut approach to the multi-scale atomic targeting and design of C-H-O symbiosis networks. *Process Int. Opt. Sust.* 1: 3.-11.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2016) FAO calls on governments to take concrete action on malnutrition, in all its forms. Available on: <http://www.fao.org/news/story/en/item/434440/icode/> (Accessed May 2017)
- FND “National Financing For Rural, Forestry And Fisheries Development”, 2017. Economic Annual Report <https://www.gob.mx/fnd#documentos> (Accessed August 2016).
- Fuentes-Cortés L. F.; Dowling A. W.; Rubio-Maya C.; Zavala V. M.; Ponce-Ortega J. M. (2016) Integrated design and control of multigeneration system for building complexes. *Energy*. 116(1):1403-1416.
- Galán-Martín A.; Pavel V.; Assumpción A.; Jiménez-Esteller L.; Guillén-Gosálbez G. (2017) Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria a case study of wheat production in Spain. *J. Cleaner Prod.* 140(2): 816-830.
- Garcia D. J.; You F. (2016) The water-energy-food nexus and process systems engineering: a new focus. *Comput. Chem. Eng.* 91(1): 49-67.
- Garnett T. (2011) Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy*. 36(1): s23-s32.

- Guillén-Gosálbez G.; Grossmann I. (2010) A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model. *Comput. Chem. Eng.* 34(1):42-58.
- INEGI (National Institute of Statistics and Geography. Mexico in numbers): National Information by state and municipalities. 2012. Mexico City. <http://www.inegi.org.mx/> (Accessed May 2017)
- López-Díaz D. C.; Lira-Barragán L. F.; Rubio-Castro E.; Ponce-Ortega J. M.; El-Halwagi M. M. (2016) Optimal location of biorefineries considering sustainable integration with the environment. *Renew. Energ.* 100(1): 65-77.
- Ma L.; Wang F.; Zhang W.; Ma W.; Velthof G.; Qin W.; Oenema O (2013). Environmental assessment of management options for nutrient flows in the food Chain in China. *Environ. Sci. Technol.* 47(1): 7260-7268.
- Manzini R.; Accorsi R. (2013) The new conceptual framework for food supply chain assessment. *J. Food Eng.* 115(1): 251-263.
- Martínez-Guido S. I.; González-Campos J. B.; El-Halwagi M. M.; Ponce-Ortega J. M. (2017) Sustainable Optimization of Food Networks in Disenfranchised Communities. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering.* 5(10): 8895-8907.
- Martínez-Guido S. I.; González-Campos J. B.; Ponce-Ortega J. M.; Nápoles-Rivera F.; El-Halwagi M. M. (2016) Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. *Clean Technol. Environ. Policy.* 18(2): 553-562.
- Mexican Health Ministry. (2006). Official Mexican Norm 043-SSA2-2005 www.promocion.salud.gob.mx/dgps/descargas1/programas/2_norma_oficial_mexicana_nom_043_SSA2_2005.pdf (Accessed August 2017)
- Miran-Ackerman M. A.; Azzaro-Pantel C.; Aguilar-Lasserre A. A. A. (2017) Green supply chain network design framework for the processed food industry: Application to the orange juice agrofood cluster. *Computers and Industrial Engineering.*
- Nicholson C. F.; He X.; Gómez M. I.; Gao H. O.; Hill E. (2015) Environmental and economic impacts of localizing food systems: The case of dairy supply chains in the Northeastern United States. *Environ. Sci. Technol.* 49(1): 12005-12014.

- Nouredin M. M. B.; El-Halwagi M. M. (2015) Synthesis of C-H-O symbiosis networks. *AIChE J.* 64(4): 1242-1262.
- Özbayrak M.; Papadopoulou T.; Akgun M. (2007) Systems dynamics modelling of a manufacturing supply chain system. *Simulat. Model. Prac. Theo.* 15(10): 1338-1355.
- Pérez-Escamilla R.; Shamah-Levy T.; Candel J. (2017) Food security governance in Latin America: Principles and the way forward. *Global Food Security.* 14(1): 68-72.
- Rutten M.; Achterbosch T. J.; De-Boer I. J. M.; Crespo-Cuaresma J. M.; Geleijnse J.; Havlík P.; Heckeley T.; Ingram J.; Leip A.; Marette S.; Van-Meijl H.; Soler L. G.; Swinnen J.; Van't-Veer P.; Vervoort J.; Zimmermann A.; Zimmermann K. L.; Zurek M. (2016) Metrics, models and foresight for European Sustainable food and nutrition security: The vision of the SUSFANS project. *Agr. Syst.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.10.014>
- Santibañez-Aguilar J. E.; Ponce-Ortega J. M.; González-Campos J. B.; Serna-González M. M.; El-Halwagi M. (2013) Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste. *Waste Manage.* 33(12): 2607-2622.
- Sgarbossa F.; Russo I. (2017) A proactive model in sustainable food supply chain: insight from a case study. *Int. J. Prod. Econ.* 183(1):596-606.
- Shamah-Levy T.; Mundo-Rosas V.; Flores-de-la-Vega M. M.; Luiselli-Fernández C. (2017) Food security governance in Mexico: How can it be improved?. *Global Food Security.* 14(1): 73-78.
- Soysal M.; Bloemhof-Ruwaard J. M.; Van-der-Vorst J. G. A. J. (2014) Modelling food logistics networks with emission consideration: The case of an international beef supply chain. *Int. J. Prod. Econ.* 152(1):57-70
- The World Bank (2015) Population growth (annual %). Available on: <http://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW> (Accessed May 2017) (
- Wang J.; Yue H. (2017) Food safety pre-warning system based on data mining for sustainable food supply chain. *Food Control.* 73(1):223-229.
- Young T. S.; Dhanda K. K. (2012) Sustainability: Essentials for business. SAGE Publications, Los Angeles CA. United States of America.

- Yu F.; Xue L.; Sun C.; Zhang C. (2016) Product transportation distance based supplier selection in sustainable supply chain network. *J. Cleaner Prod.* 137(1): 29-39.
- Yue D.; Pandya S.; You F. (2016) Integrating hybrid life cycle assessment with multiobjective optimization: A modeling framework. *Environ. Sci. Technol.* 50(3): 1501-1509.
- Zavala V. M.; Flores-Tlacuahuac A. (2012) Stability of multiobjective predictive control: A utopia-tracking approach. *Automatica.* 48(10): 2627-263.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José María Ponce Ortega por brindarme la confianza de ser parte de su equipo, haberme apoyado en todo momento, gracias por las experiencias y conocimientos compartidos, hoy sé que hice la mejor elección como asesor en esta travesía.

A los Doctores Betzabe, Carmen, Fabricio y Agustín, por formar parte de la mesa, compartiendo su conocimiento y las aportaciones sugeridas a este trabajo.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por ser el hogar durante estos años de maestría y doctorado una segunda alma mater.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo otorgado durante todos estos años de formación académica.