

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias en Tecnologías
Sustentables

Calendarización dinámica de la cadena de suministro para la
producción de pellets combustibles considerando cambios en las
condiciones operacionales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Ciencias en Tecnologías Sustentables

Presenta:

Ing. Dulce María Aguilar Murguía

Dirigido por:

Dr. Sergio Iván Martínez Guido

Querétaro, Qro. a 27 de Noviembre del 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciatario no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciatario.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



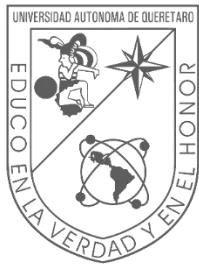
SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Calendarización dinámica de la cadena de suministro para la producción de pellets combustibles considerando cambios en las condiciones operacionales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestra en Ciencias en Tecnologías Sustentables

Presenta:

Ing. Dulce María Aguilar Murguía

Dirigido por:

Dr. Sergio Iván Martínez Guido

Sínodo:

Presidente: Dr. Sergio Iván Martínez Guido

_____ Firma

Secretario: Dr. Fernando Israel Gómez Castro

_____ Firma

Vocal: Dr. Oscar Daniel Lara Montaño

_____ Firma

Suplente: Dra. Claudia Gutiérrez Antonio

_____ Firma

Suplente: Dr. Víctor Manuel Ruíz García

_____ Firma

I RESUMEN

Esta tesis propone un modelo dinámico de optimización matemática para la cadena de suministro (CS) de pellets combustibles en el estado de Querétaro, codificada en GAMS, abordando la variabilidad en disponibilidad y composición de la biomasa residual agrícola (47 variedades de cultivos, 422 mil de toneladas de residuos agrícolas por año) y la demanda energética estacional en el mismo estado. El objetivo fue diseñar una CS adaptable que maximice el beneficio económico y social, y minimice emisiones de CO₂, comparando un modelo dinámico (que integra fluctuaciones en los parámetros de la CS a través del tiempo) con uno estático (que mantiene fijos los parámetros). La metodología incluyó una investigación y análisis profundo sobre temas similares así como la recolección de datos de residuos, obtenidos principalmente por la SIAP, y demanda energética así como parámetros ambientales y sociales, seguido de un modelado matemático en GAMS mediante programación mixta entera lineal (MILP) y mixta entera no lineal (MINLP), con variables como ubicación de plantas, flujos logísticos, costos, generación de emisiones y beneficios sociales; además se evaluaron dos tratamientos de almacenamiento (con/sin control de humedad y temperatura) y se realizó un análisis multiobjetivo (económico, ambiental, social). Los resultados mostraron que el modelo dinámico aumentó las emisiones en un 1.5% frente al estático y disminuyó los costos y el impacto social en un 24.1% y 78.3% respectivamente, prediciendo una menor producción de pellets (38,528 vs. 342,104 toneladas/año).

Palabras clave: residuos agroindustriales, pellets combustibles, cadena de suministro, optimización multiobjetivo, sostenibilidad.

II ABSTRACT

This thesis proposes a dynamic mathematical optimization model for the supply chain (SC) of fuel pellets in the state of Querétaro, coded in GAMS, addressing the variability in availability and composition of agricultural residual biomass (47 crop varieties, 422 thousand tons of agro-waste per year) and the seasonal energy demand in the same state. The objective was to design an adaptive SC that maximizes economic and social benefit, and minimizes CO₂ emissions, comparing a dynamic model (integrating fluctuations for the parameters of the SC over time) with a static one (maintaining the values for the parameters). The methodology included in-depth research and analysis on similar topics as well as the collection of waste data, obtained mainly by SIAP, and energy demand as well as environmental and social parameters, followed by mathematical modeling in GAMS using mixed integer linear (MILP) and mixed integer nonlinear programming (MINLP), with variables such as plant location, logistic flows, costs, emissions generation, and social benefits; in addition were evaluated two storage treatments (with/without humidity and temperature control) and multi-objective analysis was realized (economic, environmental, social). The results showed that the dynamic model increased emissions by 1.5% versus the static model and decreased costs and social impact by 24.1% and 78.3% respectively, leading to lower pellet production (38,528 vs. 342,104 tons/year).

Keywords: agro-industrial waste, fuel pellets, supply chain, multi-objective optimization, sustainability.

III DEDICATORIA

Este trabajo terminado, quiero dedicárselo a mis papás, al señor José María Aguilar Echevarría y la señora Martha Murguía Garay, así como mis abuelitos Blanca Garay Tarango, Julio Murguía Campoverde, María Guadalupe Chavarría Gutiérrez y Roque Aguilar Míncitar, quienes han sido testigos de todo mi trabajo, esfuerzo y dedicación, pero que además ellos han sido para mí mi motor y motivación a seguir en la vida, hacerles frente a las adversidades y no darme por vencida. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello sin pedir nunca nada a cambio, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades. Es por ello por lo que, como recordatorio de esto, les dedico el trabajo que he realizado.

IV AGRADECIMIENTOS

<<Un granjero vivía en una pequeña y pobre aldea. Sus vecinos le consideraban afortunado porque tenía un caballo con el que podía arar su campo. Un día el caballo se escapó a las montañas. Al enterarse los vecinos acudieron a consolar al granjero por su pérdida. “Qué mala suerte”, le decían. El granjero les respondía: “**mala suerte, buena suerte, quién sabe**”.

Unos días más tarde el caballo regresó trayendo consigo varios caballos salvajes. Los vecinos fueron a casa del granjero, esta vez a felicitarle por su buena suerte. “**Buena suerte, mala suerte, quién sabe**”, contestó el granjero.

El hijo del granjero intentó domar a uno de los caballos salvajes, pero se cayó y se rompió una pierna. Otra vez, los vecinos se lamentaban de la mala suerte del granjero y otra vez el anciano granjero les contestó: “**Buena suerte, mala suerte, quién sabe**”.

Días más tarde aparecieron en el pueblo los oficiales de reclutamiento para llevarse a los jóvenes al ejército. El hijo del granjero fue rechazado por tener la pierna rota. Los aldeanos, ¡cómo no!, comentaban la buena suerte del granjero y cómo no, el granjero les dijo: “**Buena suerte, mala suerte, ¿quién sabe?**”.>>

Cuento chino

Como bien dicen por ahí, “en la vida, a veces lo que parece una desgracia, puede ser una bendición disfrazada”. A lo largo de mi camino hasta el momento de hoy he tenido que tomar muchas decisiones, principalmente, frente a las adversidades para culminar esta etapa, sin embargo, han sido muchas las personas que me han ayudado directa o indirectamente en toda la trayectoria de éste, es por ello por lo que quiero agradecerles de alguna manera su apoyo, consejos, ayuda, amistad y por supuesto, su presencia.

Primero que nada, el apoyo incondicional de mis padres, José María Aguilar Echevarría y Martha Murguía Garay, quienes con amor, esfuerzo, sacrificio, trabajo y dedicación me han apoyado en todo momento, ya sea en la cercanía o lejanía, para llegar a culminar con este trabajo esta etapa de formación profesional que escogí.

A mis hermanas, Martha, Blanca y Yuliana que, en las cuales me he apoyado bastante para seguir adelante, y que con algunos consejos y ejemplos en su actuar me han ayudado a tomar decisiones que en su momento fueron difíciles para mí, así mismo quiero hacerles saber que he sentido el apoyo de cada una, claro, cada una demostrándolo a su manera.

A mis abuelitos Blanca y Julio, quienes siempre estuvieron al pendiente de mí y me ayudaron en la medida de todas sus posibilidades, parte de este logro se los dedico a ellos, ya que fueron un apoyo importante para que yo pudiera culminar esta etapa, los quiero mucho. Y claro, a mis abuelitos Lupe y Roque que, aunque ya no están aquí, sé que su presencia ha ido acompañándome en este trayecto.

A mis mejores amigos de secundaria, Citlalli, Alondra, Juan José y Ángel Aguilar Jesús, los cuales no se han separado de mí pese a la distancia en la que nos encontramos, gracias por seguir aquí, a mi lado, aun cuando los años han pasado y nos hemos ido por diferentes caminos. A mis amigas de la prepa, con quienes sé que puedo contar, aunque no nos veamos más que 1-2 vez por año. A mis amistadas de la carrera, Laura Itzel y Jorge Luis, con quienes de igual manera me han proporcionado su ayuda, consejos, tiempo y amistad.

Finalmente, con todas aquellas personas que conocí al iniciar esta aventura de migrar hacia Querétaro; mi único compañero de la maestría Jesús, alias “Jisus”, claro, esto ante papeles porque para nosotros, somos tres los integrantes de la primera generación de esta maestría, contando obviamente con Angi, los tres mosqueteros, su compañía y amistad hicieron que estar en la maestría fuera divertida y no se sintiera tan sola, compartiendo horas de estudio, así como la realización de proyectos y claro nuestros cafés en Tim Hortons para nuestras pláticas diarias. A Pedro, quien ha sido un gran apoyo para mí, en la vida personal y la escuela, en quien he encontrada un gran apoyo y se ha vuelto parte de mi familia. A Caro, Lulú, Pau, Luis, AnaLau, Jhon, agradezco el haberlos conocido y haber pasado momentos divertidos con ustedes. Por todo esto y más les agradezco su compañía, porque solo ustedes saben por todo lo que pasamos juntos estos años, lo que compartimos, vivimos y en lo que me han ayudado. Agradezco el haberlos conocido.

A los doctores. Ara, Dani y Vale, que cuando tuve momentos difíciles económicamente hablando, sin que se los pidiera me tendieron la mano, aán cuando ellos también pasaban por situaciones delicadas, especialmente Ara, te

estimo mucho por todo el apoyo que me brindaste y espero de alguna manera podértelo regresar algún día.

A mi asesor el Dr. Sergio Iván, quien me tuvo bajo su tutela y durante ella me ha brindado todo su apoyo, consejos y conocimientos necesarios para poder llevar a cabo el presente trabajo. Agradezco toda la ayuda y el tiempo que me has brindado.

Finalmente, pero no menos importante a Dios, por permitirme llegar hoy en día, por las personas que ha puesto en mi camino, las lecciones que me ha encomendado aprender para ser lo que hoy en día soy.

V SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

SIGLAS	DESCRIPCIÓN
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
CEN	Normas del Comité Europeo de Normalización
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CN	Cadena Normal
CP	Cadena Propuesta
CS	Cadena de suministro
EPA	Agencia de Protección Ambiental
ERP	Planificación de Recursos Empresariales
GAMS	General Algebraic Modeling System
GEI	Gases de Efecto Invernadero
IDH	Índice de Desarrollo Humano
IEA	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
ISO	Organización Internacional de Normalización
JCR	Publicaciones en Revistas Indexadas
MILP	Programación Mixta Entera Lineal
MINLP	Programación Mixta Entera No Lineal
NMT	Negocios de Mediana Tensión
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible

PAOT	Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial
PIB	Producto Interno Bruto
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SEDESU	Secretaría de Desarrollo Sustentable
SEMANART	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México
SENER	Secretaría de Energía
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

ABREVIATURAS	DESCRIPCIÓN
C/Tec	Con tecnología
Cant.	Cantidad
Cap	Capacidad
Comb.	Combustible
Conv.	Convencional
Cost.	Costo
Emis.	Emisiones
Prod.	Producción
S/Tec	Sin tecnología

Tec  Tecnología

Transp. Transporte

$$\text{CH}_4 \quad \text{Metano}$$

CO₂ Dióxido de carbono

UNIDADES DESCRIPCIÓN

\$ Dólar

% Porcentaje

~ Aproximadamente

a Años

ha Hectárea

kg Kilogramo

kWh Kilo watt hora

L Litros

m^2 Metro

m³ Metros cúbicos

MXN Peso mexicano

ton Tonelada

USD Dólar

VI NOMENCLATURA

VI.I DOMINIO DE VARIABLES

Variable	Dominio	Consideraciones
A	1:2	Considera los dos tipos de ambiente en almacén
C	1:7	Considera las diferentes capacidades posibles a instalar
	1:5	de almacenes y plantas según el modelo aplicado
I	1:18	Considera todos los municipios de Querétaro
J	1:47	Considera los cultivos del municipio viables en el análisis con base al estudio de caso
K	1:18	Considera todos los municipios de Querétaro
M	1:18	Considera todos los municipios de Querétaro
O	1:1	Considera la central eléctrica de Querétaro, El Sauz
U	1:18	Considera los usuarios totales por municipio
S	1:6	Considera los seis sectores de electricidad en CFE
R	1:2	Considera las dos centrales eléctricas más cercanas a Querétaro
T	1:12 1:52	Considera el tiempo en la cadena por mes o semana, según el modelo aplicado

VI.II VARIABLES

Simbología	Descripción	Ecuación
$(TECO_2)$	Emisiones totales de CO_2 generadas durante todo el proceso	51 , 63
$(Profit)$	Rendimiento económico global	35 , 63
$(BGEA)$	Beneficio social de todo el proceso	62 , 63

VI.III VARIABLES BINARIAS

<i>Simbología</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ecuación</i>
$(X_{c,m}^1)$	Variable binaria para la existencia de almacenes – estático	<u>7A</u> , <u>7C</u> , <u>19</u> , <u>55</u> , <u>57</u> , <u>59</u> , <u>19A</u> , <u>19B</u> , <u>20A</u> , <u>20B</u> , <u>23A</u> ,
$(X_{k,c}^2)$	Variable binaria para la existencia de plantas de pellets	<u>11A</u> , <u>11C</u> , <u>20</u> , <u>55</u> , <u>57</u> , <u>59</u> , <u>21A</u> , <u>22A</u> , <u>24A</u>
$(YTRIP_{i,a,m,j,t})$	Variable binaria de activación de viaje de FR	<u>66</u>
$(Y2TRIP_{m,a,k,t})$	Variable binaria de activación de viaje de almacén	<u>67</u>
$(ZP_{k,a,t})$	Variable binaria de producción de pellets	<u>69A</u> , <u>69B</u>

VI.IV VARIABLES POSITIVAS

<i> </i>	<i>Descripción</i>	<i>Ecuación</i>
$(BSGA)$	Beneficio total obtenido en los tres sectores	<u>61</u> , <u>62</u>
(BS^{PIB})	Beneficio total para el PIB	<u>60</u>
(BS^E)	Beneficio total para el sector educación	<u>58</u>
(BS^H)	Beneficio total por el sector salud	<u>56</u>
(TW_c)	Cantidad de trabajadores en todo el proceso	<u>53</u>
$(CC_{c,m}^A)$	Costo capital de almacén – estático	<u>19</u> , <u>31</u> , <u>23A</u>
$(CC_{k,c}^P)$	Costo capital de planta	<u>20</u> , <u>31</u> , <u>24A</u>

$(CF_{c,m}^A)$	Costo fijo de almacén – metodología II	<u>19A</u> , <u>19B</u> , <u>23A</u>
$(CF_{c,k}^P)$	Costo fijo de planta – metodología II	<u>21A</u> , <u>24A</u>
$(CV_{c,m}^A)$	Costo variable de almacén – metodología II	<u>20A</u> , <u>20B</u> , <u>23A</u>
$(CV_{c,k}^P)$	Costo variable de planta – metodología II	<u>22A</u> , <u>24A</u>
(CQR_i)	Costos por quema de residuos agroindustriales	<u>26</u> , <u>32</u>
$(CTFCC_o)$	Costos por transporte de combustible convencional a central eléctrica	<u>25</u> , <u>30</u>
$(CTMP_k)$	Costos por transporte de MP a planta	<u>22</u> , <u>29</u>
(CTP_o)	Costos por transporte de pellets a central eléctrica	<u>23</u> , <u>29</u>
(CTR_m)	Costos por transporte de residuos a almacén	<u>21</u> , <u>29</u>
(CTR_i)	Costos por transporte de residuos a relleno sanitario	<u>24</u> , <u>32</u>
(CUR_i)	Costos por uso de relleno sanitarios	<u>27</u> , <u>32</u>
$(CTCC)$	Costos totales de capital de plantas	<u>31</u> , <u>35</u>
(CTT^{CP})	Costos totales por la CP	<u>29</u> , <u>35</u>
(CTT^{CN})	Costos totales por la CN	<u>30</u> , <u>35</u>
$(CTDA)$	Costos totales por pago a agricultores	<u>28</u> , <u>35</u>
$(CTTrR)$	Costos totales por tratamiento de residuos	<u>32</u> , <u>35</u>
(DFC_o)	Demanda eléctrica – estático	<u>16</u> , <u>18</u>
$(DE_{u,s,t})$	Demanda eléctrica – dinámico	<u>64</u>
(ED_o)	Demanda eléctrica por satisfacer	<u>17</u> , <u>18</u>

$(MIWA_c^{PIB})$	Dinero invertido en el PIB	59 , 60 , 61
$(MIWA_c^E)$	Dinero invertido en el sector de educación	57 , 58 , 61
$(MIWA_c^H)$	Dinero invertido en el sector de salud	55 , 56 , 61
$(FECO_{2i})$	Emisiones por fijación de cultivos	49 , 50
$(PECO_{2k})$	Emisiones por generación de pellets	41 , 47
$(QECO_{2i})$	Emisiones por residuos agrícolas quemados	36 , 48
$(FCECO_{2o}^T)$	Emisiones por transporte de combustibles convencionales a centros de consumo	45 , 48
$(MPECO_{2k}^T)$	Emisiones por transporte de MP	40 , 47
$(CEECO_{2o}^T)$	Emisiones por transporte de pellets	42 , 47
$(RAECO_{2m}^T)$	Emisiones por transporte de residuos agrícolas	39 , 47
$(URECO_{2i}^T)$	Emisiones por transporte de residuos agrícolas a relleno sanitario	38 , 48
$(FUECO_{2o})$	Emisiones por uso de combustibles convencionales	46 , 48
$(EUECO_{2o})$	Emisiones por uso de pellets	43 , 47
$(URECO_{2i})$	Emisiones por uso de relleno sanitario de residuos agrícolas	37 , 48
$(EUCT)$	Emisiones por uso y cambio de tierra	44 , 51
(ETF)	Emisiones totales por combustibles convencionales	48 , 51
(ETE)	Emisiones totales por energéticos	47 , 51
(ECO_2^F)	Emisiones totales por fijación de CO ₂	50 , 51

$(\alpha_{u,s,t})$	Factor de incremento por consumo debido al ambiente	<u>64, 65</u>
(FCC_r)	Flujo de combustible convencional para satisfacer la demanda únicamente con éste	<u>12</u>
(FCC_o^R)	Flujo de combustible convencional recibido en centro de consumo	<u>13, 17, 46</u>
$(FCTCC_{r,o})$	Flujo de combustible convencional transportado desde las refinerías hasta la central eléctrica	<u>12, 13, 25, 45</u>
$(ESCC_{k,o})$	Flujo de energético mandado a centros de consumo	<u>14, 15, 23, 42</u>
$(FRP_{m,k,j}^{\text{Reco}})$	Flujo de MP enviado a planta – estático	<u>8, 9, 22, 40</u>
$(FRR_{k,j}^P)$	Flujo de MP recibido en planta – estático	<u>9, 10, 11B</u>
$(FRA_{i,j,t})$	Flujo de residuos agrícolas	<u>2, 3, 49</u>
$(FRR_{i,j,t})$	Flujo de residuos agrícolas destinados a relleno sanitario	<u>4, 24, 27, 37, 38</u>
$(FRA_{i,j,m}^{\text{Reco}})$	Flujo de residuos agrícolas enviados a almacén - estático	<u>5, 6, 21, 39</u>
$(FRQ_{i,j,t})$	Flujo de residuos agrícolas quemados	<u>4, 26, 36</u>
$(FRR_{m,j}^A)$	Flujo de residuos agrícolas recibidos en almacén – estático	<u>6, 7B, 8</u>
$(FRA_{c,m}^A)$	Flujo de residuos agrícolas recibidos en almacén para delimitar la capacidad de almacén – estático	<u>7B, 7C, 19, 19A, 19B, 20A, 20B, 23A</u>
$(FRST_{i,j,t})$	Flujo de residuos agrícolas sin tratamiento	<u>3, 4</u>
$(FRA_{i,j,t}^U)$	Flujo de residuos agrícolas usado en CP	<u>3, 5, 28, 34</u>

$(FPC_{i,j,t})$	Flujo producción de cultivo	<u>1, 2</u>
$(FTMPR_{k,c})$	Flujo total de MP recibido en plantas para delimitar la capacidad	<u>11C, 11B,</u> <u>20, 21A,</u> <u>22A, 24A</u>
(GMR_i)	Ganancias por manejo de residuos usados	<u>34, 35</u>
(GPV_o)	Ganancias por venta de energéticos	<u>33, 35</u>
(PCE_o^D)	Pellets en Central Eléctrica	<u>15, 17, 33,</u> <u>43</u>
$(STAP_c)$	Salario total para los trabajadores del almacén y la planta	<u>52, 53</u>
(TRW_c)	Tasa de retención de impuestos cobrados por cada trabajador	<u>54, 55, 57,</u> <u>59</u>
(VP_k^P)	Volumen de producción de pellets – estático	<u>10, 14, 41</u>
$(VP_{k,a,t}^P)$	Volumen de producción de pellets – dinámico	<u>68</u>

VI.V ESCALARES

Simbología	Descripción	Ecuación
$(FRPP^{\text{Min}})$	Cota inferior esperada de pellets producidos	<u>69A</u>
$(FRPP^{\text{Max}})$	Cota superior esperada de pellets producidos	<u>69A</u>

VI.VI PARÁMETROS

Simbología	Descripción	Ecuación
$(ACC_{i,j,t})$	Área de cultivo cosechada	<u>1</u>
(BAA)	Beneficio actual en Querétaro	<u>62</u>

(CCT)	Capacidad de carga del transporte	<u>21, 22, 23,</u> <u>24</u>
(CEsp)	Consumo específico del camión	<u>21, 22, 23,</u> <u>24</u>
$(CF_{c,m}^A)$	Costo fijo de almacén – estático	<u>19, 55, 57,</u> <u>59</u>
$(CF_{c,k}^P)$	Costo fijo de planta	<u>20, 55, 57,</u> <u>59</u>
$(CV_{c,m}^A)$	Costo variable de almacén – estático	<u>19</u>
$(CV_{c,k}^P)$	Costo variable de planta	<u>20</u>
$(DB_{u,s,t}^0)$	Demanda base por sector	<u>64, 65</u>
$(D_{m,k}^2)$	Distancias entre almacén y planta	<u>22</u>
$(D_{k,o}^3)$	Distancias entre planta y central eléctrica	<u>23</u>
$(DRfCE_{r,o})$	Distancias entre refinerías y central eléctrica	<u>45</u>
$(D_{i,m}^1)$	Distancias entre residuos agrícolas y almacén	<u>21</u>
$(D_{i,m}^0)$	Distancias entre residuos agrícolas y rellenos	<u>24</u>
(FCM_s^{FC})	Factor de consumo del combustible convencional	<u>16</u>
$(G_{u,s}^d)$	Factor de crecimiento de demanda energética	<u>64</u>
(FE_o)	Factor de energéticos – poder calorífico	<u>17</u>
$(EMPP)$	Factor de emisiones por generación de pellets	<u>41</u>
$(EMRA^Q)$	Factor de emisiones por quema de residuos	<u>36</u>
$(EMRA^R)$	Factor de emisiones por relleno sanitario	<u>37</u>

$(EMFC^T)$	Factor de emisiones por transporte de combustibles convencionales a centros de consumo	<u>45</u>
$(EMMP^T)$	Factor de emisiones por transporte de MP	<u>40</u>
$(EMRA^T)$	Factor de emisiones por transporte de residuos agrícolas	<u>38, 39</u>
(EMP^T)	Factor de emisiones por transporte de pellets	<u>42</u>
$(EMUFC)$	Factor de emisiones por uso de combustible convencional	<u>46</u>
$(EMUP)$	Factor de emisiones por uso de pellets	<u>43</u>
(FEC_o)	Factor de energéticos convencionales – poder calorífico	<u>17</u>
(FF_j)	Factor de fijación de cada cultivo	<u>49</u>
(PCR_j)	Factor de rendimiento de producción de pellets	<u>10</u>
$(YR_{i,j,t})$	Factor de rendimiento de producción de residuos	<u>1</u>
$(RR_{a,t})$	Factor de producción de pellets - dinámico	<u>68</u>
$(CCE_{s,t})$	Factor por consumo eléctrico durante el tiempo	<u>65</u>
$(FSA_{c,m})$	Fracción destinada a salarios por almacén	<u>52</u>
$(FSP_{c,k})$	Fracción destinada a salarios por planta	<u>52</u>
$(ICA_{c,m})$	Límite inferior de capacidad de almacén - estático	<u>7C</u>
$(ICP_{k,c})$	Límite inferior de capacidad de planta	<u>11C</u>
$(SCA_{c,m})$	Límite superior de capacidad de almacén - estático	<u>7C</u>

$(SCP_{k,c})$	Límite superior de capacidad de planta	<u>11C</u>
(PTR_s^{FC})	Personas registradas por municipio	<u>16</u>
(RG_j)	Porcentaje de residuos agrícolas por cultivo	<u>2</u>
(PR)	Porcentaje de retención a salarios	<u>54</u>
(TRA_c^{PIB})	Porcentaje del impuesto por producción que se destina al sector desarrollo	<u>59</u>
(TRA_c^E)	Porcentaje del impuesto por producción que se destina al sector educación	<u>57</u>
(TRA_c^H)	Porcentaje del impuesto por producción que se destina al sector salud	<u>55</u>
(TR_c^{PIB})	Porcentaje del impuesto salarial que se destina al sector desarrollo	<u>59</u>
(TR_c^E)	Porcentaje del impuesto salarial que se destina al sector educación	<u>57</u>
(TR_c^H)	Porcentaje del impuesto salarial que se destina al sector salud	<u>55</u>
(PDC)	Precio de compra de combustible convencional	<u>21, 22, 23,</u> <u>24</u>
(PV)	Precio de venta	<u>33</u>
(PC)	Precio por compra de residuos agrícolas	<u>28</u>
$(PMGN)$	Precio por manejo de gas natural	<u>25</u>
$(CMRO)$	Precio por manejo de residuos	<u>34</u>
$(PMQR)$	Precio por multa de quema de residuos agroindustriales	<u>26</u>
(PUR)	Precio por uso de relleno	<u>27</u>

(AG_c^{PIB})	<i>Presupuesto estatal destinado al sector desarrollo</i>	<u>60</u>
(AG_c^E)	<i>Presupuesto estatal destinado al sector educación</i>	<u>58</u>
(AG_c^H)	<i>Presupuesto estatal destinado al sector salud</i>	<u>56</u>
(SUW_c)	Salario promedio unitario por trabajador	<u>53</u>

ÍNDICE

I	RESUMEN	ii
II	ABSTRACT	iii
III	DEDICATORIA.....	iv
IV	AGRADECIMIENTOS	v
V	SIGLAS, ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS.....	viii
VI	NOMENCLATURA	xi
VI.I	DOMINIO DE VARIABLES	xi
VI.II	VARIABLES.....	xi
VI.III	VARIABLES BINARIAS	xii
VI.IV	VARIABLES POSITIVAS	xii
VI.V	ESCALARES	xvi
VI.VI	PARÁMETROS	xvi
VII	INTRODUCCIÓN	1
VIII	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	4
VIII.I	BIOENERGÉTICOS	4
VIII.I.I	Clasificación.....	5
VIII.I.II	Pellets	6
VIII.II	CADENAS DE SUMINISTRO	7
VIII.II.I	Demanda de productos y servicios.....	8
VIII.III	OPTIMIZACIÓN	9
VIII.III.I	Tipos de modelado.....	10
VIII.IV	SUSTENTABILIDAD	11
VIII.V	ECONOMÍA CIRCULAR	12

IX	ANTECEDENTES	13
IX.I	BIOCOMBUSTIBLES	13
IX.II	VARIABLES CRÍTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	14
IX.III	CADENA DE SUMINISTRO Y OPTIMIZACIÓN	14
X	JUSTIFICACIÓN	17
XI	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	19
XII	HIPÓTESIS	20
XIII	OBJETIVOS	21
XIII.I	OBJETIVO GENERAL.....	21
XIII.II	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
XIV	METODOLOGÍA	23
XIV.I	ESTUDIO DE CASO	25
XIV.II	SELECCIÓN Y FILTRADO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS.....	27
XV	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
XV.I	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE JITOMATE BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO	30
XV.I.I	Metodología del análisis	31
XV.I.II	Resultados obtenidos.....	33
XV.I.III	Selección de escenarios	33
XV.II	MODELO MATEMÁTICO ESTÁTICO: METODOLOGÍA I	34
BALANCES DE MATERIALES.....	34	
XV.II.I	DEMANDA ENERGÉTICA.....	37
XV.II.II	COSTOS.....	38
XV.II.III	GANANCIAS	40

XV.II.IV	RENDIMIENTO ECONÓMICO	40
XV.II.V	EMISIONES	41
XV.II.VI	BENEFICIOS SOCIALES	43
XV.II.VII	FUNCTION OBJETIVO.....	44
XV.III	MODELO MATEMÁTICO ESTÁTICO: METODOLOGÍA II	44
XV.IV	MODELO MATEMÁTICO DINÁMICO.....	46
XV.V	RESULTADOS MODELO ESTÁTICO: METODOLOGÍA I.....	48
XV.V.I	ANÁLISIS METODOLOGÍA I	49
XV.VI	RESULTADOS MODELO ESTÁTICO: METODOLOGÍA II.....	67
XV.VI.I	ANÁLISIS METODOLOGÍA II.....	68
XV.VII	RESULTADOS MODELO MATEMÁTICO DINÁMICO.....	94
XV.VII.I	ESCIENARIO 1.1: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO – DINÁMICO	
	95	
XV.VII.II	ESCIENARIO 1.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO – ESTÁTICO	
	99	
XV.VII.III	COMPARATIVA ENTRE EL ESCENARIO 1.1 Y 1.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO	102
XV.VII.IV	ESCIENARIO 2.1: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES – DINÁMICO	107
XV.VII.V	ESCIENARIO 2.2: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES – ESTÁTICO	111
XV.VII.VI	COMPARATIVA ENTRE EL ESCENARIO 2.1 Y 2.2: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES	114
XV.VII.VII	ESCIENARIO 3.1: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL – DINÁMICO	120
XV.VII.VIII	ESCIENARIO 3.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL – ESTÁTICO	
	123	

XV.VII.IX	COMPARATIVA ENTRE EL ESCENARIO 3.1 Y 3.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL.....	127
XVI	CONCLUSIONES	134
XVII	ÁREAS DE OPORTUNIDAD O TRABAJO FUTURO	137
XVIII	REFERENCIAS	138
XIX	ANEXOS	160
XIX.I	ANEXO 1: CÁLCULO DE COSTOS PARA LA INFRAESTRUCTURA	
	160	
XIX.II	ANEXO 2: LISTA DE FACTORES EMPLEADOS	169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de biocombustibles de acuerdo con su estado físico.....	5
Tabla 2. Listado de residuos con mayor generación en el estado de Querétaro (SIAP, 2023).	26
Tabla 3. Seguimiento fotográfico de residuos de jitomate.....	31
Tabla 4. Tabla de seguimiento temporal de residuos: cambios en peso y porcentaje de pérdida.....	32
Tabla 5. Límites superior e inferior de los almacenes instalados.	36
Tabla 6. Límites superior e inferior de las plantas de pellets instaladas.....	37
Tabla 7. Límites superior e inferior de los almacenes instalados.	47
Tabla 8. Límites superior e inferior de las plantas de pellets instaladas.....	47
Tabla 9. Impacto económico: Comparativa de costos de almacenamiento con y sin tecnología.....	52
Tabla 10. Impacto económico: Comparativa de la inversión social entre escenarios con y sin tecnología.	53
Tabla 11. Impacto social: Comparación de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	58
Tabla 12. Impacto ambiental: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en almacenamiento.	60
Tabla 13. Impacto social: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	64
Tabla 14. Impacto social: Comparativa ambiental entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	66
Tabla 15. Impacto social: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	67
Tabla 16. Capacidad y costos de almacenes.....	72
Tabla 17. Capacidad y costos de plantas.....	72

Tabla 18. Impacto económico-Metodología II: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento	74
Tabla 19. Impacto económico-Metodología II: Comparativa ambiental entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.....	77
Tabla 20. Impacto económico-Metodología II: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	78
Tabla 21. Impacto ambiental-Metodología II: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.....	83
Tabla 22. Impacto ambiental-Metodología II: Comparativa de emisiones entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.....	86
Tabla 23. Impacto ambiental-Metodología II: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	87
Tabla 24. Impacto social-Metodología II: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.	92
Tabla 25. Impacto social-Metodología II: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.....	93
Tabla 26. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 1.1.....	97
Tabla 27. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 1.1.	99
Tabla 28. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 1.2.....	101
Tabla 29. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 1.2.	102
Tabla 30. Tabla de especificaciones por almacén y tipo de modelo: Escenario 1.	105
Tabla 31. Registro total de almacenes y plantas instalados por modelo empleado.	106
Tabla 32. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 2.1.....	109
Tabla 33. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 2.1.....	110
Tabla 34. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 2.1.	111
Tabla 35. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 2.2.....	112
Tabla 36. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 2.2.....	113
Tabla 37. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 2.2.	114

Tabla 38. Registro total de almacenes y plantas instalados por modelo empleado: Escenario 2	115
Tabla 39. Tabla de especificaciones por almacén y tipo de modelo: Escenario 2.	116
Tabla 40. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 3.1.....	121
Tabla 41. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 3.1.....	122
Tabla 42. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 3.1.	123
Tabla 43. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 3.2.....	125
Tabla 44. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 3.2.....	126
Tabla 45. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 3.2.	127
Tabla 46. Tabla de especificaciones por almacén y tipo de modelo: Escenario 3.	130
Tabla 47. Registro total de almacenes y plantas instalados por modelo empleado: Escenario 3.....	131
Tabla 48. Tabla de Factores de relación para estimar los elementos de inversión de capital en función del costo del equipo entregado.	160
Tabla 49. Tabla de Factores: almacén sin tecnología.	162
Tabla 50. Factores totales para almacén sin tecnología.	162
Tabla 51. Flujo de efectivo de almacén sin tecnología.	163
Tabla 52. Desglose de costos por equipos de almacén con tecnología.	165
Tabla 53. Tabla de Factores: almacén sin tecnología.	165
Tabla 54. Factores totales para almacén sin tecnología.	166
Tabla 55. Flujo de efectivo de almacén con tecnología.	166
Tabla 56. Tabla de Factores: planta.	167
Tabla 57. Factores totales para planta.	168
Tabla 58. Flujo de efectivo de planta de pellets.....	168
Tabla 59. Lista de parámetros empleados.	169

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los biocombustibles de acuerdo con la generación.	
Elaboración propia con imágenes de pixabay.	5
Figura 2. Superestructura de la cadena de suministro de pellets combustibles.	
Elaboración propia.	27
Figura 3. Degradación de los residuos de jitomate a través del tiempo	33
Figura 4. Comparativa de la red logística del Escenario 1: Distribución de instalaciones y residuos.	54
Figura 5. Comparativa de la red logística del Escenario 2: Distribución de instalaciones y residuos.	59
Figura 6. Comparativa de la red logística del Escenario 3: Distribución de instalaciones y residuos.	65
Figura 7. Comparativa de la red logística del Escenario 1: Distribución de instalaciones y residuos. Metodología II	76
Figura 8. Comparativa de la red logística del Escenario 2: Distribución de instalaciones y residuos. Metodología II.	85
Figura 9. Comparativa de la red logística del Escenario 3: Distribución de instalaciones y residuos. Metodología II.	94
Figura 10. Maximización del beneficio económico. Distribución logística de la cadena dinámica.	96
Figura 11. Maximización del beneficio económico. Distribución logística de la cadena estática.	100
Figura 12. Comparativa de modelos en el aspecto económico: Infraestructura y red logística.	104
Figura 13. Minimización de emisiones. Distribución logística de la cadena dinámica.	108
Figura 14. Minimización de emisiones. Distribución logística de la cadena estática.	112

Figura 15. Comparativa de modelos en el aspecto de emisiones: Infraestructura y red logística.....	117
Figura 16. Comparativa de modelos en el aspecto social: Infraestructura y red logística.....	121
Figura 17. Maximización del beneficio económico. Distribución logística de la cadena dinámica.....	124
Figura 18. Comparativa de modelos en el aspecto social: Infraestructura y red logística.....	132

VII INTRODUCCIÓN

En los últimos años, Querétaro se ha establecido como un polo de crecimiento económico y demográfico en México, impulsado por la expansión de sectores industriales, la generación de empleo y una calidad de vida, que ha hecho que se reciban 192 mil nuevos habitantes entre los años 2018 y 2023 en el estado (Secretaría de Desarrollo Sustentable, 2023; Secretaría de economía, 2024).

El cambio en la industria del estado ha sido claramente visible. En 2024, este sector mostró un crecimiento anual de entre el 7% y el 8%, especialmente en municipios como El Marqués, Querétaro y Colón, impulsado por inversiones nacionales e internacionales expandiendo diferentes parques industriales (INEGI, 2020; Secretaría de Desarrollo Sustentable, 2023; ROCA Desarrollos, 2024; Secretaría de Economía, 2024). Este crecimiento ha derivado en un aumento sostenido en la demanda de energía, materias primas y una generación creciente de residuos, planteando retos significativos para la sustentabilidad regional.

En línea con las tendencias nacionales (donde el consumo eléctrico aumentó 3.5% en 2023 y se espera que crezca por encima del 2% anual), Querétaro enfrenta un incremento acelerado en sus necesidades energéticas (Masiriz & Stornelli, 2024; Gobierno de México, 2025). Paralelamente, la producción agrícola estatal mostró un aumento del 71.98% entre 2023 y 2024 (SIAP, 2024, 2025), lo que amplía la disponibilidad de residuos agrícolas susceptibles de valorización. Esta situación ha motivado al Estado a explorar estrategias de descarbonización y economía circular como parte de sus compromisos con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (MÉXICO2, 2024).

Entre las alternativas energéticas renovables —solar, geotérmica, eólica, mareomotriz y biomasa— los pellets combustibles producidos a partir de biomasa residual destacan por su capacidad para reducir emisiones de gases de efecto invernadero y promover un modelo de producción circular (Silva-Hernández et al., 2020; Sanahuja-Parejo, 2022; Prado-Acebo et al., 2024). La valorización de

residuos agroindustriales mediante la producción de pellets ofrece una vía para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y responder a la creciente demanda energética del estado. Sin embargo, la producción de pellets enfrenta importantes desafíos operativos y logísticos, tales como la variabilidad en la disponibilidad de biomasa, la estacionalidad de la demanda, las fluctuaciones en los precios y la necesidad de planificar cadenas de suministro (CS) resilientes (Martínez-Guido et al., 2021; Vitale et al., 2022; Bedoya Sepulveda et al., 2024; Merino-García et al., 2024). Esta incertidumbre limita la viabilidad económica y ambiental del sistema (Abusaq et al., 2022), aunque diversos estudios demuestran que los modelos de optimización pueden mitigar costos y emisiones considerando esta variabilidad (Quddus et al., 2017).

La programación lineal y entera mixta (MILP y MINLP) ha demostrado ser eficaz en el diseño de CS óptimas, permitiendo determinar localización de instalaciones, rutas logísticas, fuentes de biomasa y capacidades operativas (Gassen et al., 2019; León-Olivares et al., 2020). Sin embargo, los modelos estáticos frecuentemente asumen condiciones fijas, sin considerar alteraciones en la demanda, la composición de residuos o los cambios estacionales, lo que incrementa la incertidumbre proyectada.

En este contexto, la integración de modelos dinámicos en la planificación de cadenas de suministro de pellets combustibles permite responder a condiciones cambiantes mediante ajustes operativos en tiempo real. Estos modelos incorporan la estacionalidad, las fluctuaciones en la composición de la biomasa y la demanda, así como aspectos logísticos y económicos, ofreciendo soluciones más adaptativas y sostenibles (Ebadian, 2003; Ivanov & Sokolov, 2012; Mobini et al., 2013; Hughes et al., 2014; Aghalari et al., 2021; Vitale et al., 2022; Bui-Duy et al., 2023).

La evidencia reciente confirma que este tipo de modelos mejora la utilización de recursos, la adaptabilidad frente a escenarios operativos inciertos (EGUCHI et al., 2006; Zhu, 2024), y permite optimizar la relación entre costos, emisiones y beneficios económicos en mercados volátiles (Pattison et al., 2017;

Abusaq et al., 2022). Por ello, esta investigación propone diseñar una calendarización dinámica en la cadena de suministro de pellets combustibles mediante modelos MILP y MINLP implementados en GAMS, incorporando variables críticas como la demanda fluctuante, estacionalidad, composición de biomasa, y condiciones operacionales.

VIII FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

VIII.I BIOENERGÉTICOS

La bioenergía se define como energía que se obtiene de la biomasa, es decir, a partir de materiales orgánicos, los cuales pueden tener su origen en cultivos energéticos, productos y subproductos pesqueros, acuícolas, residuos forestales, residuos orgánicos municipales, excremento de animales, grasas y aceites de origen vegetal o animal (Pinatti et al., 2010; PAOT, 2012; Niu et al., 2016). Los bioenergéticos son sustancias que contienen energía almacenada, los cuales son utilizados como fuente de energía. Pueden proceder de origen vegetal, animal o mineral, y representan una alternativa prometedora a los combustibles fósiles (Demirbas & Demirbas, 2010; Malik et al., 2024). Su uso es clave en una transición hacia una economía sostenible y baja en carbono, ya que contribuyen a reducir la dependencia de los combustibles no renovables, mitigar el cambio climático y promover el desarrollo rural (Mohammed et al., 2018; Chowdhury et al., 2025). Sin embargo, es crucial abordar de manera responsable y sostenible los desafíos asociados a la producción y uso de los bioenergéticos. Particularmente, las tecnologías que emplean biogás, bioetanol, biodiésel o biometano para generar energía eléctrica, térmica o su aplicación en el sector transporte están experimentando un rápido avance (PAOT, 2012). Este progreso se ve impulsado por la creciente conciencia sobre los impactos ambientales de los combustibles fósiles, lo que ha centrado los esfuerzos en desarrollar soluciones que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuyan la dependencia de los recursos no renovables (Sanahuja-Parejo et al., 2022). De aquí que los biocombustibles hayan surgido como una alternativa promisoria en la transición hacia fuentes de energía más sostenibles (Burgess Clifford, 2014).

Un biocombustible es una fuente de energía obtenida directa o indirectamente de biomasa derivada de diversas actividades (Soria-Ornelas et al., 2016). Éstos comprenden biocarburantes como alcoholes, éteres, ésteres de origen

orgánico, producidos a partir de biomasa celulósica —ya sea de cultivos o de plantas silvestres— que pueden sustituir parcial o totalmente a los combustibles fósiles en aplicaciones de transporte o generación eléctrica (Salinas-Callejas & Gasca-Quezada, 2009).

VIII.I.I Clasificación

Los biocombustibles pueden presentarse en tres estados: sólido (como madera, astillas, pellet), líquido (bioetanol, biobutanol, biodiésel, bioturbosina) y gaseoso (biogás o gas de síntesis), como se detalla en la **Tabla 1**. Asimismo, su clasificación puede realizarse según el tipo de materia prima usada para su producción, dando lugar a biocombustibles de primera, segunda, tercera y cuarta generación (véase **Figura 1** Figura 1. Clasificación de los biocombustibles de acuerdo con la generación. Elaboración propia con imágenes de pixabay.).

Tabla 1. Tipos de biocombustibles de acuerdo con su estado físico.

Sólidos	Madera, astillas, paja, briquetas, pellets, triturados finos, carbón vegetal
Líquidos	Alcoholes, biohidrocarburos, aceites vegetales, ésteres derivados de aceites vegetales, aceites de pirólisis.
Gaseosos	Biogás, gas de síntesis, gas de gasógeno, hidrógeno renovable

*Obtenido de: Salinas-Callejas & Gasca-Quezada (2009).

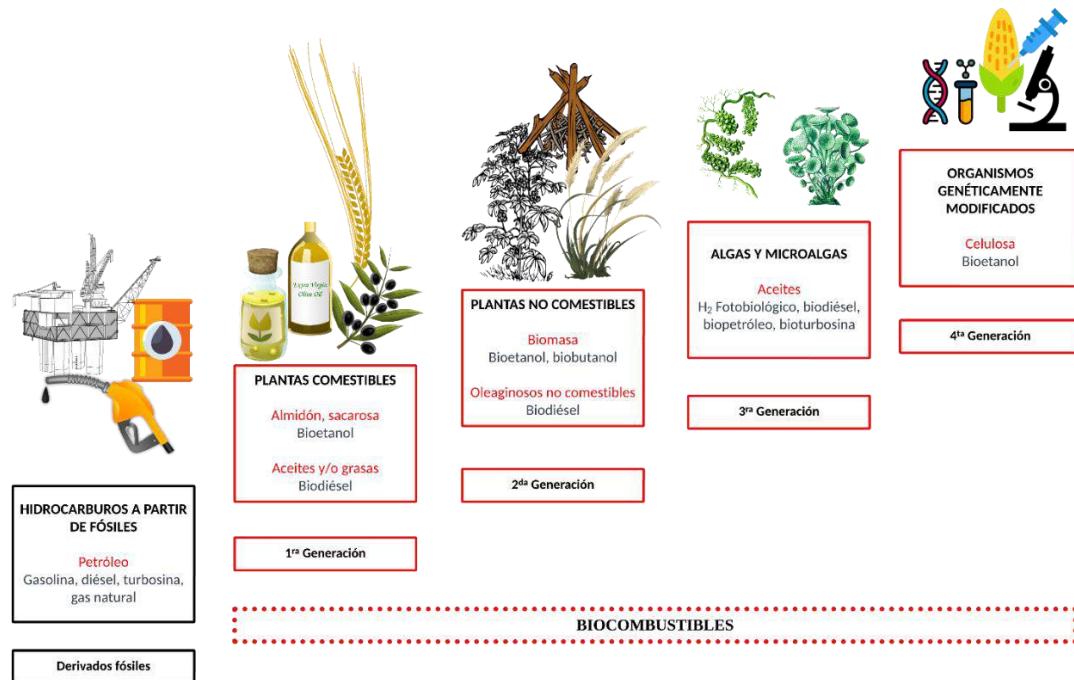


Figura 1. Clasificación de los biocombustibles de acuerdo con la generación. Elaboración propia con imágenes de pixabay.

VIII.I.II Pellets

Los biocombustibles sólidos son versátiles ya que pueden emplearse para generar energía eléctrica, térmica, e incluso pueden llegar a producir otros tipos de biocombustibles. Entre ellos, los pellets combustibles destacan su popularidad, atribuida a su facilidad de manejo, transporte a gran escala y el embalaje, gracias a sus dimensiones estandarizadas (Silva-Hernández et al., 2020). Estos pequeños cilindros de biomasa —elaborados comúnmente con residuos de madera, aserrín o cultivos agrícolas (Vitale et al., 2022)— poseen una forma compacta y homogénea que optimiza su almacenamiento, transporte y combustión controlada (Kaliyan & Vance Morey, 2009; Kuranc et al., 2020). Su uso está extendido en estufas y calderas diseñadas para una quema eficiente (Pradhan et al., 2019). Adicionalmente, su alta eficiencia energética (superior a la de la biomasa en estado natural) se debe principalmente al proceso de densificado (Filbakk et al., 2011; Forero Nuñez et al., 2012; González et al., 2012).

Como se señala en la sección de antecedentes, la procedencia y composición de la biomasa son factores críticos en la producción de pellets. El proceso inicia con el secado y la trituración de la materia prima con el fin de reducir la humedad y el tamaño de partícula. Posteriormente, el material triturado se compacta (densifica) mediante una prensa o una matriz de peletización, transformándose en pellets. Éstos pasan a una etapa de enfriamiento y cribado para eliminar las partículas finas y asegurar una uniformidad dimensional. Finalmente, los pellets son empacados en bolsas o almacenados a granel, siempre con estricto control de humedad (Uslu et al., 2008; Forero Nuñez et al., 2012; Sanahuja-Parejo, 2022).

El proceso de producción genera polvo fino, material particularmente peligroso por su alta combustibilidad, que incrementa el riesgo de incendios, y puede favorecer la fusión de las cenizas (Thek & Obernberger, 2012). Para mitigar

estos riesgos y asegurar la calidad del producto final, se han establecido estándares técnicos que regulan parámetros clave como: humedad, contenido de cenizas, concentración de azufre, nitrógeno y cloro, así como densidad y poder calorífico (Silva-Hernández et al., 2020).

Los estándares actuales para biocombustibles sólidos, establecidos por la Organización Internacional de Normalización (ISO), que reemplazó a las Normas del Comité Europeo de Normalización “CEN”, se recogen en la serie ISO 17225. Esta incluye la ISO 17225-1 para especificaciones generales de los pellets, ISO 17225-2 para pellets de madera clasificados para uso industrial y no industrial, e ISO 17225-6 para pellets no leñosos, cubriendo biomasas herbáceas, frutales, acuáticas, y sus mezclas (ISO, 2021b, 2021c, 2021a). El cumplimiento garantiza la calidad energética, durabilidad, bajas emisiones y compatibilidad con equipos, facilitando la comercialización (Silva-Hernández et al., 2020).

VIII.II CADENAS DE SUMINISTRO

La CS es un sistema complejo de nodos interconectados —proveedores, procesadores, distribuidores y clientes— que gestionan flujos físicos e informativos bajo una lógica de optimización dual: costo y eficiencia (Ikhwana, 2018; Emenike & Falcone, 2020; Sydle, 2024). Su complejidad puede medirse mediante parámetros estructurales (Beamon & Chen, 2001), y su planificación opera en tres niveles jerárquicos: estratégico, táctico y operativo (Gupta & Maranas, 2003), todos orientados a la satisfacción del cliente final.

En el contexto actual, caracterizado por una alta volatilidad y competitividad, la planificación en las CS implica anticipar y coordinar de actividades desde la adquisición de materias primas hasta la entrega final. Este proceso busca equilibrar oferta y demanda, minimizar costos y maximizar la eficiencia operativa (Larson, 2001; Quesada et al., 2012; Badr et al., 2023a). Una planificación eficaz otorga visibilidad integral sobre los componentes clave de la CS: demanda del mercado, inventarios, capacidad productiva y transporte. Esta visibilidad facilita la

coordinación entre actores, desde proveedores hasta minoristas, y reduce el riesgo como desabasto o exceso de inventario, mejorando el rendimiento global (Chopra & Meindl, 2016).

Dentro de este proceso, la planificación de la demanda (demand planning) y el pronóstico dentro de la CS (supply chain forecasting) son componentes estratégicos. La capacidad de identificar patrones de consumo y anticipar cambios en el mercado permiten a las empresas ajustar sus niveles de inventario de forma proactiva, aumentando su agilidad y resiliencia (Lun et al., 2016; Seyedian & Mafakheri, 2020; Badr et al., 2023b). Un enfoque integral en estas áreas contribuye a mitigar los riesgos tanto de la escasez de productos como la acumulación de inventario no vendible (Y. Guo et al., 2025).

La incorporación de tecnologías avanzadas, como los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP) y las herramientas de análisis predictivo, han transformado las capacidades de planificación. Estas soluciones permiten recopilar y analizar datos en tiempo real, mejorando la toma de decisiones y la capacidad de respuesta ante eventos inesperados (Tang & Tomlin, 2008). Su implementación fortalece tanto la precisión del pronóstico como la agilidad operativa de la CS. La adaptabilidad es otro pilar fundamental en la planificación de la cadena. Cambios abruptos en la demanda, o interrupciones logísticas, o crisis externas requieren planes de contingencia flexibles que garanticen la continuidad operativa (Ivanov & Dolgui, 2020).

VIII.II.I Demanda de productos y servicios.

La gestión de la demanda es crucial para el éxito empresarial, ya que permite comprender, influir y satisfacer las necesidades del cliente de manera estratégica (Childerhouse & Towill, 2011). No se limita a prever cantidades de productos, sino que abarca la anticipación de preferencias, estacionalidades, ajuste de precios y garantizar la disponibilidad adecuada. Al anticiparse a estas variables,

las empresas fortalecen la relación con sus clientes y construyen una reputación sólida en el mercado (Childerhouse & Towill, 2011).

Una gestión efectiva de la demanda evita desabasto como exceso de inventario, mejorar la eficiencia de la CS y permite una respuesta ágil a los cambios del entorno (Enyinda et al., 2008). Para ello, se emplean estrategias como modelos de pronósticos avanzados, análisis de tendencias, herramientas estadísticas y tecnologías de análisis predictivo (Petropoulos et al., 2022). La colaboración entre los distintos actores de la CS también es esencial. La gestión de la demanda no debe recaer exclusivamente en los equipos y ventas o marketing, sino extenderse a toda la CS. Compartir información en tiempo real y coordinar decisiones facilita una respuesta sincronizada y eficiente (GEP, 2021).

Finalmente, las políticas de precios dinámicos se han convertido en una estrategia clave en entornos competitivos. Ajustar los precios en función de la demanda y la disponibilidad permite influir en el comportamiento del consumidor y maximizar los ingresos (Kalyan T. Talluri & Garrett J. van Ryzin, 2006).

VIII.III OPTIMIZACIÓN.

La optimización es el proceso mediante el cual se busca obtener la mejor solución posible a un problema, maximizando o minimizando una función objetivo, sujeta a ciertas restricciones específicas (Chong & Źak, 2013; Koopialipoor et al., 2020; Rojas Guerra, 2023). Se trata de una herramienta fundamental en las matemáticas aplicadas, cuya finalidad es identificar, dentro de un conjunto de alternativas viables, aquella que resulta más eficaz o funcional (Koopialipoor et al., 2020; Kontuš et al., 2023). Un modelo de optimización se compone de cuatro elementos básicos:

- ❖ Parámetros, que representan datos conocidos del problema;
- ❖ Variables de decisión, cuyos valores deben determinarse;
- ❖ Restricciones, que definen los límites o condiciones del sistema;
- ❖ Función objetivo, expresa el criterio a optimizar (Arsham, 2018).

Dependiendo de la naturaleza de esta última y de las relaciones entre variables, los problemas de optimización se clasifican en lineales y no lineales.

La optimización es un campo robusto y multifacético, con ramas especializadas como la optimización lineal, entera, no lineal y estocástica, de control óptimo y programación semi-infinita, entre otras (Stengel & Mathematics, 1994; Ruszczynski, 2011). Cada una de estas áreas aborda distintos tipos de problemas, pero todas comparten principios clave como las condiciones de optimalidad, la dualidad, el análisis de sensibilidad y el desarrollo de métodos numéricos. Sus aplicaciones son vastas y abarcan desde el diseño de estructuras, control de procesos químicos y planificación de rutas en telecomunicaciones, hasta la reconstrucción de imágenes, radioterapia, valoración de activos financieros, gestión de la cadena de suministro y localización de instalaciones (Tzafestas, 1980; Stengel & Mathematics, 1994; Ruszczynski, 2011). La creciente complejidad de muchos de estos problemas (derivada del volumen de variables, restricciones y escenarios) ha impulsado el uso intensivo de herramientas computacionales para encontrar soluciones óptimas en tiempos razonables (Aithal et al., 2021).

VIII.III.1Tipos de modelado

En el análisis de datos y procesos, la incertidumbre es un elemento constante. Ésta puede darse en factores como cambios económicos, regulaciones, o la dependencia a terceros. Por ello los tomadores de decisiones deben adaptarse a entornos dinámicos, y revisar constantemente incluso sus planes a corto plazo. Para anticipar posibles resultados y apoyar la toma de decisiones, se emplean modelos matemáticos y computacionales en ámbitos como inversiones, procesos industriales o impactos ambientales. Sin embargo, estos modelos están sujetos a incertidumbres, desde su construcción hasta su implementación (Ramos & Cerisola, 2016; Arsham, 2018; Emenike & Falcone, 2020).

Una herramienta clave para abordar esta incertidumbre es el análisis de sensibilidad, que permite evaluar cómo varía la solución óptima ante cambios

considerados constantes. Esta técnica, también conocida como análisis de estabilidad, escenarios o post-optimalidad, permite valorar la robustez de las decisiones y explorar múltiples escenarios posibles (Arsham, 2018). Una forma práctica de enfrentar la incertidumbre es mediante el enfoque determinista. En él, se elabora una lista organizada de variables inciertas que podrían impactar el resultado, y se simulan distintos escenarios para observar su efecto. Aunque subjetivo, este método proporciona una visión estructurada del riesgo potencial antes de profundizar en el modelado detallado (León-Olivares et al., 2020; Zhu, 2024).

Por otro lado, la incertidumbre aleatoria —originada por falta de datos, errores de medición o eventos futuros impredecibles— requiere enfoques más sofisticados. En sectores como la energía eléctrica, esta incertidumbre se refleja en la demanda futura, los precios o la disponibilidad de recursos, afectando decisiones críticas de planificación (Ramos & Cerisola, 2016). En este contexto, la programación estocástica surge como alternativa al enfoque determinista. A diferencia de este último, asume que los parámetros no son conocidos con certeza, sino que siguen distribuciones probabilísticas. Este enfoque permite integrar explícitamente la incertidumbre en el modelo, aunque sin considerar necesariamente la aversión al riesgo del decisor, que podría reflejarse mediante métricas como la varianza o el coeficiente de variación (Arsham, 2018).

VIII.IV SUSTENTABILIDAD

La sustentabilidad se refiere a la capacidad a utilizar los recursos naturales de manera responsable, evitando su agotamiento y garantizando su disponibilidad para las generaciones futuras (Coelho, 2019). Lejos de frenar el progreso, propone un desarrollo que armonice crecimiento económico, cuidado ambiental y bienestar social (Calvente, 2007). En la gestión industrial actual, la sustentabilidad se ha vuelto una prioridad estratégica. Su implementación requiere:

1. Herramientas de evaluación económica, social y ambiental;

2. Indicadores precisos y datos confiables para medir el desempeño;
3. Una visión global que abarque toda la CS.

Frente a estos retos, las técnicas de optimización junto con otros enfoques analíticos permiten diseñar soluciones que equilibren productividad y sustentabilidad, impulsando el desarrollo industrial responsable (Zhang et al., 2014).

VIII.V ECONOMÍA CIRCULAR

El modelo económico lineal predominante —basado en extraer, producir, consumir y desechar— ha demostrado ser insostenible. En respuesta, la economía circular plantea una transformación funda del sistema productivo, guiada por el principio de las tres R: reducir, reutilizar y reciclar (Santinelli Ramos, 2020; Viles et al., 2020). Su objetivo es cerrar los ciclos económicos y ecológicos mediante el aprovechamiento continuo de los de recursos. Esto implica repensar el ciclo de vida de los productos: desde su diseño, producción, hasta su consumo, reciclaje, y reintegración como materia prima (Iyer-Raniga, 2019; Ribo, 2024). De esta forma, se reduce la generación de residuos, y la pérdida de agua, energía y materiales. La economía circular es aún un campo emergente, pero en rápida expansión. Representa un modelo económico con fuerte base ambiental y lógica de eficiencia, que redefine la manera en que se concibe el valor en los procesos productivos (Padilla-Rivera et al., 2024).

IX ANTECEDENTES

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos actuales, impulsado principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero, que provocan un aumento de las temperaturas globales y generan eventos climáticos extremos con consecuencias ambientales severas (Sagastume Gutiérrez et al., 2020). Ante esta crisis, la transición hacia fuentes de energía más sostenibles se ha vuelto prioritaria (Bui-Duy et al., 2023), entre las cuales destaca la bioenergía, generada a partir de materiales biológicos, como residuos agrícolas, forestales y orgánicos.

IX.I BIOCOMBUSTIBLES

Por otro lado, los biocombustibles pueden clasificarse según su estado físico: líquidos, gaseosos, y sólidos.

- ❖ Líquidos: incluyen biodiésel, bioetanol y bioturbosina. Son producidos por fermentación, transesterificación o pirólisis, utilizando aceites vegetales, grasas animales o cultivos ricos en azúcares (Trejo-Zamudio et al., 2019).
- ❖ Gaseosos: como el biohidrógeno y biogás derivados del metabolismo de microorganismos (Garrido-Romero, 2020).
- ❖ Sólidos: destacan las virutas, briquetas, astillas y pellets, producidos a partir de residuos lignocelulósicos como aserrín y virutas (Tauro et al., 2018; Ríos-Badrán et al., 2020).

Entre estos últimos, los pellets combustibles han ganado popularidad por su eficiencia energética, facilidad de transporte y bajo impacto ambiental. Son utilizados en sistemas de calefacción, calderas industriales y generación eléctrica (Forero Nuñez et al., 2012). Su ventaja principal es el aprovechamiento de residuos, contribuyendo a la economía circular y la reducción en el uso de combustibles fósiles (Hernandez De Lira et al., 2017; Pradhan et al., 2021).

IX.II VARIABLES CRÍTICAS EN LA PRODUCCIÓN DE PELLETS

La eficiencia del proceso depende tanto de las características de la biomasa como de las condiciones de procesamiento. Algunas variables clave son:

- ❖ Materia prima: tipo, contenido de lignina, humedad, tamaño de partícula y densidad (de Souza et al., 2020; Rajput et al., 2020; Ríos-Badrán et al., 2020).
- ❖ Condiciones de peletización: temperatura, presión y velocidad de alimentación (García Aramendiz, 2022).
- ❖ Propiedades finales: diámetro, longitud, contenido de cenizas y poder calorífico (Agar et al., 2018; Pegoretti Leite de Souza et al., 2021).

Diversos estudios han empleado residuos agroindustriales como materia prima, incluyendo cáscara de arroz, residuos del café y de la industria aceitera, soja, guisantes y residuos forestales (Zawiślak et al., 2020; Hernández-Neri et al., 2022).

IX.III CADENA DE SUMINISTRO Y OPTIMIZACIÓN

Además del proceso técnico, es indispensable considerar la eficiencia de la CS, abarcando desde la recolección de biomasa hasta la distribución de los pellets. La localización óptima de plantas, centros de acopio y rutas logísticas influye directamente en la rentabilidad y sostenibilidad del sistema (Baghizadeh et al., 2022; Vitale et al., 2022). Para enfrentar estos desafíos se han desarrollado modelos de programación MILP que optimizan variables estratégicas como:

- ❖ Ubicación de plantas de bioenergía (Tembo et al., 2003; Huang et al., 2010; Xie & Huang, 2018).
- ❖ Selección de proveedores y diseño de redes multinodales (You et al., 2012; Poudel et al., 2016).
- ❖ Logística de recolección y distribución (Ng & Maravelias, 2017; Martínez-Guido et al., 2021).

Estos modelos permiten integrar decisiones estratégicas, tácticas y operativas, contribuyendo a una implementación más eficiente y sostenible del sistema bioenergético.

Diversos estudios han explorado la planificación y optimización de cadenas de suministro enfocadas en la producción de pellets como fuente energética sostenible. Estas investigaciones han abordado una amplia gama de materias primas (como residuos forestales, agrícolas, subproductos industriales y cultivos energéticos), empleando herramientas de optimización matemática, análisis de sensibilidad, simulación de eventos discretos y modelos geoespaciales. La mayoría de los enfoques buscan minimizar los costos operativos y logísticos, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero o maximizar el rendimiento económico. Además, se consideran aspectos clave como la estacionalidad de la biomasa, la localización óptima de plantas de procesamiento, la calidad y cantidad del recurso disponible, así como las restricciones técnicas, legales y ambientales del contexto local (Batidzirai et al., 2006; Selkimäki et al., 2010; Mobini et al., 2013; Roni et al., 2014, 2019; Mansuy et al., 2015; Windisch et al., 2015; Ishii et al., 2016; Montgomery et al., 2016; Abdulrazik et al., 2017; Boukherroub et al., 2017; Sánchez-García et al., 2017; Albashabsheh & Heier Stamm, 2019; Martínez-Guido et al., 2019, 2021, 2023; Ahmadi et al., 2020; Agar et al., 2020; Soltero et al., 2020; Wang et al., 2020; X. Guo et al., 2020; Yun et al., 2020b; Aghalari et al., 2021; Duc et al., 2021; Zahraee et al., 2021; Aboytes-Ojeda et al., 2022; Vitale et al., 2022; Bui-Duy et al., 2023).

Estos trabajos han permitido destacar la complejidad de las cadenas de suministro de pellets y la necesidad de soluciones adaptadas a cada territorio. Más allá de los criterios económicos, las investigaciones también incorporan dimensiones sociales y ecológicas, reconociendo el papel de los pellets en la transición energética y el desarrollo sustentable. En conjunto, los hallazgos ofrecen información estratégica para el diseño de sistemas bioenergéticos eficientes, y evidencian la relevancia de enfoques integrales y multiescalares que permitan

articular la disponibilidad de materia prima, la infraestructura tecnológica y la demanda energética regional.

X JUSTIFICACIÓN

El cambio climático estrechamente ligado al aumento poblacional, la creciente demanda energética y la generación de residuos representa uno de los desafíos globales más urgentes (Forero Nuñez et al., 2012; Garrido-Romero, 2020; Silva-Hernández et al., 2020). Frente a este escenario, es prioritario transitar hacia fuentes más limpias y sostenibles.

La gestión de residuos, especialmente los de origen agroindustrial, es una estrategia clave en este proceso (Navarro-Puyuelo et al., 2017). Estos residuos representan una fuente valiosa de biomasa, que, puede ser transformada en productos energéticos de alto valor, como los pellets combustibles, reduciendo la dependencia a los combustibles fósiles y la presión sobre los recursos naturales (Trejo-Zamudio et al., 2019; Silva-Hernández et al., 2020). Este enfoque promueve la valorización de los residuos, entendida como el aprovechamiento energético o material, mediante procesos eficientes tanto en términos tecnológicos como logísticos. Sin embargo, el éxito de estos sistemas depende no sólo de la tecnología de conversión, sino también de una CS robusta y adaptable. Ésta debe garantizar la disponibilidad de biomasa en cantidad, calidad y tiempo adecuados, optimizando rutas de transporte y minimizando costos (Chopra & Meindl, 2016; Vitale et al., 2022).

En la operación, una CS es dinámica; es decir, presenta cambios en las cantidades y/o calidades de las biomasas, lo cual modifica la planificación de la recolección o adquisición oportuna de residuos agroindustriales. Incluso, pueden presentarse cambios en la selección de los proveedores, o en la proyección de la demanda. De allí que la cadena debe asegurar los suministros en tiempo y forma, reduciendo costos y minimizando la huella de carbono (EGUCHI et al., 2006; Ivanov & Sokolov, 2012; Chopra & Meindl, 2016; Zhu, 2024).

Uno de los principales retos en la operación de una CS para valorización de residuos es la variabilidad en la biomasa, influida por factores como la

estacionalidad, el tipo de cultivo, la ubicación geográfica y las condiciones de almacenamiento. Adicionalmente, existen fluctuaciones en la demanda del producto final, lo que requiere de una planeación dinámica y sensible al proceso (Aghalari et al., 2021; Abusaq et al., 2022; Vitale et al., 2022; Bui-Duy et al., 2023).

Por tanto, planificar una CS que incorpore la variabilidad temporal en la disponibilidad y demanda de biomasa es fundamental para lograr una gestión eficiente y sostenible. Este enfoque no sólo mejora la viabilidad de los sistemas de valorización, sino también impulsa la economía circular, promueve la generación de valor a partir de residuos y contribuye activamente a la mitigación del cambio climático.

XI DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los pellets combustibles son una fuente de energía renovable, utilizada tanto para la calefacción como para la generación de electricidad. Se obtienen principalmente de biomasa residual que, a pesar de su bajo costo, generalmente está dispersa geográficamente representando un reto logístico importante (Yun et al., 2020a; Wu et al., 2022). Por lo tanto, no es suficiente simplemente optimizar el proceso de producción: es fundamental diseñar una CS eficiente, capaz de proporcionar un flujo continuo y sostenible de materias primas. Sin embargo, muchos modelos de cadena de suministro para pellets disponibles hoy en día consideran que las características de la biomasa, la demanda y la disponibilidad permanecen constantes en el tiempo (Albashabsheh & Heier Stamm, 2019; Martínez-Guido et al., 2019; Wang et al., 2020; Aghalari et al., 2021; Zahraee et al., 2021; Vitale et al., 2022; Bui-Duy et al., 2023). Estas suposiciones son inconsistentes con la realidad operativa, donde dichos valores pueden fluctuar debido a razones estacionales, logísticas y técnicas, por lo tanto, podrían tener grandes repercusiones en la sostenibilidad económica y ambiental del sistema (Hughes et al., 2014; Abusaq et al., 2022).

En consecuencia, existe la necesidad de modelar la CS que considere la naturaleza dinámica de estas variables, especialmente en contextos donde se emplean residuos agroindustriales como materia prima. Ignorar estas variaciones puede llevar a decisiones subóptimas o poco realistas (An et al., 2011; Hughes et al., 2014). Este trabajo propone analizar el impacto de los cambios temporales en las variables clave del proceso de peletizado, como la composición de la biomasa y los rendimientos del proceso, para incorporar esta dinámica en un modelo más realista. Con ello, se espera mejorar la precisión de las proyecciones y fortalecer la toma de decisiones estratégicas en la valorización de residuos para la producción de pellets combustibles.

XII HIPÓTESIS

La inclusión de variables dinámicas en el modelado matemático de las cadenas de suministro para la producción de pellets combustibles permitirá generar soluciones con una disminución del 10% en los objetivos económicos, sociales, y un aumento del 10% en los objetivos ambientales, con respecto a aquellas que no las consideran.

XIII. OBJETIVOS

XIII.I OBJETIVO GENERAL

Diseñar la calendarización dinámica en una cadena de abastecimiento de pellets combustibles incluyendo variabilidad en la demanda, estacionalidad y composición de la biomasa, condiciones operacionales, y logística.

XIII.II OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Realizar una revisión bibliográfica con respecto a planificación, modelos subrogados, modelos dinámicos.
- ❖ Realizar un análisis de los residuos agrícolas en el estado de Querétaro, incluyendo volúmenes generados, y localización de éstos para integrar una base de datos.
- ❖ Identificar los principales residuos generados para su valorización a pellets combustibles, involucrando aspectos de disponibilidad y composición química.
- ❖ Establecer la superestructura que represente todas las posibles soluciones del problema planteado.
- ❖ Generar un modelo matemático de referencia que sirva como base para validar los resultados del modelo dinámico, integrando las variables relevantes.
- ❖ Generar un modelo matemático en el que se agreguen variables dinámicas como estacionalidad, variabilidad en la demanda, cambios en la composición de los residuos seleccionados a través del tiempo, incertidumbre en la disponibilidad y rendimientos.
- ❖ Codificación de los modelos en GAMS y optimización multiobjetivo (minimización de emisiones y costos totales y maximización de beneficio social).
- ❖ Análisis de resultados de las CS sustentables aplicadas a la valorización de residuos para la producción de pellets combustibles a nivel estatal,

considerando todas las variables dinámicas mencionadas en el objetivo anterior.

- ❖ Escritura de documentos derivados de la investigación, incluida la tesis.

XIV METODOLOGÍA

La metodología seguida para el desarrollo de esta investigación se estructuró en las siguientes etapas:

- ❖ Revisión bibliográfica especializada, centrada en modelos de planificación, subrogación y modelado dinámico en cadenas de suministro de biomasa. Esta revisión permitió identificar los fundamentos teóricos, los avances recientes y los vacíos en el conocimiento que fundamentan la presente propuesta.
- ❖ Caracterización de residuos agrícolas generados en el estado de Querétaro, considerando volumen, temporalidad y localización, con el objetivo de construir una base de datos robusta para alimentar el modelo.
- ❖ Selección de residuos valorizables, identificando aquellos con mayor potencial para la producción de pellets combustibles, con base en su disponibilidad y características fisicoquímicas.
- ❖ Formulación de la superestructura del sistema, integrando todas las posibles configuraciones y rutas que podrían adoptarse en la cadena de suministro. Para ello se consideró desde las áreas de cultivo, la cantidad producida de residuos por cultivo y lugar, para posteriormente poder ser tratados de acuerdo a alguna de las tres opciones consideradas en el modelo, las cuales son quema de residuos, envío a vertederos y la integración de los residuos a la cadena de valor, si son enviados en este último se proceden a llevarse a los almacenes instalados de acuerdo a lo que indique el modelo con su respectiva capacidad y ubicación, los almacenes considerados pueden ser con implementación de tecnología para el control de la temperatura y humedad o sin tecnología donde se tiene solo el almacén de los residuos sin ningún control de las variables del entorno, seguido a ello los residuos son transportados a las plantas de pellets ubicadas e instaladas de acuerdo a la capacidad que el

modelo decida donde se procederá al procesamiento de la materia prima (residuos) a pellets para finalmente ser transportados a la central eléctrica de ciclo combinado en el estado, El Sauz, donde se procederá a su combustión y generación de energía la cual ya será suministrada por la central eléctrica.

- ❖ Desarrollo del modelo matemático estático y dinámico, integrando variables en este último como estacionalidad, variabilidad en la demanda, cambios en la composición, incertidumbre en la disponibilidad y rendimientos de biomasa. Para integrar estos cambios en el modelo dinámico se consideraron variables que representan la variabilidad de los residuos almacenados a través del tiempo en tanto sus respectivos rendimientos con el paso del tiempo, así como la estacionalidad y ciclo de cada cultivo, además de integrar el cambio de la demanda por mes en cada sector en la industria eléctrica (Residencial, agrícola, comercial, industria y negocios de mediana tensión —NMT—, alumbrado público e industria) del estado de Querétaro. Por otro lado, el modelo estático carece de estas consideraciones por lo cual servirá como base para la comparación entre los resultados obtenidos de cada uno.
- ❖ Evaluación de sostenibilidad, mediante un análisis integral de los resultados obtenidos, considerando aspectos económicos, sociales y ambientales asociados a la cadena de suministro propuesta. Lo anterior mediante la codificación y optimización multiobjetivo en el entorno GAMS.
- ❖ Análisis y discusión de resultados, evaluando la resiliencia del sistema ante diversos escenarios, y comparando los resultados obtenidos con modelos dinámicos y estáticos para valorar la influencia de la variabilidad.
- ❖ Documentación y diseminación, mediante la elaboración de tesis, artículos en revistas científicas indexadas (JCR), y materiales de

divulgación, con el fin de contribuir al avance del conocimiento en el campo de los biocombustibles sólidos.

XIV.I ESTUDIO DE CASO

Este estudio de caso se centra en la configuración de la cadena de suministro de producción de pellets combustibles a partir de residuos agroindustriales generados en el estado de Querétaro. Esto mediante el diseño y aplicación de un modelo de optimización matemática el cual considera distintas etapas del sistema, incluyendo:

- ❖ Origen y localización geográfica de los cultivos,
- ❖ Vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU),
- ❖ Costos asociados a la quema de residuos,
- ❖ Almacenamiento y procesamiento de la biomasa,
- ❖ Producción de los pellets combustibles,
- ❖ Distribución a la central generadora de electricidad.

Este estudio de caso se enfoca principalmente en el análisis de la CS aplicada a la valorización de los residuos de jitomate para la producción de pellets combustibles. La elección se sustenta debido a tres consideraciones principales.

- ❖ Disponibilidad y volumen: Aunque los residuos de jitomate ocupan el quinto lugar en generación a nivel estatal (**Tabla 2**), su aprovechamiento es casi nulo en comparado con los cuatro principales residuos (destinados prioritariamente a forraje) generados en el estado. Mientras el maíz y la alfalfa cuentan con mercados consolidados en la ganadería (Gutiérrez Núñez, 2023; Jolalpa Barrera et al., 2009), los residuos de jitomate carecen de aplicaciones a escala industrial, generando problemas de disposición final (Rossini et al., 2013).

Tabla 2. Listado de residuos con mayor generación en el estado de Querétaro (SIAP, 2023).

No	Nombre	Tipo	Prod. anual [ton]	Prod. residuos [ton]
1	Maíz forrajero en verde s/clasificar	Herbáceo	640,332.78	544,282.9
2	Alfalfa verde s/clasificar	Herbáceo	579,222.06	492,338.8
3	Maíz grano blanco	Herbáceo	240,273.72	204,232.7
4	Avena forrajera en verde s/clasificar	Herbáceo	115,488.98	98,165.6
5	Tomate rojo (jitomate) saladette	Herbáceo	91,637.59	10,080.1

- ❖ Beneficios ambientales y económicos: La conversión a pellets mitigaría dos problemas críticos como lo son la contaminación por descomposición y el cambio climático. Los residuos de jitomate emiten biogás —mezcla entre metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2)—, generado por la degradación anaeróbica de residuos orgánicos al ser depositados en vertederos, contribuyendo al calentamiento global (Kunak, 2025); al valorizar dichos residuos este aspecto puede reducirse. Además, se podría generar una oportunidad de economía circular al integrar un subproducto de la industria alimentaria a cadenas de valor energéticas, reduciendo de esta manera algunos costos (Monroy Garduño et al., 2023).
- ❖ Propiedades técnicas para peletización: Estudios recientes demuestran que los residuos de jitomate poseen características ideales para densificación energética, debido a que poseen un alto poder calorífico (15.15 MJ/kg) —análisis llevado a cabo por el Laboratorio de Innovación y Evaluación en Bioenergía de la UNAM— tan solo de la materia sin densificar, cumpliendo con el estándar establecido de acuerdo a la ISO-17225-6 (ISO, 2021c) para pellets producidos a partir de residuos agroindustriales.

Particularmente, en el modelo cada uno de los municipios del estado de Querétaro se representa por el índice “i” =1-13, para el análisis del caso de estudio y más delante de 1-18. De igual manera, se asignan índices específicos para actividades como almacenamiento (“m”), procesamiento (“k”) y consumo (“o/u”). La

planificación se lleva a cabo en un horizonte semanal (“ t ” = 1-52) para el desarrollo del estudio de caso, cambiando este horizonte a meses (“ t ” = 1-12) en el modelo dinámico. El modelo incluye la estimación de emisiones contaminantes, específicamente de CO_2 y factores del Índice de Desarrollo Humano (IDH) asociado a los sectores de educación, salud y desarrollo. En la **Figura 2** se representa los límites del modelo considerado, así como todas las partes que lo conforman, además de los posibles escenarios a desarrollarse.

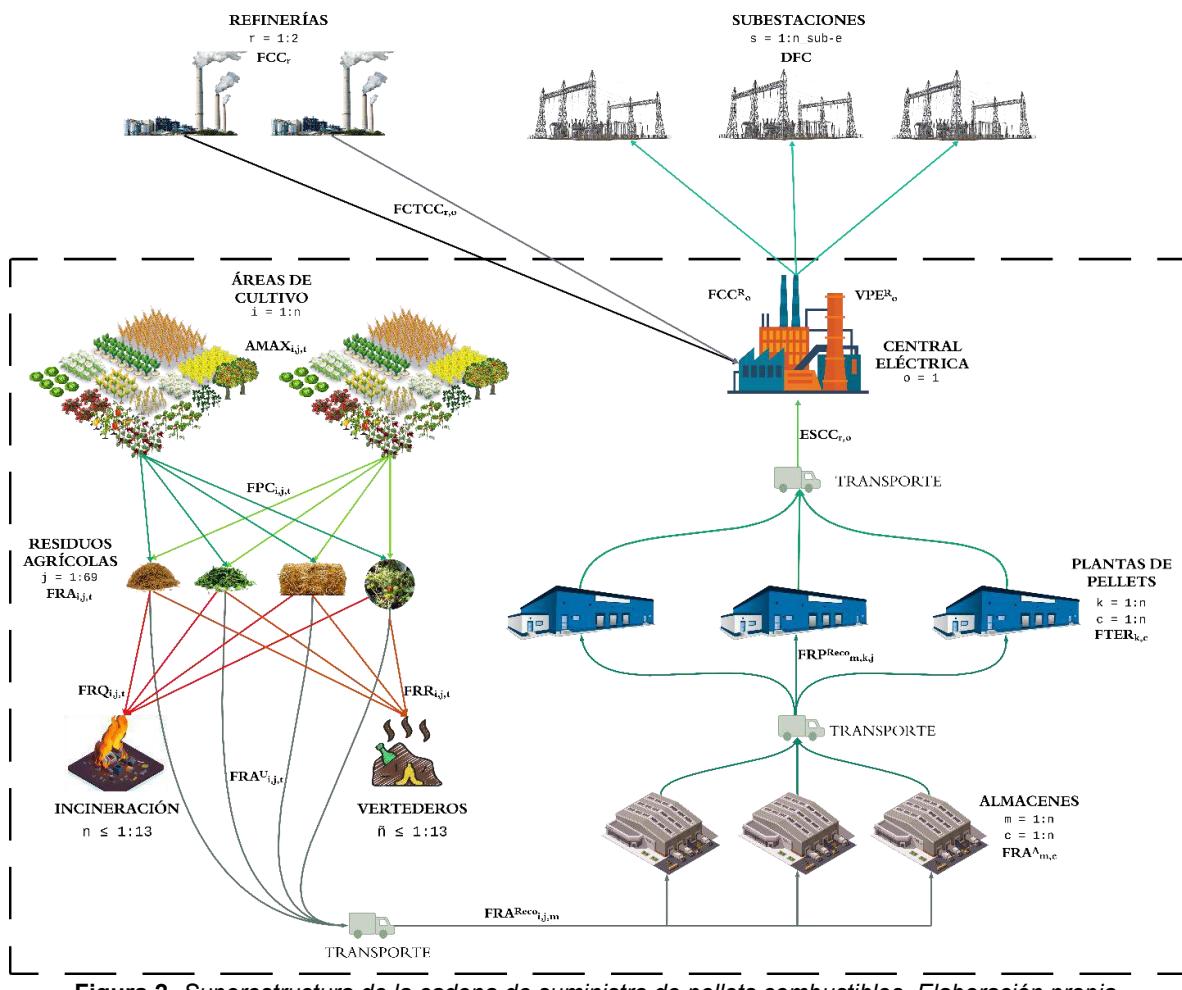


Figura 2. Superestructura de la cadena de suministro de pellets combustibles. Elaboración propia.

XIV.II SELECCIÓN Y FILTRADO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS

Para sustentar el modelo, se utilizó el reporte de cierre agrícola para el (2023) del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), que registró

un total de 77 cultivos en el estado. Se aplicaron dos filtros sucesivos para seleccionar residuos viables:

1. Filtro por categoría agrícola. Priorizando el cultivo de jitomate como biomasa principal, por lo que se acotó la selección de residuos generados por los cultivos de tipo herbáceo, categoría que agrupa cultivos con características agronómicas y logísticas similares. Esta restricción redujo el conjunto a 57 cultivos.
2. Filtro por volumen mínimo. Se estableció un umbral de 100 toneladas anuales como requisito mínimo de generación de residuos con el fin de asegurar un suministro suficiente para procesos de escala industrial. Tras aplicar este criterio, se seleccionaron 47 cultivos, cuya producción conjunta alcanza 1,935,311.6 toneladas por año.

La siguiente lista muestra los cultivos considerados, y ordenados de mayor a menor generación de residuos:

- | | |
|--|---|
| 1. Maíz forrajero en verde s/clasificar | 12. Pepino americano chino |
| 2. Alfalfa verde s/clasificar | 13. Brócoli s/clasificar |
| 3. Maíz grano blanco | 14. Cebolla blanca |
| 4. Avena forrajera en verde s/clasificar | 15. Espárrago s/clasificar |
| 5. Tomate rojo (jitomate) saladette | 16. Pastos y praderas s/clasificar |
| 6. Triticale forrajero en verde s/clasificar | 17. Sorgo forrajero en verde s/clasificar |
| 7. Chile verde morrón (bell pepper) | 18. Chile verde jalapeño |
| 8. Lechuga romana | 19. Zanahoria nantes |
| 9. Pastos y praderas rye grass | 20. Pastos y praderas ballico |
| 10. Cebada grano s/clasificar | 21. Triticale grano s/clasificar |
| 11. Tomate verde s/clasificar | 22. Coliflor s/clasificar |
| | 23. Tomate rojo (jitomate) bola |
| | 24. Elote s/clasificar |
| | 25. Hongos champiñones |

- | | |
|------------------------------------|--|
| 26. Ajo blanco | 38. Chile verde serrano |
| 27. Apio s/clasificar | 39. Jícama s/clasificar |
| 28. Pepino pickle | 40. Tomate rojo (jitomate)
s/clasificar |
| 29. Sorgo grano s/clasificar | 41. Garbanzo forrajero s/clasificar |
| 30. Nopalitos s/clasificar | 42. Chile seco pasilla |
| 31. Calabacita italiana (zucchini) | 43. Trigo grano fuerte |
| 32. Trigo grano suave | 44. Tomate rojo (jitomate) |
| 33. Chile verde chilaca | 45. Frijol pinto saltillo |
| 34. Espinaca s/clasificar | 46. Calabacita s/clasificar |
| 35. Pastos y praderas Rhodes | 47. Frijol flor de mayo |
| 36. Frijol otros claros | |
| 37. Zanahoria s/clasificar | |

Estos cultivos representan una base sólida y representativa de biomasa para el análisis y diseño del modelo de CS, garantizando viabilidad técnica, económica y ambiental.

XV RESULTADOS Y DISCUSIÓN

XVI. I ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE JITOMATE BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO

Para evaluar la viabilidad de los residuos de jitomate como materia prima en la producción de pellets combustibles, se estudió su comportamiento bajo tres condiciones ambientales distintas:

- 1) Intemperie: Exposición al ambiente (cuarto de laboratorio) sin control de temperatura o humedad. La variación de la temperatura ambiente tuvo un rango entre 14.1 °C – 26.6 °C mientras que la humedad entre 46%-99%.
- 2) Condiciones controladas: Temperatura constante de 26 °C y humedad relativa del 60%.
- 3) Congelamiento: Almacenamiento a -20 °C.

Estas condiciones buscan simular escenarios reales de almacenamiento y evaluar la degradación del material, la pérdida de masa y los cambios en su composición química. Las altas temperaturas aceleran la degradación microbiana y la pérdida de compuestos volátiles, mientras que la congelación puede afectar la estructura celular y la liberación de líquidos celulares al descongelarse(Crohn & Valenzuela-Solano, 2003; Smidt & Lechner, 2005). La información obtenida permitirá determinar el método de conservación más adecuado para los residuos de tomate, optimizando su uso en la producción de pellets combustibles. En la búsqueda de optimizar la calidad de la biomasa resultante, se torna indispensable la consideración de diversos aspectos técnicos intrínsecos al proceso (Correa-Méndez et al., 2014; Hernández-Neri et al., 2022).

XV.I.I Metodología del análisis

El estudio inició con la recolección de los residuos de jitomate del invernadero 5,000 m² ubicado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala. Éstos fueron trasladados al Campus Juriquilla, registrando su peso inicial utilizando una báscula digital comercial (marca RHINO, capacidad de 20 kg). Posteriormente, el material disponible se dividió en tres lotes, cada uno sometido a una de las condiciones de almacenamiento a analizar: intemperie, condiciones controladas y congelamiento. El monitoreo se realizó cada tercer día, midiendo la pérdida de peso hasta que esta se estabilizó, es decir, hasta que no se observaron cambios significativos entre las tres mediciones consecutivas.

La evolución visual del material a lo largo del tiempo se presenta en la **Tabla 3**, mientras que los datos obtenidos se documentaron en la **Tabla 44** y su degradación se pude apreciar en la gráfica de la **Figura 3**. Este enfoque permitió cuantificar y comparar la degradación de los residuos bajo cada ambiente, proporcionando información clave para el modelo matemático con enfoque dinámico.

Tabla 3. Seguimiento fotográfico de residuos de jitomate.

Días	Congelador	Intemperie	Condiciones controladas	Días	Congelador	Intemperie	Condiciones controladas
0				6			
3				7			
10							

Tabla 4. Tabla de seguimiento temporal de residuos: cambios en peso y porcentaje de pérdida.

Condiciones	Días	Peso [kg]	%W _{per}	Condiciones	Días	Peso [kg]	%W _{per}
Escenario 1		1.074		Escenario 1		1.040	3.17
Escenario 2	0	1.074		Escenario 2	51	0.120	88.83
Escenario 3		1.064		Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.036	3.54	Escenario 1		1.040	3.17
Escenario 2	3	0.818	23.84	Escenario 2	55	0.120	88.83
Escenario 3		0.862	18.98	Escenario 3		0.106	90.04
Escenario 1		1.032	3.91	Escenario 1		1.038	3.35
Escenario 2	6	0.658	38.73	Escenario 2	58	0.118	89.01
Escenario 3		0.734	31.02	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.032	3.91	Escenario 1		1.040	3.17
Escenario 2	9 (hongos)	0.504	53.07	Escenario 2	62	0.120	88.83
Escenario 3		0.638	40.04	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		0.982	8.57	Escenario 1		1.036	3.54
Escenario 2	12	0.342	67.78	Escenario 2	66	0.118	89.01
Escenario 3		0.524	51.13	Escenario 3		0.106	90.04
Escenario 1		1.034	3.72	Escenario 1		1.034	3.72
Escenario 2	16	0.266	75.23	Escenario 2	69	0.118	89.01
Escenario 3		0.446	58.08	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.038	3.35	Escenario 1		1.034	3.72
Escenario 2	21	0.188	82.50	Escenario 2	72	0.118	89.01
Escenario 3		--	--	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.040	3.17	Escenario 1		1.032	3.91
Escenario 2	23	0.164	84.73	Escenario 2	80	0.120	88.83
Escenario 3		0.316	70.30	Escenario 3		0.106	90.04
Escenario 1		1.040	3.17	Escenario 1		1.030	4.10
Escenario 2	27	0.126	88.27	Escenario 2	87	0.122	88.64
Escenario 3		0.250	76.50	Escenario 3		0.112	89.47
Escenario 1		1.044	2.79	Escenario 1		1.028	4.28
Escenario 2	30	0.122	88.64	Escenario 2	90	0.118	89.01
Escenario 3		0.210	80.26	Escenario 3		0.106	90.04
Escenario 1		1.074	2.61	Escenario 1		1.028	4.28
Escenario 2	34	1.074	88.83	Escenario 2	94	0.120	88.83
Escenario 3		1.064	84.77	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.036	1.68	Escenario 1		1.026	4.47
Escenario 2	37	0.818	88.83	Escenario 2	99	0.118	89.01
Escenario 3		0.862	87.78	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.032	2.61	Escenario 1		1.026	4.47
Escenario 2	41 (materia seca)	0.658	88.83	Escenario 2	101	0.118	89.01
Escenario 3		0.734	89.66	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.042	2.98	Escenario 1		1.026	4.47
Escenario 2	45	0.118	89.01	Escenario 2	104	0.118	89.01
Escenario 3		0.106	90.04	Escenario 3		0.104	90.23
Escenario 1		1.042	2.98	Escenario 1		1.026	4.47
Escenario 2	48	0.120	88.83	Escenario 2	107	0.118	89.01
Escenario 3		0.104	90.23	Escenario 3		0.104	90.23

Donde: Escenario 1: Congelador; Escenario 2: Intemperie; Escenario 3: Control.

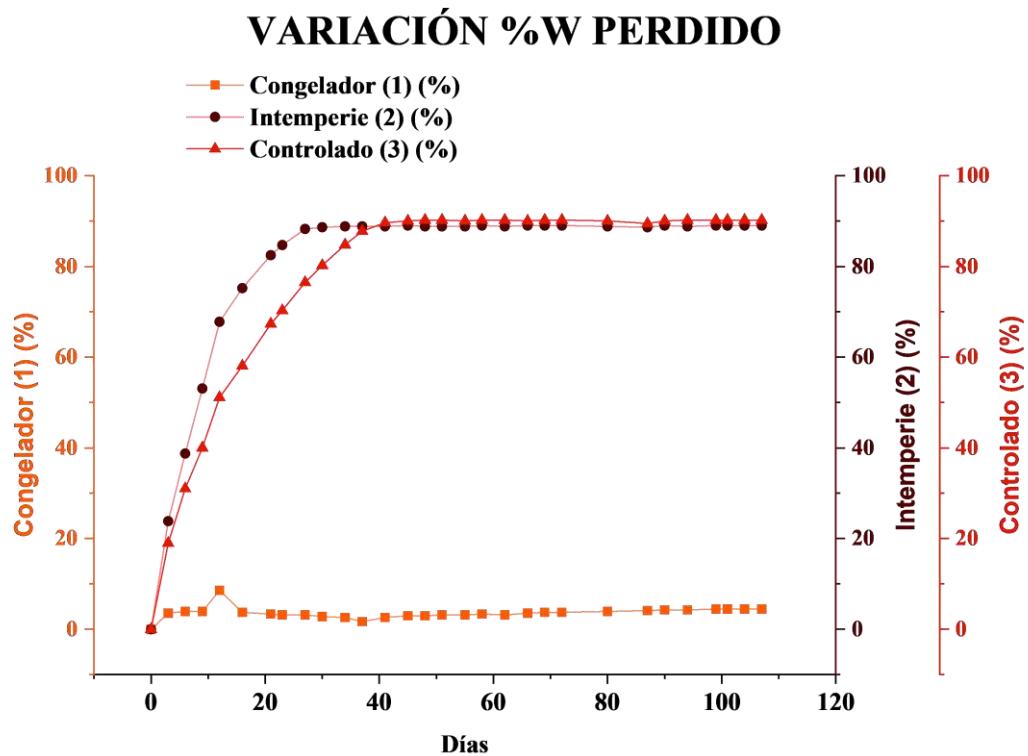


Figura 3. Degradación de los residuos de jitomate a través del tiempo

XV.I.II Resultados obtenidos

1) Intemperie: Pérdida de peso del 89.01%, con secado progresivo del material empezando, confirmando su secado total en la cuadragésima primera pesada. También hubo crecimiento de hongos mostrada a partir de la novena pesada.

2) Condiciones controladas: Pérdida de peso del 90.23%, mostrando un comportamiento similar al de intemperie, pero con una mayor presencia de hongos más uniforme.

3) Congelamiento: Pérdida de peso mínima del 4.47%. El material conservó su color verde y su peso sin cambios significativos, lo que indicó una alteración mínima en su estado.

XV.I.III Selección de escenarios

Dado que el congelamiento no promovió la reducción de humedad necesaria para el proceso de peletización y solidificó totalmente la materia,

este escenario se descartó para el modelo dinámico. Así, el análisis se centró únicamente en la consideración del almacenamiento con condiciones temperatura y humedad controladas, y sin control (intemperie). Estos resultados permitirán integrar la degradación natural del material bajo diferentes entornos operativos en el modelo matemático.

XV.II MODELO MATEMÁTICO ESTÁTICO: METODOLOGÍA I

El modelo de optimización estático desarrollado evalúa el impacto ambiental, económico y social derivado de la integración de la CS para la producción de pellets combustibles a partir de los residuos agrícolas en cada uno de los 13 municipios del estado de Querétaro con producción de jitomate para el estudio de caso.

BALANCES DE MATERIALES

Las ecuaciones (1)-(2) modelan la generación de residuos agrícolas ($FRA_{i,j,t}$) a partir de la superficie cultivada—en hectáreas— ($ACC_{i,j,t}$) de cada uno de los municipios (i), y los factores de rendimiento ($YR_{i,j,t}, RG_j$) de cada tipo de cultivo (j). Se diferencian tres destinos para los residuos: quema, disposición en vertederos o aprovechamiento como materia prima en la producción de pellets combustibles, balances representados en las ecuaciones (3)-(4).

$$FPC_{i,j,t} = ACC_{i,j,t} * YR_{i,j,t} \quad \forall \quad i \in I, j \in J, t \in T \quad (1)$$

$$FRA_{i,j,t} = FPC_{i,j,t} * RG_j \quad \forall \quad i \in I, j \in J, t \in T \quad (2)$$

$$FRA_{i,j,t} = FRA_{i,j,t}^U + FRST_{i,j,t} \quad \forall \quad i \in I, j \in J, t \in T \quad (3)$$

$$FRST_{i,j,t} = FRQ_{i,j,t} + FRR_{i,j,t} \quad \forall \quad i \in I, j \in J, t \in T \quad (4)$$

El valor del área sembrada para cada cultivo por semana se calculó a partir de los datos reportados por el informe de cierre agrícola para Querétaro del 2023 (SIAP, 2023), donde se reporta la cantidad de área sembrada (ha) y

el rendimiento de producción para cada cultivo, así como para cada municipio. Los factores de generación de residuos orgánicos fueron obtenidos a partir de los datos reportados por la investigación de Martínez-Guido et al. (2021).

Posteriormente, las ecuaciones (5)–(7C) modelan el traslado de residuos ($FRA_{i,j,m}^{\text{Reco}}$) desde su punto de origen (i) a los centros de almacenamiento (m), considerando múltiples capacidades (c) para las bodegas, que se activan mediante la variable binaria ($X_{c,m}^1$). Cabe mencionar que las diferentes capacidades de almacenamiento fueron consideradas a partir del informe de cierre agrícola para Querétaro del 2023 (SIAP, 2023), tomando como capacidad máxima el flujo neto de residuos. Así mismo, los cálculos para la determinación de los costos fijos y variables para las plantas consideradas se muestran en el [Anexo 1](#).

$$\sum_t FRA_{i,j,t}^U = \sum_m FRA_{i,j,m}^{\text{Reco}} \quad \forall \quad i \in I, j \in J \quad (5)$$

$$FRR_{m,j}^A = \sum_i FRA_{i,j,m}^{\text{Reco}} \quad \forall \quad j \in J, m \in M \quad (6)$$

$$\sum_c X_{c,m}^1 \leq 1, \quad \forall \quad m \in M \quad (7A)$$

$$\sum_j FRR_{m,j}^A = \sum_c FRA_{c,m}^A, \quad \forall \quad m \in M \quad (7B)$$

$$ICA_{c,m} * X_{c,m}^1 \leq FRA_{c,m}^A \leq SCA_{c,m} * X_{c,m}^1 \quad \forall \quad c \in C, m \in M \quad (7C)$$

Los límites establecidos como ($ICA_{c,m}$) y ($SCA_{c,m}$) se muestran en la

Tabla 5.

Tabla 5. Límites superior e inferior de los almacenes instalados.

CAPACIDAD					
	[ton/año]				
(SCA _{c,m})	1,000	3,480	5,960	8,440	10,920
(ICA _{c,m})	0	1,001	3,481	5,961	8,441

Las ecuaciones (8) – (10) representan el flujo desde los almacenes (m) hasta las biorrefinerías (k), donde se realiza el procesamiento —triturado, homogenización, peletizado y tamizado—. La producción de pellets (VP_k^P) se calcula multiplicando el flujo de materia prima disponible ($FRR_{k,j}^P$) por un factor de rendimiento específico (PCR_j). Los factores de rendimiento por generación de pellets fueron obtenidos a partir de la experimentación para la producción de pellets llevados a cabo en el Laboratorio de Caracterización y Síntesis de Procesos del grupo PSPB. De igual manera que en el intercambio de flujos de las áreas de cultivo al almacén se establece la restricción de viaje.

$$FRR_{m,j}^A = \sum_k FRR_{m,k,j}^{\text{Reco}} \quad \forall \quad m \in M, j \in J \quad (8)$$

$$FRR_{k,j}^P = \sum_m FRR_{m,k,j}^{\text{Reco}} \quad \forall \quad k \in K, j \in J \quad (9)$$

$$VP_k^P = \sum_j FRR_{k,j}^P * PCR_j \quad \forall \quad k \in K \quad (10)$$

Específicamente, las ecuaciones (11A) – (11C) indican el ciclo para determinar la instalación de las biorrefinerías, que está restringido por la disponibilidad de residuos a transformar, ($ICP_{k,c}$) y ($SCP_{k,c}$), el flujo total de materia prima es multiplicado por la variable binaria ($X_{k,c}^2$). Los cálculos para la determinación de los costos fijos y variables para las plantas consideradas se muestran en el [Anexo 1](#).

$$\sum_c X_{k,c}^2 \leq 1, \quad \forall k \in K, \quad (11A)$$

$$\sum_j FRR_{k,j}^P = \sum_c FTMPR_{k,c} \quad \forall k \in K \quad (11B)$$

$$ICP_{k,c} * X_{k,c}^2 \leq FTMPR_{k,c} \leq SCP_{k,c} * X_{k,c}^2 \quad \forall c \in C, k \in K \quad (11C)$$

Los límites establecidos como $(ICP_{k,c})$ y $(SCP_{k,c})$ se muestran en la

Tabla 6.

Tabla 6. Límites superior e inferior de las plantas de pellets instaladas.

CAPACIDAD					
[ton/año]					
$(SCP_{k,c})$	1,000	3,480	5,960	8,440	10,920
$(ICP_{k,c})$	0	1,001	3,481	5,961	8,441

XV.II.I DEMANDA ENERGÉTICA

La demanda energética por municipio se estima con base en la población (PTR_s^{FC}) , en cada uno, reportada por el INEGI (2022) y los factores de consumo (FCM_s^{FC}) en [MJ/habitante] reportados por la SENER (2024), mediante las ecuaciones (12) - (13). Esta demanda puede ser cubierta con pellets VPP_o^R o combustibles convencionales FCC_o^R , según la disponibilidad y sus respectivos poderes caloríficos (FEC_o, FE_o) reportados por la SENER (2023) y Martínez-Guido et al. (2021). Las ecuaciones (14) – (15) representan la logística de distribución de ambos tipos de energía a los centros de consumo.

$$FCC_r = \sum_o FCTCC_{r,o} \quad \forall r \in R \quad (12)$$

$$FCC_o^R = \sum_r FCTCC_{r,o} \quad \forall o \in O \quad (13)$$

$$VP_k^P = \sum_o ESCC_{k,o} \quad \forall \quad k \in K \quad (14)$$

$$PCE_o^D = \sum_k ESCC_{k,o} \quad \forall \quad o \in O \quad (15)$$

$$DFC_o = PTR_o^{FC} * FCM_o^{FC} \quad \forall \quad o \in O \quad (16)$$

$$ED_o = FCC_o^R * FEC_o + PCE_o^D * FE_o \quad \forall \quad o \in O \quad (17)$$

$$ED_o \geq DFC_o \quad \forall \quad o \in O \quad (18)$$

XV.II.II COSTOS

El modelo considera los siguientes costos:

Costos por la cadena propuesta:

- ❖ Capital por infraestructura: instalación de bodegas y plantas, considerando costos fijos ($CF_{c,m}^A$) y costos variables ($CV_{m,c}^A$) (Ecuaciones [19-20](#)).
- ❖ Transporte: residuos agrícolas (CTR_m), materia prima ($CTMP_k$) y pellets (CTP_o). Cada flujo de materia para sus respectivos balances es multiplicado por sus respectivos factores considerados para el cálculo de transporte de acuerdo con lo reportado por Tauro et al. (2022); en donde se consideran las distancias entre cada nodo, precio por compra del combustible para el camión de carga (PDC), así como el consumo específico (CEsp) y capacidad de carga del camión (CCT). Para este caso en específico se considera un camión con capacidad de 14 toneladas por viaje (Ecuaciones [21-23](#)).

Comparativo con energía convencional:

- ❖ Transporte: Desde las dos refinerías consideradas (Ref. Tula y Ref. Salamanca) hacia la central eléctrica ($CTFCC_o$), así como el transporte por los residuos ($CTRR_i$) en caso de mandarse al relleno sanitario (Ecuaciones [24-25](#)).
- ❖ Penalizaciones por manejo de residuos: Ya sea por quema (CQR_i) o por uso de rellenos sanitarios (CUR_i) (Ecuaciones [26-27](#)).
- ❖ Pago a agricultores ($CTDA$) por el uso de residuos como materia prima (Ecuación [28](#)).
- ❖ Costos totales de cada configuración o escenario evaluado agrupada por transporte (CTT^{CP} y CTT^{CN}), capitales ($CTCC$), tratamientos convencionales de residuos ($CTTrR$) (Ecuaciones [29-32](#)).

$$CC_{c,m}^A = CF_{c,m}^A * X_{c,m}^1 + CV_{c,m}^A * FRA_{c,m}^A \quad \forall \quad c \in C, m \in M \quad (19)$$

$$CC_{c,k}^P = CF_{c,k}^P * X_{c,k}^2 + CV_{c,k}^P * FTMPR_{c,k} \quad \forall \quad c \in C, k \in K \quad (20)$$

$$CTR_m = \sum_{i,j} FRA_{i,j,m}^{\text{Reco}} * D_{i,m}^1 * PDC * 1.8 * CEsp * \frac{1}{0.38 * CCT} \quad \forall \quad m \in M \quad (21)$$

$$CTMP_k = \sum_{m,j} FRP_{m,k,j}^{\text{Reco}} * D_{m,k}^2 * PDC * 1.8 * CEsp * \frac{1}{0.38 * CCT} \quad \forall \quad k \in K \quad (22)$$

$$CTP_o = \sum_k ESCC_{k,o} * D_{k,o}^3 * PDC * 1.8 * CEsp * \frac{1}{0.38 * CCT} \quad \forall \quad o \in O \quad (23)$$

$$CTRR_i = \sum_{i,a,j} FRR_{i,j,t} * D_{i,m}^0 * PDC * 1.8 * CEsp * \frac{1}{0.38 * CCT} \quad \forall \quad i \in I \quad (24)$$

$$CTFCC_o = \sum_r FCTCC_{r,o} * PMGN \quad \forall \quad o \in O \quad (25)$$

$$CQR_i = \sum_{j,t} FRQ_{i,j,t} * \text{PMQR} \quad \forall \quad i \in I \quad (26)$$

$$CUR_i = \sum_{j,t} FRR_{i,j,t} * \text{PUR} \quad \forall \quad i \in I \quad (27)$$

$$CTDA = \sum_{i,j,t} FRA_{i,j,t}^U * \text{PC} \quad (28)$$

$$CTT^{CP} = \sum_m CTR_m + \sum_k CTMP_k + \sum_o CTP_o \quad (29)$$

$$CTT^{CN} = \sum_o CTFCC_o \quad (30)$$

$$CTCC = \sum_{c,m} CC_{c,m}^A + \sum_{k,c} CC_{k,c}^P \quad (31)$$

$$CTTrR = \sum_i CQR_i + \sum_i CUR_i + \sum_i CTRR_i \quad (32)$$

XV.II.III GANANCIAS

Las ganancias provienen de:

- ❖ La venta de bioenergético (GPV_o) producido (Ecuación 33).
- ❖ El ingreso por manejo de residuos (GMR_i), al fungir como alternativa al vertedero (Ecuación 34).

$$GPV_o = PCE_o^D * \text{PV} \quad \forall \quad o \in O \quad (33)$$

$$GMR_i = \sum_{j,t} FRA_{i,j,t}^U * \text{CMRO} \quad \forall \quad i \in I \quad (34)$$

XV.II.IV RENDIMIENTO ECONÓMICO

La ecuación 35 calcula el beneficio neto (*Profit*) considerando ingresos (GPV_o y GMR_i), costos totales (CTT^{CP} , CTT^{CN} , $CTCC$, $CTTrR$) y pagos a proveedores capitales ($CTDA$).

$$\text{Profit} = \sum_o GPV_o + \sum_i GMR_i - CTDA - CTT^{CP} - CTCC - CTT^{CN} - CTTrR \quad (35)$$

XV.II.V EMISIONES

Se evalúan emisiones de CO₂ a lo largo de la cadena: quema de residuos ($QECO_{2i}$) — Ec. 36 —, uso de relleno sanitario ($URECO_{2i}$) — Ec. 37 —, transporte ($URECO_{2i}^T, RAECO_{2m}^T, MPECO_{2k}^T, CEECO_{2o}^T, FCECO_{2o}^T$) — Ec. 38-40, Ec. 42 y Ec. 45 —, producción de pellets ($PECO_{2k}$) — Ec. 41 —, uso final ($EUECO_{2o}$) del bioenergético — Ec. 43 —, cambio y uso de suelo ($EUCT$) — Ec. 44 —, y uso de combustibles convencionales ($FUECO_{2o,s}$) cuando se requiere — Ec. 46 —.

$$QECO_{2i} = \sum_{t,j} FRQ_{i,j,t} * \text{EMRA}^Q \quad \forall \quad i \in I \quad (36)$$

$$URECO_{2i} = \sum_{t,j} FRR_{i,j,t} * \text{EMRA}_{i,j}^R \quad \forall \quad i \in I \quad (37)$$

$$URECO_{2i}^T = \sum_{t,j} FRR_{i,j,t} * D_{i,m}^0 * \text{EMRA}^T \quad \forall \quad i \in I \quad (38)$$

$$RAECO_{2m}^T = \sum_{j,i} FRA_{i,j,m}^{\text{Reco}} * D_{i,m}^1 * \text{EMRA}^T \quad \forall \quad m \in M \quad (39)$$

$$MPECO_{2k}^T = \sum_{m,j} FRP_{m,k,j}^{\text{Reco}} * D_{m,k}^2 * \text{EMMP}^T \quad \forall \quad k \in K \quad (40)$$

$$PECO_{2k} = VP_k^P * \text{EMPP} \quad \forall \quad k \in K \quad (41)$$

$$CEECO_{2o}^T = \sum_k ESCC_{k,o} * D_{k,o}^3 * \text{EMP}^T \quad \forall \quad o \in O \quad (42)$$

$$EUECO_{2o} = PCE_o^D * \text{EMUP} \quad \forall \quad o \in O \quad (43)$$

$$EUCT = \sum_{a,m,c} FA_c^A * X_{c,a,m}^1 + \sum_{k,c} FA_c^P * X_{c,k}^2 \quad (44)$$

$$FCECO_{2o}^T = \sum_r FCTCC_{r,o} * DRfCE_{r,o} * EMFC^T \quad \forall \quad o \in O \quad (45)$$

$$FUECO_{2o} = FCC_o^R * EMUFC \quad \forall \quad o \in O \quad (46)$$

Todos los factores por emisiones fueron obtenidos del modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en diversas tecnologías (GREET®) actualizado al 2023, diseñado por Argonne National Laboratory (GREET, 2023).

Las emisiones totales del sistema propuesto (*ETE*) y del sistema convencional (*ETE*) se comparan en las ecuaciones (47) y (48). Se incluye la fijación de CO₂ por fotosíntesis (*FECO*_{2i}) en los residuos agrícolas, por lo que la cantidad de CO₂ establecida por las fuentes de residuos agrícolas (Ecuaciones 49-50), y el balance neto de CO₂ (*TECO*₂) se resume en la ecuación 51. Cabe mencionar que los valores por fijación fueron obtenidos del trabajo de Martínez-Guido et al. (2021).

$$ETE = \sum_m RAECO_{2m}^T + \sum_k MPECO_{2k}^T + \sum_k PEKO_{2k} + \sum_o CEECO_{2o}^T + \sum_o EUECO_{2o} \quad (47)$$

$$ETF = \sum_o FCECO_{2o}^T + \sum_o FUECO_{2o} + \sum_i QECO_{2i} + \sum_i URECO_{2i} + \sum_i URECO_{2i}^T \quad (48)$$

$$FECO_{2i} = \sum_{j,t} FRA_{i,j,t} * FF_j \quad \forall \quad i \in I \quad (49)$$

$$ECO_2^F = \sum_i FECO_{2i} \quad (50)$$

$$TECO_2 = ETE + ETF + EUCT - ECO_2^F \quad (51)$$

XV.II.VI BENEFICIOS SOCIALES

Para el aspecto social se utilizará la metodología empleada por Martínez-Guido et al. (2021). Los factores considerados para el aspecto social son los determinados ante el impuesto sobre la renta (ISR) declarado por el SAT (2024); los valores determinados a cada sector (educación, salud y desarrollo) se tomaron del ejercicio fiscal del estado de Querétaro (ESFE, 2022) cada ecuación estima:

- ❖ Salarios en la bodega y biorrefinería ($STAP_c$), y número de empleos (TW_c) generados (Ecuaciones [52-53](#))
- ❖ Contribuciones fiscales (TRW_c) asociadas a salarios e infraestructura (Ecuación [54](#))
- ❖ Aportes al sector salud ($MIWA_c^H$), educación ($MIWA_c^E$) e ingreso per cápita ($MIWA_c^{PIB}$), calculados en función de impuestos generados (Ecuaciones [55-60](#)).

$$STAP_c = \sum_m GV * FSA_{c,m} * X_{c,m}^1 + \sum_k GV * FSP_{c,k} * X_{c,k}^2 \quad \forall \quad c \in C \quad (52)$$

$$TW_c = \frac{STAP_c}{SUW_c} \quad \forall \quad c \in C \quad (53)$$

$$TRW_c = STAP * PR \quad \forall \quad c \in C \quad (54)$$

$$MIWA_c^H = TRW_c * TR_c^H + \left(\sum_m CF_{c,m}^A * X_{c,m}^1 + \sum_k CF_{c,k}^P * X_{c,k}^2 \right) * TRA_c^H \quad \forall \quad c \in C \quad (55)$$

$$BS^H = \sum_c \frac{MIWA_c^H}{AG_c^H} \quad (56)$$

$$MIWA_c^E = TRW_c * \text{TR}_c^E + \left(\sum_m \text{CF}_{c,m}^A * X_{c,m}^1 + \sum_k \text{CF}_{c,k}^P * X_{c,k}^2 \right) * \text{TRA}_c^E \quad \forall c \in C \quad (57)$$

$$BS^E = \sum_c \frac{MIWA_c^E}{\text{AG}_c^E} \quad (58)$$

$$MIWA_c^{PIB} = TRW_c * \text{TR}_c^{PIB} + \left(\sum_m \text{CF}_{c,m}^A * X_{c,m}^1 + \sum_k \text{CF}_{c,k}^P * X_{c,k}^2 \right) * \text{TRA}_c^{PIB} \quad \forall c \in C \quad (59)$$

$$BS^{PIB} = \sum_c \frac{MIWA_c^{PIB}}{\text{AG}_c^{PIB}} \quad (60)$$

El promedio de beneficios sociales ($BSGA$) por planta se presenta en la ecuación (61), mientras que el beneficio global ($BGEA$) de la propuesta se resume en la ecuación (62).

$$BSGA = \sum_c MIWA_c^H + \sum_c MIWA_c^E + \sum_c MIWA_c^{PIB} \quad (61)$$

$$BGEA = \frac{BSGA}{BAA} \quad (62)$$

XV.II.VII FUNCIÓN OBJETIVO

Finalmente, la ecuación (63) representa una función multiobjetivo, que busca maximizar el beneficio económico y social, y minimizar las emisiones de CO₂.

$$F.O. = \{ \max Profit \text{ and } BGEA, \min TECO_2 \} \quad (63)$$

XV.III MODELO MATEMÁTICO ESTÁTICO: METODOLOGÍA II

Esta metodología se enfocó en modelar los costos asociados a instalaciones tanto de los almacenes considerando o no la tecnología, así como de las plantas de producción, partiendo de una planta base con

capacidad fija de 2,970 toneladas anuales. Se generaron 250 escenarios adicionales para analizar comportamientos en los costos con variaciones en el flujo de producción. Mediante análisis de regresión cuadrática, se obtuvo una ecuación general que permite estimar los costos totales en función de la capacidad instalada. Esta función se integró al modelo como herramienta auxiliar, fortaleciendo la precisión en la evaluación de escalabilidad. Las ecuaciones se integraron antes de las ecuaciones 19 y 20 de las establecidas en la Metodología I y se modificaron dichas ecuaciones como se presenta a continuación. Cabe mencionar que las ecuaciones 19A-20A se activaron para el análisis del almacén sin tecnología, mientras que las ecuaciones 21A-22A se activaron para el análisis del almacén con tecnología.

Almacén sin tecnología:

$$CF_{c,m}^A = (3*10^{-8}*(FRA_{m,c}^A)^2 - 5*10^{-4}*(FRA_{m,c}^A) + 13.628)*X_{c,m}^1 \quad (19A)$$

$$\forall c \in C, m \in M$$

$$CV_{c,m}^A = (1*10^{-7}*(FRA_{m,c}^A)^2 - 0.003*(FRA_{m,c}^A) + 76.436)*X_{c,m}^1 \quad (20A)$$

$$\forall c \in C, m \in M$$

Almacén con tecnología:

$$CF_{c,m}^A = (4*10^{-8}*(FRA_{m,c}^A)^2 - 8*10^{-4}*(FRA_{m,c}^A) + 19.284)*X_{c,m}^1 \quad (19B)$$

$$\forall c \in C, m \in M$$

$$CV_{c,m}^A = (3*10^{-7}*(FRA_{m,c}^A)^2 - 6.6*10^{-3}*(FRA_{m,c}^A) + 166.06)*X_{c,m}^1 \quad (20B)$$

$$\forall c \in C, m \in M$$

Planta de producción de pellets:

$$CF_{c,k}^P = (5*10^{-8}*(FTMPR_{k,c}^A)^2 - 0.001*(FTMPR_{k,c}^A) + 24.619)*X_{c,k}^2 \quad (21A)$$

$$\forall c \in C, k \in K$$

$$CV_{c,k}^P = (5*10^{-7}*(FTMPR_{k,c}^A)^2 - 0.0112*(FTMPR_{k,c}^A) + 283.24)*X_{c,k}^2 \quad (22A)$$

$$\forall c \in C, k \in K$$

Finalmente, los balances para el cálculo de costos tanto de las bodegas instaladas como de las plantas se ejemplifican en las ecuaciones [23A-24A](#).

$$CC_{c,m}^A = (CF_{c,m}^A + CV_{c,m}^A) * X_{c,m}^1 * FRA_{c,m}^A \quad \forall c \in C, m \in M \quad (23A)$$

$$CC_{c,k}^P = (CF_{c,k}^P + CV_{c,k}^P) * X_{c,k}^2 * FTMPR_{c,k} \quad \forall c \in C, k \in K \quad (24A)$$

Los demás balances desarrollados en el modelo matemático para la metodología I se mantuvieron iguales, así como la función objetivo. Cada factor, considerado para el cálculo de todos los anteriores balances, es mostrado en el [Anexo 2](#).

XV.IV MODELO MATEMÁTICO DINÁMICO

El modelo matemático dinámico incorpora aspectos clave como la demanda, la estacionalidad, composición de la biomasa, condiciones operacionales y la logística. A partir del modelo estático se modificaron las ecuaciones [16](#) y [17](#), ampliéndolas para incluir las ecuaciones [64](#) y [65](#). Estas nuevas ecuaciones modelan la variabilidad en la demanda y la estacionalidad, utilizando datos históricos a través de la metodología de Holt-Winters. Específicamente, ésta se calcula por municipio considerando la demanda base de cada uno de los seis sectores ($s = 6$) [1-residencial, 2-agrícola, 3-comercial, 4-industria y 5-negocios de mediana tensión (NMT), 6-alumbrado público e industria] más los diferentes factores de incremento en la demanda debido a la estacionalidad [Ecuaciones (64) - (65)]. Demanda que puede ser cubierta con pellets o combustibles convencionales según la disponibilidad.

$$DE_{u,s,t} = DB_{u,s,t}^0 * (1 + G_{u,s}^d) + \alpha \quad \forall u \in U, s \in S, t \in T \quad (64)$$

$$\alpha_{u,s,t} = CCE_{s,t} * DB_{u,s,t-1}^0 \quad (65)$$

Adicionalmente, en el modelo se incluyeron sets adicionales que permiten diferenciar entre tecnologías en almacenes ($a = 2$). Se ajustó la

escala temporal de semanas a meses ($t = 1-12$), y se incorporaron las 47 variedades de residuos generadas en el estado. Esto último conllevó a realizar un ajuste en las capacidades de los almacenes y las plantas, ya que la capacidad máxima original (10,920 ton/año) resultó insuficiente.

Los límites establecidos como $(ICA_{c,a,m})$ y $(SCA_{c,a,m})$ incluidos en la ecuación [7C](#) se modificaron debido al incremento de residuos a emplear considerando los datos mostrados por la **Tabla 7**. De igual manera los límites establecidos como $(ICP_{k,c})$ y $(SCP_{k,c})$ incluidos en la ecuación [11C](#) fueron incrementados como se muestran en la

Tabla 8.

Tabla 7. Límites superior e inferior de los almacenes instalados.

CAPACIDAD							
[ton/año]							
$(SCA_{c,a,m})$	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,270	110,000
$(ICA_{c,a,m})$	8.4	1,001	6,001	11,001	28,251	55,501	82,271

Tabla 8. Límites superior e inferior de las plantas de pellets instaladas.

CAPACIDAD							
[ton/año]							
$(SCP_{k,c})$	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,270	110,000
$(ICP_{k,c})$	8.4	1,001	6,001	11,001	28,251	55,501	82,271

Se establece una restricción por viaje, en el cual al menos tiene que ser mayor a la capacidad del camión de carga.

$$\begin{aligned} FRA^{\text{Max}} * YTRIP_{i,a,m,j,t} &\geq FRA_{i,a,m,j,t}^{\text{Reco}} \geq CCT * YTRIP_{i,a,m,j,t} \\ \forall \quad i \in I, a \in A, m \in M, j \in J, t \in T \end{aligned} \quad (66)$$

De igual manera que en el intercambio de flujos de las áreas de cultivo al almacén se establece la restricción de viaje para la materia prima trasladada a la biorrefinería.

$$\begin{aligned} \text{FRP}^{\text{Max}} * Y2TRIP_{m,a,k,t} &\geq \text{FRP}^{\text{Reco}}_{m,a,k,t} \geq \text{CCT} * Y2TRIP_{m,a,k,t} \\ \forall \quad a \in A, m \in M, k \in K, t \in T \end{aligned} \quad (67)$$

Producción de pellets: El factor de producción de pellets integra el valor por la degradación de los residuos (valores son reportados en el Anexo 2) conforme pasa el tiempo al estar almacenados, ya sea en el almacén con tecnología o sin ella. Así mismo, se establecen las ecuaciones [69A-69B](#), donde se busca restringir el flujo de producción de pellets en el tiempo de materia disponible.

$$VP_{k,a,t}^P = FRR_{k,a,t}^P * \text{RR}_{a,t} \quad \forall \quad a \in A, k \in K, t \in T \quad (68)$$

$$\begin{aligned} \text{FRPP}^{\text{Min}} * ZP_{k,a,t} &\geq FRR_{k,a,t}^P \leq \text{FRPP}^{\text{Max}} * ZP_{k,a,t} \\ \forall \quad a \in A, k \in K, t \in T \end{aligned} \quad (69\text{A})$$

$$ZP_{k,a,t} \geq 1 \quad \forall \quad a \in A, k \in K, t \in T \quad (69\text{B})$$

XV.V RESULTADOS MODELO ESTÁTICO: METODOLOGÍA I

Se evaluaron dos tipos de almacenamiento de residuos agrícolas:

1. Sin tecnología (intemperie).
2. Con tecnología de control de temperatura y humedad.

Para cada tipo de almacenamiento se analizaron tres objetivos de optimización:

- ❖ Maximización del beneficio económico
- ❖ Maximización del beneficio social
- ❖ Minimización de emisiones de CO₂.

A continuación, se presentan los resultados del primer objetivo bajo ambos escenarios de almacenamiento.

XV.V.I ANÁLISIS METODOLOGÍA I

XV.V.I.I Escenario 1.1: Maximización del beneficio económico - Almacén sin tecnología

Este escenario muestra pérdidas de aproximadamente -\$2,695,443 USD/año, con 8,691 toneladas de emisiones CO₂ anuales. Para lograr este planteamiento se requeriría la contratación de 461 trabajadores (con un salario de 719.3 USD/mes), distribuidos entre el almacén y la planta de producción, generando un beneficio social calculado en \$190,644 USD/año. En la operación, se procesarían 9,800 toneladas de residuos, generando 8,036 toneladas de pellets. El modelo propone la instalación de un almacén y una planta de producción de pellets en el municipio de Pedro Escobedo, con una capacidad de 10,920 toneladas, operando al 89.74% de su capacidad. Los costos asociados a la instalación y operación del almacén implicarían un gasto anual de \$703,869 USD, mientras que la instalación y operación de la planta de procesamiento tendrían un costo de \$2,374,810 USD.

En cuanto a los residuos no empleados se envían al relleno sanitario, con un costo de manejo y transporte de \$9,084 USD y \$231 USD, respectivamente. Además, el traslado de residuos al almacén supondría un costo de \$368,885 USD, y la planta de procesamiento un costo de 10,900 USD. Finalmente, el envío de los pellets producidos a la central eléctrica representa un costo de \$67,932 USD, mientras que el pago a los agricultores por los residuos utilizados en el proceso ascendería a \$149,940 USD, todos estos datos calculados anualmente. En total, los costos asociados a la cadena propuesta ascienden a \$3,676,339 USD.

En este escenario, las emisiones totales de la cadena propuesta (CP), que incluye la recolección de residuos, almacenamiento, transporte de materia prima a la planta, producción de pellets, transporte a la central eléctrica y uso de los pellets, ascienden a ~40,517 ton CO₂/año. Sin embargo, al considerar las emisiones fijadas por los cultivos (31,825 ton CO₂/año), las emisiones

netas de la cadena se reducen a ~8,692 ton CO₂/año. Las emisiones más representativas de la CP son las generadas por el uso de pellets (39,055 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por la producción de pellets (~737 ton CO₂/año) y las emisiones por ocupación y cambio de tierra (674 ton CO₂/año). Las emisiones por transporte en la CP representan sólo el 0.13% del total.

Por otro lado, las emisiones generadas por la cadena convencional (CN) de combustibles convencionales —que incluye el transporte del combustible desde las refinerías más cercanas al estado de Querétaro (Refinería de Salamanca en Guanajuato y Refinería de Tula en Hidalgo) y su uso—, sumadas a las emisiones por la quema o tratamiento de residuos no utilizados en la CP, alcanzan un total de 2,703,572 ton CO₂/año. Todos los factores utilizados para el cálculo de emisiones fueron obtenidos del programa GREET® 2023. En la CN, las emisiones más significativas son las generadas por el uso de combustibles convencionales (2,961,018 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por transporte (12,546 ton CO₂/año). Las emisiones por el transporte y disposición de residuos no utilizados (0.03 ton CO₂/año y 7.94 ton CO₂/año, respectivamente) no son representativas en el total de la CN. Cabe destacar que el modelo seleccionó la Refinería de Tula como fuente de combustible, enviando un flujo de ~429,190 ton/año para cubrir la demanda. De acuerdo con las regulaciones del estado de Querétaro sobre bonos de carbono y el impuesto subnacional al carbono, el costo por 1 ton CO₂ es de 32.03 USD —640.56 MXN— (MÉXICO2, 2024). Por lo tanto, los costos por impuestos al carbono para la CP son de 278,378 USD/año, mientras que para la CN ascienden a 86,188,336 USD/año. Esto significa que los impuestos al carbono de la CP representan únicamente el 0.32% de los impuestos de la CN.

A su vez en, el aspecto social global, la inversión destinada al sector salud y educación asciende a \$59,576 USD/año, mientras que la inversión per cápita es de ~\$71,492 USD/año. Estos montos generan un beneficio social

total de \$190,644 USD/año, lo que representa el 0.0004% del PIB de Querétaro. En términos porcentuales, la contribución de la cadena es del 0.004% para los sectores de salud y educación, y del 0.008% para el ingreso per cápita.

XV.V.I.II Escenario 1.2: Maximización del beneficio económico -

Almacén con tecnología

Este escenario muestra pérdidas por -\$3,432,311 USD, y 8,691 toneladas de emisiones CO₂ anualmente. Este escenario también permitiría la contratación de 461 trabajadores, con un beneficio social estimado 213,885 USD. Los valores correspondientes a producción y operación, volúmenes de residuos procesados y de pellets, capacidad y localización de la infraestructura, permanecen idénticos al escenario sin tecnología. Los costos asociados a la instalación y operación del almacén alcanzan los \$1,440,737 USD, el doble del costo del almacén sin tecnología. Mientras que la planta de producción de pellets mantiene el costo reportado en el escenario sin tecnología, al igual que los gastos por manejo y transporte de los residuos no utilizados, los costos de traslado de residuos, materia prima y producto final, y pago a los agricultores. Los costos totales de este escenario ascienden a \$4,413,207 USD al año.

En este escenario, las emisiones netas de la CP son las mismas que en el escenario anterior. Esto se debe a que el flujo de residuos orgánicos, el transporte de estos, la cantidad de pellets generados, transportados y utilizados, y la demanda de combustible convencional no varían. De igual manera, las emisiones generadas por la CN y los costos asociados a los impuestos al carbono son idénticos a los del escenario 1.1. Los costos por impuestos al carbono para la CP son de ~278,378 USD/año, mientras que para la CN ascienden a 86,188,336 USD/año. Las emisiones más representativas de la CP y la CN también coinciden con las del escenario anterior. En la CP, las emisiones por el uso de pellets (~39,843 ton CO₂/año) y la producción de

pellets (~737 ton CO₂/año) son las más significativas. En la CN, las emisiones por el uso de combustibles convencionales (2,961,018 ton CO₂/año) y el transporte (12,546 ton CO₂/año) dominan el total. De igual manera que el escenario anterior, se elige la Refinería de Tula.

Por otro lado, la inversión en salud y educación aumenta a \$66,839 USD/año, mientras que la inversión per cápita es de ~\$80,207 USD/año. Esto genera un beneficio social total de ~\$213,885 USD/año, equivalente al 0.0005% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena es del 0.005% para los sectores de salud y educación, y del 0.009% para el ingreso per cápita.

XV.V.I.III Comparativa entre escenarios 1.1 y 1.2: Maximización del beneficio económico

La **Tabla 9** resume los resultados comparativos en el aspecto económico entre ambos escenarios. Las principales diferencias se concentran en el aumento del costo de almacenamiento cuando se emplea tecnología, lo cual eleva el costo total en un 27.3%. A pesar del mayor gasto, las emisiones se mantienen constantes y el beneficio social mejora levemente gracias al incremento en el valor del trabajo y la seguridad del empleo asociado al uso de tecnología.

Tabla 9. Impacto económico: Comparativa de costos de almacenamiento con y sin tecnología.

Maximización de la ganancia				
Ventas (GV)	\$ 552,635.7	\$ 552,635.7	0%	
Gan. Manejo (GM)	\$ 428,260.0	\$ 428,260.0	0%	
Ingresos Totales	\$ 980,895.7	\$ 980,895.7	0%	
Costos Almacén (CC_A)	\$ 703,869.2	\$ 1,440,737.5	104.7%	
Costos Plantas (CC_P)	\$ 2,374,810.4	\$ 2,374,810.4	0%	
Cotos Totales Instalación Plantas (CTCC)	\$ 3,078,679.7	\$ 3,815,547.9	23.9%	
Cost. Quema (CQR)	\$ -	\$ -	0%	
Cost. Relleno (CUR)	\$ 9,084.1	\$ 9,084.1	0%	
Cost. Trans. Relleno (CTRR)	\$ 231.2	\$ 231.2	0%	

Cost. Trans. Almacén (CTR)	\$ 368,885.8	\$ 368,885.8	0%
Cost. Transp. Refinería (CTB)	\$ 10,900.7	\$ 10,900.7	0%
Cost. Transp. Central (CTE)	\$ 67,932.9	\$ 67,932.9	0%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 447,950.6	\$ 447,950.6	0%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 8,683,290,153.5	\$ 8,683,290,153.5	0%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 149,940.0	\$ 149,940.0	0%
Costos Totales CP	\$ 3,676,339.0	\$ 4,413,207.3	20%
FLUJO DE DINERO TOTAL DE LA CP	\$ 2,695,443.3	\$ 3,432,311.6	27.3%

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

En tanto al aspecto social, se observa una variación del 12.2% en la inversión destinada a salud, educación e ingreso per cápita. Este incremento se debe a los mayores costos asociados a las plantas con tecnología, lo que implica un pago más elevado de impuestos y, en consecuencia, una mayor contribución a estos sectores. Sin embargo, el número de trabajadores y sus salarios se mantienen constantes, ya que el flujo de residuos y la cantidad de plantas no varían. Estos resultados se resumen en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Impacto económico: Comparativa de la inversión social entre escenarios con y sin tecnología.

Maximización de la ganancia			
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación *
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 59,576.3	\$ 66,839.1	12.2%
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 59,576.3	\$ 66,839.1	12.2%
Dinero de inversión per cápita (MIWA_PIB)	\$ 71,491.6	\$ 80,206.9	12.2%
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 190,644.2	\$ 213,884.9	12.2%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 331,581.4	\$ 331,581.4	0%
Tasa de retención (TRW)	70,825.8	70,825.8	0%
Cantidad de trabajadores (TW)	461.0	461.0	0%
Salario a cada trabajador	\$ 719.3	\$ 719.3	0%

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

En la **Figura 4** se hace una exemplificación de todos los intercambios de flujo realizados en ambos escenarios, así como la ubicación de los almacenes y plantas además de la central eléctrica. Los límites del sistema y flujos considerados de ambos escenarios se ilustran en la **Figura 2**.

ESCENARIO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA

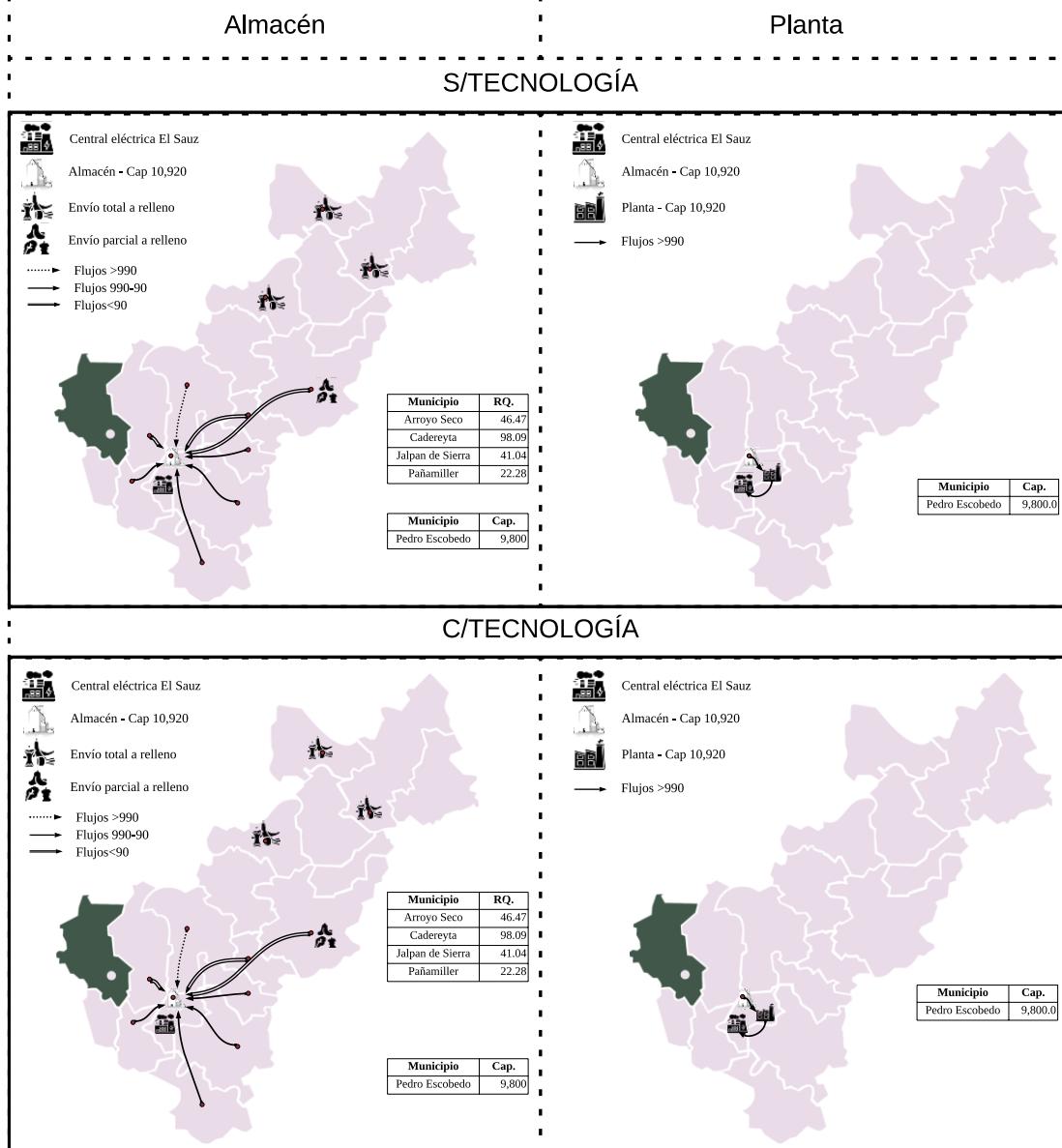


Figura 4. Comparativa de la red logística del Escenario 1: Distribución de instalaciones y residuos.

XV.V.I.IV Escenario 2.1: Minimización de las emisiones - Almacén sin tecnología

En este escenario, orientado a minimizar las emisiones y sin emplear control de temperatura ni humedad en el almacenamiento, se obtuvieron pérdidas de -\$2,168,960 USD/año. Sin embargo, las emisiones netas de CO₂ generadas por la cadena propuesta fueron de 0 toneladas por año, debido a

que el CO₂ por emitir fue completamente compensado por la fijación realizada por los residuos agrícolas utilizados. El sistema permitiría la contratación de 362 trabajadores, distribuidos entre el almacén y la planta de producción, lo que se traduce en un beneficio social calculado en \$150,943 USD.

En este escenario se procesan 7,700 toneladas de residuos al año, generando 6,314 toneladas de pellets. El modelo propone la instalación de un almacén en el municipio de Pedro Escobedo, con una capacidad de 8,440 toneladas al año operando al 91.23% de su capacidad; así como una planta de producción de pellets con las mismas características. Los costos asociados, a la instalación y operación del almacén y a la planta de procesamiento implican un gasto anual de \$565,909 USD y \$1,911,892 USD respectivamente. Los residuos no empleados son quemados en el lugar de generación, siendo acreedores de una multa de ~\$4,225 USD, calculada con base de 32.03 USD/ton CO₂ (MÉXICO₂, 2024) considerando que la quema ocurre una vez al año.

El costo total anual de la cadena propuesta —que incluye recolección, transporte, almacenamiento, procesamiento y distribución— asciende a ~\$2,939,664 USD. Estos resultados corresponden exclusivamente al análisis del almacenamiento sin tecnología.

En este escenario, las emisiones totales de la CP son de 31,825 ton CO₂/año. Estas emisiones coinciden con las emisiones fijadas por los cultivos (31,825 ton CO₂/año), por lo que las emisiones netas de la cadena se reducen a 0 ton CO₂/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la CN de combustibles convencionales alcanzan un total de 2,695,432 ton CO₂/año. Las emisiones más representativas de la CP son las generadas por el uso de pellets (30,386 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por la producción de pellets (579 ton CO₂/año), así como las generadas por ocupación y cambio de tierra (521 ton CO₂/año). Las emisiones por transporte en la CP representan sólo el 0.12% del total. En la CN, las emisiones más significativas son las

generadas por el uso de combustibles convencionales (~2,693,132 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por transporte del combustible (~2,295 ton CO₂/año). Las emisiones por la quema de residuos (5.7 ton CO₂/año) no son representativas en el total de la CN. Cabe destacar que el modelo seleccionó la Refinería de Guanajuato como fuente de combustible, enviando un flujo de ~429,527 ton/año para cubrir la demanda. En este caso, los costos por impuestos al carbono para la CP son de 0 USD/año, mientras que para la CN ascienden 86,256,028 USD/año. Esto significa que no habría que pagar impuestos al carbono por la CP.

En este escenario, la inversión en salud y educación es de ~\$47,170 USD/año, mientras que la inversión per cápita asciende a ~\$56,604 USD/año. Esto genera un beneficio social total de \$150,943 USD/año, equivalente al 0.0003% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena es del 0.003% para los sectores de salud y educación, y del 0.006% para el ingreso per cápita.

XV.V.I.V Escenario 2.2: Minimización de las emisiones - Almacén con tecnología

En este escenario, que incorpora un almacén con control de temperatura y humedad, la ganancia anual neta es de -\$2,762,452 USD, resultado de \$770,704 USD en ingresos frente a costos totales de -\$3,533,155 USD. Al igual que en el escenario sin tecnología, las emisiones netas de CO₂ son cero, ya que las emisiones generadas por la cadena se neutralizan con el CO₂ fijado por los residuos agrícolas. El modelo contempla la contratación de 362 trabajadores (con el mismo salario descrito previamente), lo que representa un beneficio social de ~\$169,375 USD/año. La producción y operación, volúmenes de residuos quemados y pellets generados, así como la capacidad y localización de la infraestructura, permanecen idénticos al escenario sin tecnología (Escenario 2.1). Los costos asociados a la instalación y operación del almacén y planta de procesamiento ascenderían a \$1,159,401

USD y \$1,911,892 USD respectivamente por año. Los gastos por manejo y transporte de los residuos no utilizados, costos de traslado de residuos, materia prima y producto final, y pago a los agricultores, se mantienen iguales a los reportados en el escenario sin tecnología.

En este escenario, las emisiones netas de la CP son las mismas que en el escenario anterior (0 ton CO₂/año). Esto se debe a que el flujo de residuos orgánicos, la cantidad de pellets generados y utilizados, el transporte de cada material y la demanda de combustible convencional no varían. De igual manera, las emisiones generadas por la CN y los costos asociados a los impuestos al carbono son idénticos a los del escenario 2.1. Los costos por impuestos al carbono para la CP son de 0 USD/año, mientras que para la CN ascienden a ~86,256,028 USD/año. Las emisiones más representativas de la CP y la CN también coinciden con las del escenario anterior. En la CP, las emisiones por el uso de pellets (30,686 ton CO₂/año), la producción de pellets (~579 ton CO₂/año) y la ocupación y cambio de tierra (521 ton CO₂/año) son las más significativas. En la CN, las emisiones por el uso de combustibles convencionales (~2,693,132 ton CO₂/año) y el transporte (~2,295 ton CO₂/año) dominan el total. De igual manera que en el escenario anterior, la refinería elegida fue la Refinería de Guanajuato.

Por otro lado, la inversión en salud y educación aumenta a ~\$52,960 USD/año, mientras que la inversión per cápita alcanza \$63,515 USD/año. Esto genera un beneficio social total de ~\$169,375 USD/año, equivalente al 0.0004% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena es del 0.004% para los sectores de salud y educación, y del 0.007% para el ingreso per cápita.

XV.V.I.VI Comparativa entre escenarios 2.1 y 2.2: Minimización de las emisiones

Este escenario mantiene la neutralidad de emisiones, pero incrementa los costos totales por el uso de tecnología en almacenamiento. No obstante, mejora el beneficio social respecto al escenario sin tecnología. En la **Tabla 11** se presenta una comparación de los datos obtenidos en los escenarios de minimización de emisiones, evaluando el desempeño de ambas tecnologías (con y sin control de temperatura y humedad). La principal diferencia entre ambas opciones radica en los costos asociados al uso de la tecnología. El almacén con control de temperatura y humedad implica un incremento del 27.4% en el flujo de dinero total, en comparación con el almacén sin tecnología.

Tabla 11. Impacto social: Comparación de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Minimización de las emisiones				
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*	
Ventas (GV)	\$ 434,213.8	\$ 434,213.8	0%	
Gan. Manejo (GM)	\$ 336,490.0	\$ 336,490.0	0%	
Ingresos Totales	\$ 770,703.8	\$ 770,703.8	0%	
Ubicación (X1)	Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	0%	
Costos Almacén (CC_A)	\$ 565,909.4	\$ 1,159,401.1	104.9%	
Costos Plantas (CC_P)	\$ 1,911,892.5	\$ 1,911,892.5	0%	
Cotos Totales Instalación Plantas (CTCC)	\$ 2,477,801.9	\$ 3,071,293.7	24%	
Cost. Quema (CQR)	\$ 4,224.5	\$ 4,224.5	0%	
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	\$ -	0%	
Cost. Transp. Relleno (CTRR)	\$ -	\$ -	0%	
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 282,111.0	\$ 282,111.0	0%	
Cost. Transp. Refinería (CTB)	\$ 8,564.8	\$ 8,564.8	0%	
Cost. Transp. Central (CTE)	\$ 53,375.9	\$ 53,375.9	0%	
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 344,051.7	\$ 344,051.7	0%	
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 8,690,109,929.8	\$ 8,690,109,929.8	0%	
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 117,810.0	\$ 117,810.0	0%	
Costos Totales CP	\$ 2,939,663.6	\$ 3,533,155.3	20.2%	
FLUJO DE DINERO TOTAL DE LA CP	\$ 2,168,959.8	\$ -2,762,451.5	27.4%	

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base en el almacén sin tecnología.

Por otro lado, la **Figura 5** ofrece una representación visual de la ubicación de los almacenes y plantas, así como el flujo de materiales dentro del sistema. Incluye el destino de los residuos no procesados, que en este caso son quemados en el mismo lugar donde se generan, para ambos escenarios. Cabe mencionar que en algunos municipios que utilizan residuos una parte de estos también se quema.

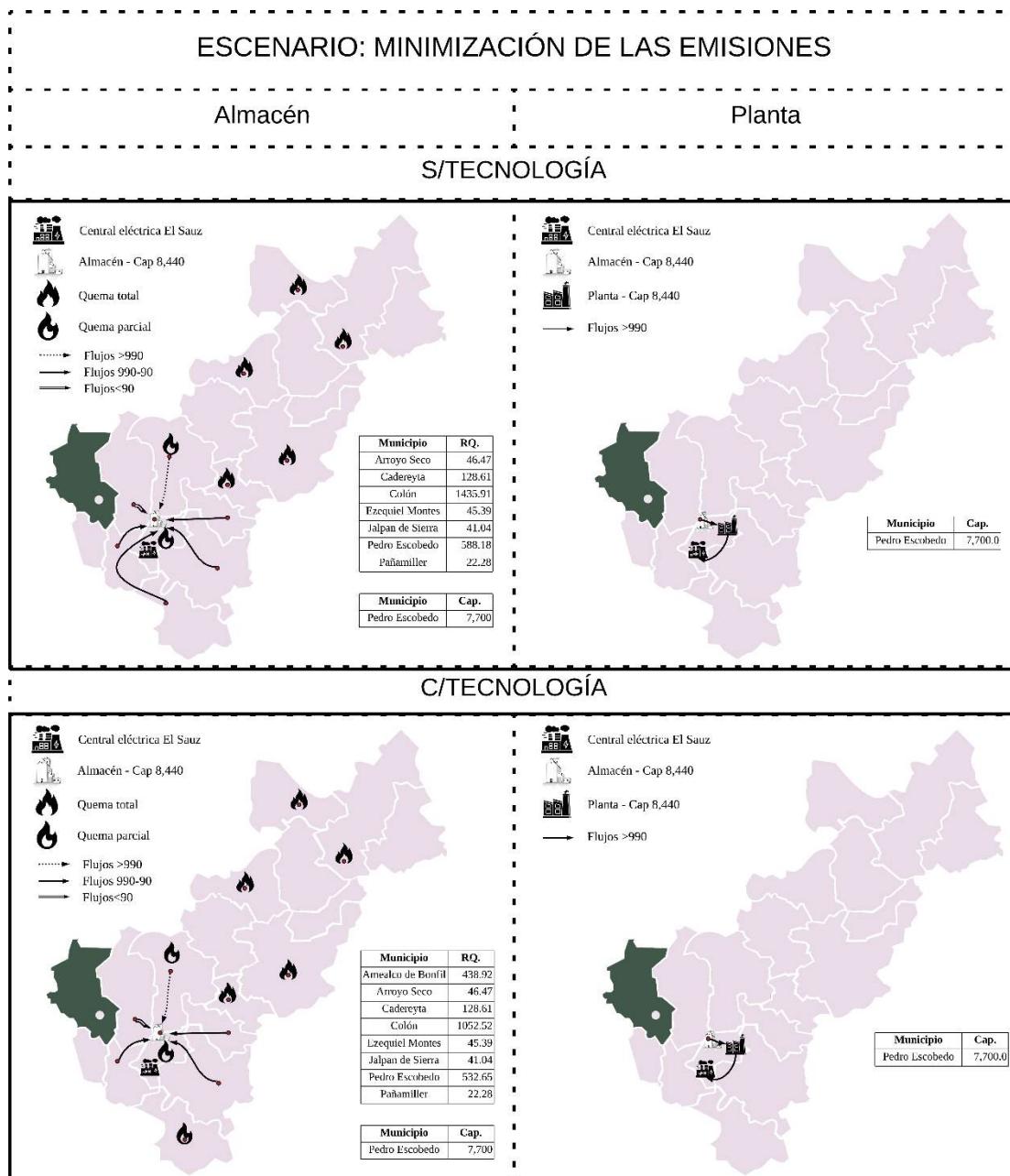


Figura 5. Comparativa de la red logística del Escenario 2: Distribución de instalaciones y residuos.

Al igual que en los escenarios de maximización del beneficio económico, se observa una variación del 12.2% en la inversión destinada a salud, educación e ingreso per cápita. Este incremento se debe a los mayores costos asociados a las plantas con tecnología. Sin embargo, el número de trabajadores y sus salarios se mantienen constantes, ya que el flujo de residuos y la cantidad de plantas no varían. Estos resultados se resumen en la **Tabla 12**.

Tabla 12. *Impacto ambiental: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en almacenamiento.*

Variable	Minimización de emisiones		
	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 47,169.7	\$ 52,929.5	12.2%
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 47,169.7	\$ 52,929.5	12.2%
Dinero de inversión per cápita (MIWA_PIB)	\$ 56,603.7	\$ 63,515.4	12.2%
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 150,943.1	\$ 169,374.5	12.2%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 260,528.3	\$ 260,528.3	0%
Tasa de retención (TRW)	55,648.8	55,648.8	0%
Cantidad de trabajadores (TW)	362.0	362.0	0%
Salario a cada trabajador	\$ 719.7	\$ 719.7	0%

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

XV.V.I.VII Escenario 3.1: Maximización del beneficio social - Almacén sin tecnología

En este escenario, orientado a maximizar el beneficio social y sin control de temperatura ni humedad en el almacenamiento, se obtiene una pérdida neta anual de -\$7,073,545 USD, con emisiones de ~9,976 toneladas de CO₂/año. Este escenario permitiría la contratación de 3,225 trabajadores, generando un beneficio social calculado en \$652,158 USD.

La producción y operación, considera 9,800 toneladas de residuos por año, transformadas en 8,036 toneladas de pellets. El modelo propone la instalación de varios almacenes en los municipios de Amealco de Bonfil, Arroyo Seco, Huimilpan, Jalpan de Sierra, Peñamiller, Querétaro y San Juan del Río, con una capacidad de 3,480 toneladas al año. Sin embargo, cada

almacén opera a distintas capacidades, recibiendo flujos de 2,510.6, 1,539.4, 1,750 toneladas por año en Amealco de Bonfil, Arroyo Seco, Huimilpan, y 1,000 ton/año en Peñamiller, Querétaro y San Juan del Río. Las plantas de producción de pellets se instalarían en los municipios de Amealco de Bonfil, Arroyo Seco, Cadereyta, Peñamiller, Querétaro, San Juan del Río y Tequisquiapan, con capacidades operativas de 3,480 toneladas/año excepto en Arroyo Seco donde se tiene una capacidad de 5,960 toneladas/año. Estas plantas no operan al 100% de su capacidad, ya que las de menor capacidad reciben 1,000 ton/año, mientras que la de mayor capacidad procesa 3,800 toneladas/año.

Los costos asociados, la instalación y operación del almacén y planta de procesamiento se calculan en \$950,117 USD y ~\$2,949,265 USD respectivamente por año. Los residuos no empleados serían quemados en el lugar donde fueron generados, causando una multa de \$4,225 USD/ton. El traslado de residuos al almacén y plantas de procesamiento, así como la distribución de los pellets suponen costos anuales de: \$1,082,604 USD, \$1,814,604 USD y \$1,108,014 USD respectivamente. Mientras que el pago a los agricultores por los residuos utilizados asciende a \$149,940 USD/año. El costo total anual de la cadena, incluyendo recolección, transporte, almacenamiento, procesamiento y distribución asciende a ~\$8,054,441 USD.

En este escenario, las emisiones totales de la CP son de ~41,801 ton CO₂/año. Sin embargo, al considerar las emisiones fijadas por los cultivos (31,825 ton CO₂/año), las emisiones netas de la cadena se reducen a ~9,976 ton CO₂/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la CN de combustibles convencionales alcanzan un total de ~2,703,568 ton CO₂/año. Los costos por impuestos al carbono para la CP son de ~319,511 USD/año, mientras que para la CN ascienden a ~86,188,434 USD/año, representando el 0.37% la CP del impuesto de la CN. De manera similar que los casos anteriores actividades como uso de pellets, ocupación y cambio de uso de tierra representan la mayor cantidad de emisiones producidas, mientras que

las emisiones por transporte en la CP representan sólo el 1.09% del total. En la CN, las emisiones más significativas son las generadas por el uso de combustibles convencionales (2,691,021 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por transporte del combustible (12,546 ton CO₂/año). Las emisiones por la quema de los residuos (0.51 ton CO₂/año) no son representativas en el total de la CN. Cabe destacar que el modelo seleccionó la Refinería de Tula como fuente de combustible, enviando un flujo de 429,190 ton/año para cubrir la demanda.

En este escenario, la inversión en salud y educación es de \$203,799 USD/año, mientras que la inversión per cápita asciende a \$244,559 USD/año. Esto genera un beneficio social total de 652,158 USD/año, equivalente al 0.0014% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena es del 0.015% para los sectores de salud y educación, y del 0.027% para el ingreso per cápita.

XV.V.I.VIII Escenario 3.2: Maximización del beneficio social -

Almacén con tecnología

Este escenario considera almacenamiento con control de temperatura y humedad, resultando en una pérdida económica neta anual de -\$6,718,371 USD/año. Las emisiones generadas son ligeramente menores: 9,146.5 toneladas de CO₂/año. El número de empleos se reduce a 921 trabajadores, generando un beneficio social estimado en \$298,072 USD/año. Los datos correspondientes a la producción y operación, volúmenes de residuos procesados, pellets producidos son idénticos al escenario anterior. La infraestructura se ubica en Amealco de Bonfil y Arroyo Seco, con capacidades de 5,960 toneladas/año, operando al 100% y 64.4% de su capacidad, respectivamente. Las plantas de producción de pellets se instalan en Ezequiel Montes y Tequisquiapan, con capacidades de 8,440 toneladas/año (operando al 70.6%) y 5,960 toneladas/año (operando al 64.6%), respectivamente. Los costos por instalación y operación de los almacenes alcanzan \$1,546,776

USD/año, 62.8% más que el escenario 3.1. mientras que los costos por las plantas de producción de pellets se elevan un 4.8% con un costo de 4,087,121.3 USD/año respecto al mismo escenario. Los gastos de quema de residuos no utilizados y pago a los agricultores se mantienen iguales a los reportados en el escenario 3.1. Por otro lado, los costos de transporte de residuos, materia prima, y distribución de pellets son \$1,587,346 USD, \$1,413,377 USD, y \$461,482 USD respectivamente por año; lo anterior genera un costo total anual por la cadena propuesta de \$7,699,265 USD/año.

En este escenario, las emisiones netas de la CP son diferentes a las del escenario anterior (9,146.5 ton CO₂/año). Esto se debe a que, aunque se utiliza el mismo flujo de residuos orgánicos, la cantidad de almacenes instalados y el flujo de materiales transportados varían. Al realizar el balance de las emisiones de la CP (40,971.5 ton CO₂/año) con las emisiones fijadas, éstas son diferentes.

Por otro lado, las emisiones generadas por la CN son idénticas a los del escenario 3.1; sin embargo, los costos por impuestos al carbono para la CP son de ~\$292,945 USD/año, mientras que para la CN ascienden a ~\$86,188,434 USD/año. Las emisiones más representativas de la CP y la CN coinciden con las del escenario anterior. En la CP, las emisiones por el uso de pellets (~39,055 ton CO₂/año), la ocupación y cambio de tierra (787.47 ton CO₂/año) y la producción de pellets (~737 ton CO₂/año) son las más significativas. En la CN, las emisiones por el uso de combustibles convencionales (2,691,021 ton CO₂/año) y el transporte (12,546 ton CO₂/año) dominan el total. De igual manera que el escenario anterior, la refinería elegida fue la Refinería de Tula.

En este escenario, la inversión en salud y educación disminuye a ~\$93,148 USD/año, mientras que la inversión per cápita alcanza \$111,777 USD/año. Esto genera un beneficio social total de \$298,072 USD/año, equivalente al 0.0007% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena es

del 0.007% para los sectores de salud y educación, y del 0.012% para el ingreso per cápita.

XV.V.I.IX Comparativa entre escenarios 3.1 y 3.2: Maximización del beneficio social

La **Tabla 13** compara los escenarios con y sin control de temperatura y humedad en almacenamiento, orientados a la maximización del beneficio social. La principal diferencia entre ambos radica en los costos asociados al uso de tecnología.

Tabla 13. Impacto social: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Maximización del beneficio social				
Variables	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*	
Ventas (GV)	\$ 552,635.7	\$ 552,635.7	0%	
Gan. Manejo (GM)	\$ 428,260.0	\$ 428,260.0	0%	
Ingresos Totales	\$ 980,895.7	\$ 980,895.7	0%	
Costos Almacén (CC_A)	\$ 950,117.3	\$ 1,546,775.9	62.8%	
Costos Plantas (CC_P)	\$ 2,949,264.8	\$ 2,540,345.4	-13.9%	
Cotos Totales Instalación Plantas (CTCC)	\$ 3,899,382.0	\$ 4,087,121.3	4.8%	
Cost. Quema (CQR)	\$ 4,224.5	\$ 4,224.5	0%	
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	\$ -	0%	
Cost. Transp. Relleno (CTRR)	\$ -	\$ -	0%	
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 1,082,604.2	\$ 1,587,345.6	46.6%	
Cost. Transp. Refinería (CTB)	\$ 1,814,500.7	\$ 1,413,377.1	-22.1%	
Cost. Transp. Central (CTE)	\$ 1,108,014.1	\$ 461,481.5	-58.4%	
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 4,005,118.9	\$ 3,462,204.1	-13.6%	
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 8,683,299,976.1	\$ 8,683,299,976.1	0%	
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 149,940.0	\$ 149,940.0	0%	
Costos Totales CP	\$ 8,054,440.9	\$ 7,699,265.4	-4.4%	
FLUJO DE DINERO TOTAL DE LA CP	\$ 7,073,545.3	\$ 6,718,369.7	-5.0%	

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

Estas reducciones logísticas se deben a la concentración de la infraestructura y su mayor proximidad a la central eléctrica. La **Figura 6** ilustra la disposición espacial del sistema, incluyendo almacenes, plantas y flujos logísticos. También muestra el destino final de los residuos no utilizados, los

cuales son quemados en el sitio de origen, incluso en municipios donde parte de los residuos se emplean en el proceso.

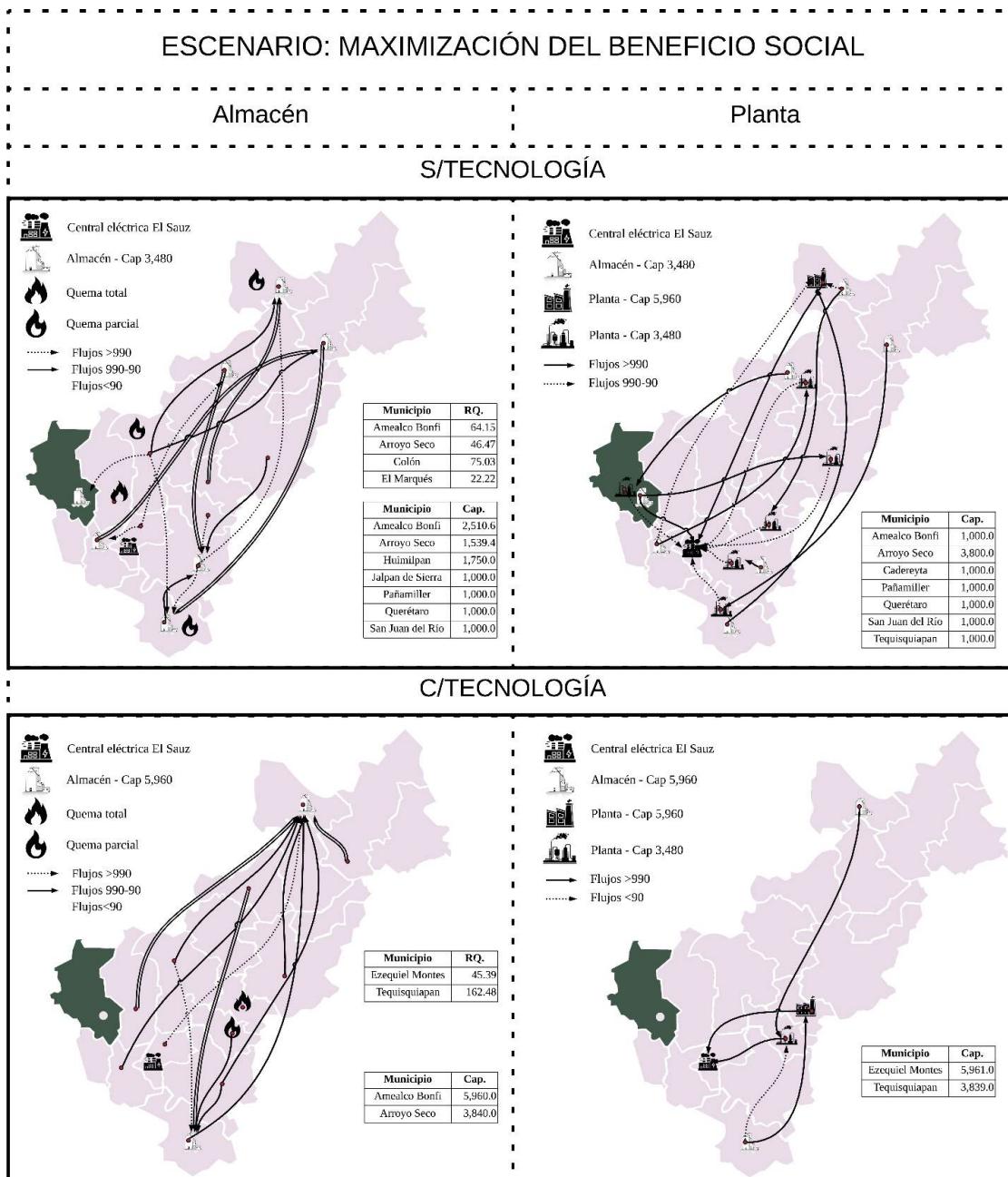


Figura 6. Comparativa de la red logística del Escenario 3: Distribución de instalaciones y residuos

Dentro de los resultados para el análisis ambiental, el único caso donde se presentan diferencias significativas entre el uso o no de la tecnología es en el escenario de maximización del beneficio social. Estas diferencias se deben principalmente a la cantidad de almacenes instalados y a la capacidad

operativa de cada uno, lo que genera variaciones en las emisiones, especialmente en las relacionadas con el cambio y ocupación de tierras. En el caso del almacén con control de temperatura y humedad, las emisiones por cambio y ocupación de tierras son 49.4% menores en comparación con el almacén sin control. Esto se debe a que la tecnología permite una gestión más eficiente de los recursos y reduce la necesidad de ocupar grandes extensiones de tierra.

Además, las emisiones por transporte también presentan una variación significativa, con una reducción del 13.6% en el escenario con tecnología. Esta disminución se atribuye a una logística más optimizada y a la proximidad de los almacenes con tecnología a las plantas de producción y la central eléctrica.

Estos resultados se resumen en la **Tabla 14**, donde se detallan las emisiones generadas en ambos escenarios y se comparan los porcentajes de variación para cada categoría.

Tabla 14. *Impacto social: Comparativa ambiental entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.*

Maximización del beneficio social			
Variables	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación *
Emis. Fijadas (ECO_2F)	31,825.0	31,825.0	0%
Emis. CP CO ₂ c/cambio de tierra (ETE)	41,800.9	40,971.5	2.0%
Emis. CP CO ₂ s/cambio de tierra (ETE)	40,245.6	40,184.1	0.2%
Emis. CN CO ₂ (ETF)	2,703,567.9	2,703,567.9	0%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	9,975.9	9,146.5	8.3%
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EIP)	1,555.4	787.5	49.4%
Emis. Transp. MP (BECO_2_T)	205.5	160.1	22.1%
Emis. Prod. Pellets (EECO_2)	736.9	736.9	0%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T)	125.5	52.3	58.4%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	39,054.9	39,054.9	0%
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	122.6	179.8	-46.6%
Emis. Quema (QEKO_2)	0.5	0.5	0%
Emis. Relleno (UREKO_2)	0.0	0.0	0%
Emis. Transporte a Relleno (URECO_2_T)	0.0	0.0	0%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCEKO_2_T)	12,546.1	12,546.1	0%

Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	2,691,021.3	2,691,021.3	0%
Flujo de Combustible Conv. (FCC_R)	429,190.0	429,190.0	0%

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

En este caso, se observa una reducción del 54.3% en la inversión destinada a salud, educación e ingreso per cápita, y una disminución del 71.4% en el salario total destinado a los trabajadores y en el número de empleados. Estas variaciones se deben a la menor cantidad de almacenes y plantas instaladas en el escenario con tecnología. Estos resultados se resumen en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Impacto social: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Maximización del beneficio social				
Variables	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*	
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 203,799.4	\$ 93,147.6	54.3%	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 203,799.4	\$ 93,147.6	54.3%	
Dinero de inversión per cápita (MIWA_PIB)	\$ 244,559.3	\$ 111,777.1	54.3%	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 652,158.0	\$ 298,072.4	54.3%	
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 2,321,070.0	\$ 663,162.9	71.4%	
Tasa de retención (TRW)	495,780.6	141,651.6	71.4%	
Cantidad de trabajadores (TW)	3,225.0	921.0	71.4%	
Salario a cada trabajador	\$ 719.7	\$ 720.1	0.1%	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

XV.VI RESULTADOS MODELO ESTÁTICO: METODOLOGÍA II

En el modelo propuesto, utilizando la metodología II, de igual manera que en la metodología I se evaluó el desempeño de dos opciones: almacenes con y sin tecnología de control de temperatura y humedad. Además, se analizaron tres escenarios de optimización: maximización del beneficio económico, maximización del beneficio social y minimización de las emisiones de CO₂. La mayoría de los parámetros utilizados en ambas metodologías fueron consistentes, con la excepción de los costos asociados a los almacenes y plantas. Los cálculos de estos costos se presentan en el Anexo 1. El total de residuos generados por el cultivo de jitomate en el estado de Querétaro se estimó en 10,007.9 toneladas por año, con una capacidad de fijación de 31,852

toneladas de CO₂. Por otro lado, la demanda energética a satisfacer se calculó en 20,676,602,952 MJ/año (5,743,500,820 kWh/año), basándose en el consumo energético per cápita reportado por SENER y la población del estado de Querétaro (INEGI, 2022).

XV.VI.IANÁLISIS METODOLOGÍA II

XV.VI.I.I *Escenario 1.1: Maximización del beneficio económico (almacén sin tecnología)*

En este escenario, que prioriza la maximización del beneficio económico sin considerar el control de temperatura y humedad en los almacenes, los resultados indican que las ganancias serían negativas, alcanzando un valor de -\$2,676,636.9 USD/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la cadena propuesta serían de 8,622 toneladas de CO₂/año. Este escenario permitiría la contratación de 691 trabajadores, distribuidos entre el almacén y la planta de producción, generando un beneficio social calculado en ~\$51,016 USD/año.

En cuanto a la producción y operación, se procesarían 9,800 toneladas de residuos al año, generando 8,036 toneladas de pellets en el mismo periodo. El modelo propone la instalación de dos almacenes en los municipios de Colón y Pedro Escobedo, con una capacidad de 405 toneladas al año y ~3,554 toneladas por año, respectivamente. Ambos almacenes operarían al 100% de su capacidad, recibiendo un flujo equivalente a su capacidad máxima. La planta de producción de pellets se ubicaría en Pedro Escobedo, con una capacidad operativa de 9,800 toneladas por año, juntando los flujos de los dos almacenes instalados.

Respecto a los costos, la instalación y operación de los almacenes implican un costo fijo de \$13.2 USD por año y un costo variable de \$75.5 USD por año para el almacén de Colón, mientras que para el de Pedro Escobedo el costo fijo es de \$11.6 USD por año y el variable de \$57.8 USD por año, lo

que representa un gasto anual de \$696,887 USD por ambos almacenes instalados. Por su parte, la instalación y operación de la planta tienen un costo fijo de \$19.6 USD por año y un costo variable de \$221.5 USD por año, sumando un total de ~\$2,362,986 USD/año.

Los residuos no empleados serían quemados en el lugar, generando una multa de ~\$4,225 USD, calculada bajo el supuesto de que la quema ocurre una vez al año, con un costo de \$32.03 USD por ton CO₂, según MÉXICO2 (2024). Además, el traslado de residuos al almacén tendría un costo de \$313,316 USD/año, y el transporte de éstos del almacén a la planta generaría un costo de \$66,470 USD/año. Finalmente, el envío de los pellets producidos a la central eléctrica tendría un costo de ~\$67,933 USD/año, mientras que el pago a los agricultores por los residuos utilizados ascendería a \$149,940 USD/año. Las ganancias obtenidas por la venta y manejo de los residuos son de ~\$424,214 USD/año y \$336,490 USD/año, respectivamente. En total, los costos asociados a la cadena propuesta, que incluyen la recolección de los residuos, transporte al almacén, almacenamiento, transporte a la planta de pellets, procesamiento en la planta y distribución final a la central eléctrica, ascienden a ~\$3,657,533 USD/año.

La evaluación de emisiones de la cadena propuesta (CP), que comprende la recolección de residuos, almacenamiento, transporte de materia prima a la planta, producción de pellets, transporte a la central eléctrica y su uso final, arroja un total de 40,447 toneladas de CO₂/año. No obstante, al considerar la captura de carbono por parte de los cultivos utilizados como materia prima (31,825 toneladas de CO₂/año), las emisiones netas de la CP se reducen a 8,622 toneladas de CO₂/año. En la cadena convencional (CN), las emisiones totales ascienden a ~2,693,312 toneladas de CO₂ por año. Este cálculo incluye el transporte del combustible desde las refinerías de Salamanca (Guanajuato) o Tula (Hidalgo) hacia el estado de Querétaro, así como su uso. Además, se suman las emisiones generadas por la quema o tratamiento de los residuos no utilizados en la CP. Para calcular los costos

asociados a las emisiones, se emplearon los valores del programa GREET® 2023. De acuerdo con la regulación vigente en Querétaro sobre bonos de carbono e impuestos subnacionales, el costo por tonelada de CO₂ es de \$32.03 USD (640.6 MXN) (MÉXICO₂, 2024). Aplicando este costo, los impuestos al carbono de la CP ascienden a ~\$276,147 USD/año, mientras que para la CN alcanzan \$86,188,336 USD/año. Esto implica que la CP representa sólo el 0.32% de los impuestos generados por la CN, evidenciando un ahorro económico sustancial en términos de penalización por emisiones de carbono. En términos de distribución de emisiones dentro de cada cadena, las emisiones principales de la CP son las generadas por el uso de pellets (~39,055 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por la producción de pellets (736.9 ton CO₂/año) y las emisiones por ocupación y cambio de tierra (604.5 ton CO₂/año). Las emisiones por transporte en la CP representan sólo el 0.13% del total de las emisiones. En la CN, las fuentes más relevantes son las generadas por el uso de combustibles convencionales (2,961,018 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por transporte (~2,293 ton CO₂/año). Las emisiones por la quema de residuos no utilizados (0.51 ton CO₂/año) no son representativas en el total de la CN. Cabe destacar que, en este escenario, el modelo seleccionó la Refinería de Salamanca en Guanajuato como la principal fuente de suministro de combustible, con un flujo de ~429,190 ton/año para satisfacer la demanda.

Los resultados muestran que la CP, incluso sin tecnología en el almacenamiento, genera significativamente menos emisiones que la CN, reduciendo aproximadamente 99.68% de los impuestos al carbono en comparación con los combustibles convencionales. Además, la fijación de carbono por los cultivos contribuye a disminuir las emisiones netas de la CP en 78.6%. El impacto del transporte dentro de la CP es mínimo en comparación con la CN, lo que sugiere que el modelo logístico de biomasa para pellets es más eficiente en términos de emisiones de carbono que el transporte de combustibles fósiles.

En este escenario, la inversión anual en los sectores de salud y educación alcanza los ~\$15,943 USD, mientras que la inversión per cápita es de ~\$19,131 USD/año. En total, el beneficio social generado asciende a ~\$51,016 USD/año, lo que representa aproximadamente el 0.0001% del PIB de Querétaro. Desde una perspectiva porcentual, la contribución de la cadena a los sectores de salud y educación equivale al 0.001%, mientras que para el ingreso per cápita representa el 0.002%.

En términos de empleo, este escenario contempla la contratación de 691 trabajadores distribuidos entre el almacén y la planta de producción de pellets.

XV.VI.I.II Escenario 1.2: Maximización del beneficio económico (almacén con tecnología)

En este escenario, que prioriza la maximización del beneficio económico sin considerar el control de temperatura y humedad en los almacenes, los resultados indican que las ganancias serían negativas, alcanzando un valor de -\$4,400,129 USD/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la cadena propuesta serían de ~8,640 toneladas de CO₂/año. Este escenario permitiría la contratación de 691 trabajadores, distribuidos entre el almacén y la planta de producción, generando un beneficio social calculado en ~\$306,149 USD/año.

En cuanto a la producción y operación, se procesan la misma cantidad de residuos, así como de pellets que los del escenario 2.2. Por otro lado, el modelo propone la instalación de nueve almacenes en diferentes municipios, así como de capacidad. En cuanto a los costos, los costos fijos y los costos variables de cada planta se representan en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Capacidad y costos de almacenes.

Ubicación (X1)	Cap. Almacenes (FRA_A) Flujo en Almacenes (FRA_A)	Costos Fijos (CF_A)	Costos Variables (CV_A)
Cadereyta	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
Colón	1,800.0	\$ 17.9	\$ 155.2
El Marqués	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
Ezequiel Montes	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
Huimilpan	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
Pedro Escobedo	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
Querétaro	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
San Juan del Río	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8
Tequisquiapan	1,000.0	\$ 18.5	\$ 159.8

De igual manera, las plantas de producción de pellets son instaladas en los mismos municipios que la de los almacenes. Los costos fijos y los costos variables se presentan en la **Tabla 17**. Los costos asociados a la instalación y operación de los almacenes ascenderían a \$1,737,898 USD/año, lo que representa 1.5 veces más que la de los costos del almacén sin tecnología. Por su parte, las plantas de producción de pellets tendrían un costo de \$2,887,498 USD/año que representan el 22.2% más que los del escenario 1.1. Las ganancias por venta del pellet y al manejo de residuos son de \$552,636 USD/año y \$428,260 USD/año, respectivamente.

Tabla 17. Capacidad y costos de plantas.

Ubicación (X2)	Cap. Plantas (FTMPR) Flujo en Plantas (FTMPR)	Costos Fijos (CF_P)	Costos Variables (CV_P)
Cadereyta	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
Colón	1,800.0	\$ 22.9	\$ 264.7
El Marqués	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
Ezequiel Montes	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
Huimilpan	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
Pedro Escobedo	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
Querétaro	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
San Juan del Río	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5
Tequisquiapan	1,000.0	\$ 23.7	\$ 272.5

Los gastos por quema de los residuos no utilizados y el pago a los agricultores se mantienen iguales a los reportados en el escenario 1.1 de la metodología II. En tanto a los otros gastos, los costos de traslado de residuos hacia el almacén ascienden a \$217,217 USD/año, el transporte hacia la refinería a ~\$10,901 USD/año y el transporte de los pellets a la central eléctrica a ~\$605,689 USD/año. El costo total de transporte de la cadena propuesta se

incrementa al de la opción sin tecnología, con un monto total de \$605,689 USD/año.

La implementación de tecnología en el almacenamiento no tiene una gran variación en las emisiones netas de la CP, pese a tener valores diferentes las emisiones por transporte al almacén (24.6 ton CO₂/año), la planta (1.2 ton CO₂/año) y a la central (42.8 ton CO₂/año) las emisiones netas de la CP son de ~8,640 toneladas de CO₂ al año. Por otro lado, las emisiones generadas por la CN se mantienen idénticas a los de la 1.1; sin embargo, los costos asociados a los impuestos al carbono por la CP son de ~\$276,720 USD y la CN registra un costo anual de \$86,188,336 USD.

En la CP, el uso de pellets sigue representando la mayor parte de las emisiones (39,055 toneladas de CO₂ al año), seguido de la producción de pellets (736.9 toneladas de CO₂ al año) y las emisiones por ocupación y cambio de uso de suelo (604.5 toneladas de CO₂ al año). En la CN, el uso de combustibles convencionales (2,691,018 toneladas de CO₂ al año) y el transporte de éstos (~2,293 toneladas de CO₂ al año) continúan dominando las emisiones totales. Al igual que en el escenario anterior, la Refinería de Guanajuato fue seleccionada como fuente de suministro de combustibles fósiles.

En este escenario, la implementación de tecnología en el almacenamiento genera un incremento en la inversión social. La inversión en salud y educación aumenta a ~\$95,672 USD/año, mientras que la inversión per cápita se eleva a ~\$114,806 USD/año. Esto genera un beneficio social total de \$306,149 USD/año, equivalente al 0.0007% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena en términos porcentuales es del 0.007% para los sectores de salud y educación, y del 0.013% para el ingreso per cápita. Además, el número de trabajadores contratados es de 4,147 personas.

XV.VI.I.III Análisis económico: Comparativa entre escenarios 1.1 y

1.2

La **Tabla 18** presenta una comparación de los datos obtenidos en los escenarios de maximización del rendimiento económico, evaluando el desempeño de ambos escenarios. Se destaca que la principal diferencia entre ambas opciones radica en los costos asociados al uso de la tecnología. El almacén con control de temperatura y humedad implica un incremento del 64.4% en el flujo de dinero total en comparación con el almacén sin tecnología. Esto se debe a que, como se observa en la tabla, los costos del almacén con tecnología son ~1.5 más que los del almacén sin tecnología. Así mismo, los costos por las plantas instaladas incrementan en un 22.2% debido a la instalación de más plantas, pese a manejar el flujo neto de residuos iguales; sin embargo, estos costos disminuyen al incrementar la capacidad de las plantas, por caso contrario aumentan con la instalación de plantas con capacidad pequeña. La **Figura 7** ofrece una representación visual de la ubicación de los almacenes y plantas, así como el flujo de materiales dentro del sistema. Incluye el destino de los residuos no procesados, que en este caso son quemados en el mismo lugar donde se generan. Cabe mencionar que en algunos municipios que utilizan residuos una parte de éstos también se quema.

Tabla 18. Impacto económico-Metodología II: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento

Minimización de las emisiones				
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación *	
Ventas (GV)	\$ 552,635.7	\$ 552,635.7	0%	
Gan. Manejo (GM)	\$ 428,260.0	\$ 428,260.0	0%	
Ingresos Totales	\$ 980,895.7	\$ 980,895.7	0%	
Costos Fijos Almacén (CF_A)	\$ 13.2 \$ 11.6	\$ 18.5	≠	
		\$ 17.9		
		\$ 18.5		
		\$ 18.5		
		\$ 18.5		
		\$ 18.5		
		\$ 18.5		

			\$ 18.5	
			\$ 159.8	
			\$ 155.2	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
Costos Variables Almacén (CV_A)	\$ 75.5		\$ 159.8	
	\$ 57.8		\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
			\$ 159.8	
Costos Almacén (CC_A)	\$ 696,887.4		\$ 1,737,898.1	149.4%
			\$ 23.7	
			\$ 22.9	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
Costos Fijos Plantas (CF_P)	\$ 19.6		\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
			\$ 23.7	
Costos Variables Plantas (CV_P)	\$ 221.5		\$ 272.5	
			\$ 264.7	
			\$ 272.5	
			\$ 272.5	
			\$ 272.5	
			\$ 272.5	
			\$ 272.5	
			\$ 272.5	
Costos Plantas (CC_P)	\$ 2,362,985.8		\$ 2,887,497.8	22.2%
Cotos Totales Instalación Plantas (CTCC)	\$ 3,059,873.2		\$ 4,625,395.9	51.2%
Cost. Quema (CQR)	\$ 878,160.8		\$ 878,160.8	0%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -		\$ -	0%
Cost. Transp. Relleno (CTRR)	\$ -		\$ -	0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 313,316.4		\$ 217,217.0	-30.7%
Cost. Transp. Refinería (CTB)	\$ 66,470.1		\$ 10,900.7	-83.6%
Cost. Transp. Central (CTE)	\$ 67,932.9		\$ 377,571.2	455.8%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 447,719.4		\$ 605,688.8	35.3%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 8,683,290,153.5		\$ 8,683,290,153.5	0%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 149,940.0		\$ 149,940.0	0%
Costos Totales CP	\$ 3,657,532.6		\$ 5,381,024.7	47.1%
FLUJO DE DINERO TOTAL DE LA CP	\$ 2,676,636.9		\$ 4,400,129.0	64.4%

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

ESCENARIO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA

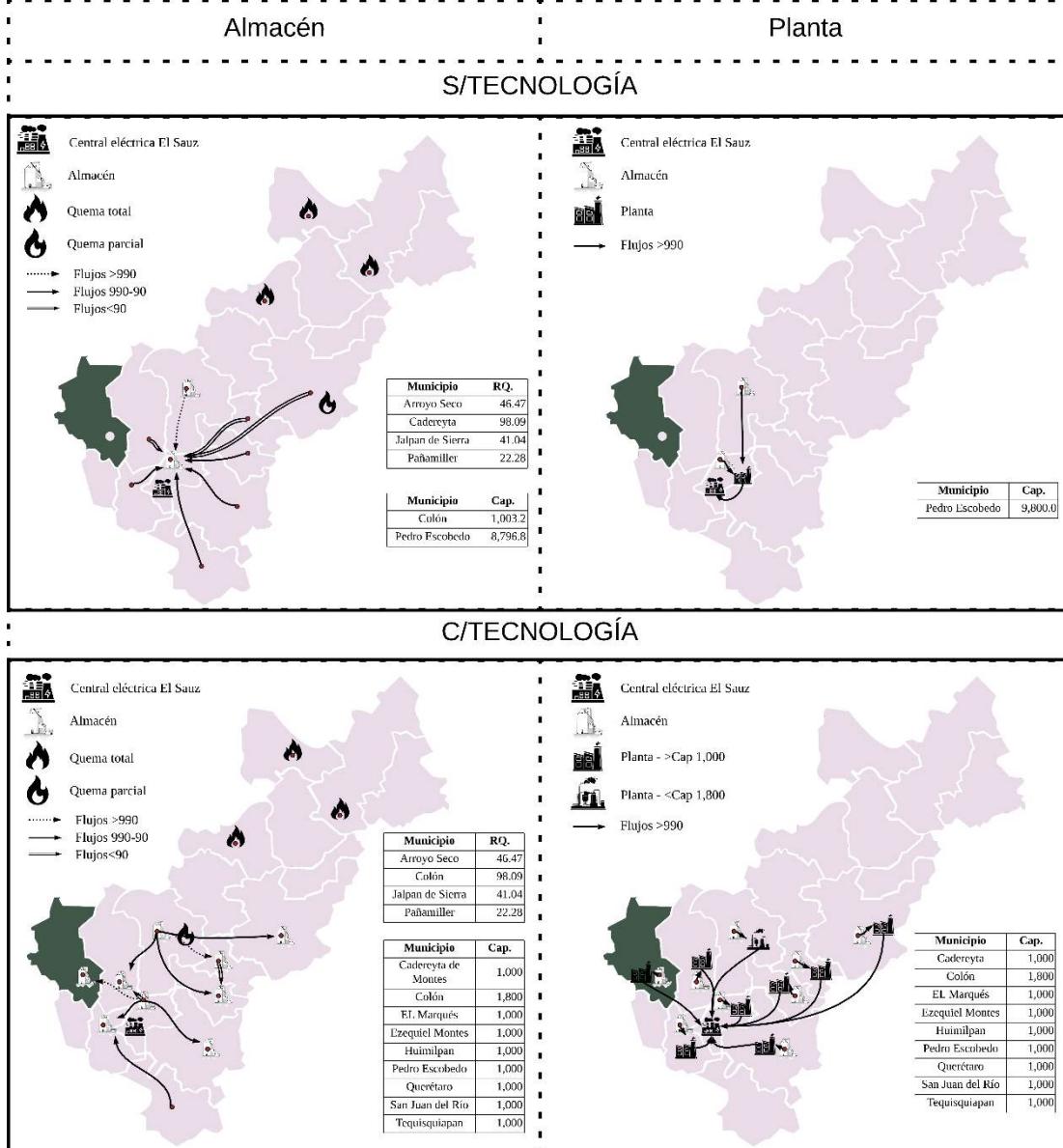


Figura 7. Comparativa de la red logística del Escenario 1: Distribución de instalaciones y residuos. Metodología II

Por otro lado, el transporte hacia el almacén disminuye en el escenario 1.2 en un 30.7%, así como en el transporte hacia la planta de producción de pellets con un 83.6%, mientras que los costos por transporte hacia la central eléctrica aumentan ~4.6 veces. Dando así que los costos totales de la CP incrementan en un 64.4% con respecto a los del escenario 1.1.

Dentro de los resultados para el análisis ambiental, se tienen diferencias en las emisiones generadas por el transporte; esto se debe principalmente a la diferencia entre las ubicaciones de los almacenes y plantas, así como la capacidad de éstas. Sin embargo, dentro del balance global de ambos escenarios, las emisiones totales en cada escenario numéricamente son casi las mismas, con apenas una variación del 0.2% con respecto al escenario 1.1.

Particularmente, en el caso del almacén con control de temperatura y humedad, las emisiones debidas al transporte de los residuos al almacén junto con las del transporte de la materia prima a la planta tienen una disminución del 30.7% y 83.6%, respectivamente; esto en comparación con el almacén sin control. Por otro lado, las emisiones por transporte de los pellets a la central eléctrica aumentan en un 455.8% con respecto a la del almacén sin control. En ambos balances las emisiones por transporte representan un valor del 0.27% del total de las emisiones.

En la

Tabla 19 se presenta un compendio de los resultados obtenidos en estos escenarios. De manera global, la implementación de tecnología en el almacenamiento no genera grandes diferencias en términos de emisiones o costos de impuestos al carbono (+0.2%).

Tabla 19. Impacto económico-Metodología II: Comparativa ambiental entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Minimización de las emisiones			
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación *
Emis. Fijadas (ECO_2F)	31,825.0	31,825.0	0%
Emis. CP CO ₂ c/cambio de tierra (ETE)	40,447.0	40,464.9	0%
Emis. CP CO ₂ s/cambio de tierra (ETE)	39,842.6	39,860.5	0%
Emis. CN CO ₂ (ETF)	2,693,311.7	2,693,311.7	0%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	8,622.0	8,639.9	0.2%
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EIP)	604.5	604.5	0%
Emis. Transp. MP (BECO_2_T)	7.5	1.2	-83.6%

Emis. Prod. Pellets (EECO_2)	736.9	736.9	0%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T)	7.7	42.8	455.8%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	39,055.0	39,055.0	0%
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	35.5	24.6	-30.7%
Emis. Quema (QEKO_2)	0.5	0.5	0%
Emis. Relleno (URECO_2)	0.0	0.0	0%
Emis. Transporte a Relleno (URECO_2_T)	0.0	0.0	0%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCECO_2_T)	2,292.9	2,292.9	0%
Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	2,691,018.3	2,691,018.3	0%
Flujo de Combustible Conv. (FCC_R)	429,189.5	429,189.5	0%

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

Se observa un aumento relevante en la inversión social al incorporar tecnología en el almacenamiento. La inversión en salud, educación, per cápita, así como el número de trabajadores se vuelve 5 veces mayor en el escenario con tecnología. Este incremento se debe a los mayores costos asociados a las plantas con tecnología, así como al número de almacenes y plantas instaladas; lo que a su vez genera un mayor impacto económico, así como un mayor impacto en la generación de empleo. Los resultados detallados se presentan en la siguiente **Tabla 20**.

Tabla 20. *Impacto económico-Metodología II: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.*

Minimización de emisiones				
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*	
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 15,942.5	\$ 25,060.0	500.1%	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 15,942.5	\$ 95,671.6	500.1%	
Dinero de inversión per cápita (MIWA_PIB)	\$ 19,130.9	\$ 114,805.9	500.1%	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 51,015.8	\$ 306,149.1	500.1%	
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 497,372.1	\$ 2,984,232.9	500%	
Tasa de retención (TRW)	\$ 106,238.7	\$ 637,432.1	500%	
Cantidad de trabajadores (TW)	691.0	4,147.0	500.1%	
Salario a cada trabajador	\$ 719.8	\$ 719.6	0%	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

XV.VI.I.IV Escenario 2.1: Minimización de las emisiones (almacén sin tecnología)

En este escenario, enfocado en la minimización de las emisiones y sin considerar el control de temperatura y humedad en el almacenamiento, los resultados muestran una ganancia de -\$2,701,608 USD/año. Sin embargo, las emisiones generadas por la cadena propuesta serían de 0 toneladas de CO₂/año ya que las emisiones generadas se neutralizan con las emisiones que los residuos fijan. Este escenario permitiría la contratación de 543 trabajadores (con un salario mensual de \$719.7 USD), distribuidos entre el almacén y la planta de producción, generando un beneficio social calculado en \$40,093 USD/año.

En cuanto a la producción y operación, se procesarían 7,700 toneladas de residuos al año, generando 6,314 toneladas de pellets en el mismo periodo. El modelo propone la instalación de un único almacén en el municipio de Colón, con una capacidad de 7,700 toneladas al año. Este almacén operaría al 100% de su capacidad. Se instalarían dos plantas de producción de pellets, una en el mismo municipio y otra en Querétaro con capacidades operativas de 4,922 ton/año y ~2,778 ton/año, respectivamente. Las ganancias obtenidas por la venta de pellets y el manejo de los residuos son de ~\$434,214 USD/año y \$336,490 USD/año, respectivamente.

Respecto a los costos asociados, la instalación y operación del almacén implicarían un gasto anual de \$545,327 USD, con un costo fijo de \$11.6 USD/ton y un costo variable de \$59.3 USD/ton. La instalación y operación de la planta tendrían un costo de ~\$2,058,179 USD. Para la planta de Colón, los costos fijos y variables son de \$20.9 USD/ton y \$240.2 USD/ton, respectivamente, mientras que para la planta de Querétaro los costos fijos y variables son de \$22.23 USD/ton y \$255.99 USD/ton, respectivamente.

Los residuos no empleados serían quemados en el lugar (según lo establecido en el modelo), lo que generaría una multa de ~\$4,225 USD/año

calculado bajo el supuesto de que la quema ocurre una única vez al año, con un costo de \$32.03 USD/ton CO₂, según lo reportado por MÉXICO₂ (2024). Además, el traslado de residuos al almacén tendría un costo de \$202,389 USD/año, y el transporte de éstos del almacén a la planta generaría un costo de ~\$187,785 USD/año. Finalmente, el envío de los pellets producidos a la central eléctrica tendría un costo de \$360,822 USD/año, mientras que el pago a los agricultores por los residuos utilizados en el proceso ascendería a \$117,810 USD/año. En total, los costos asociados a la cadena propuesta (recolección, transporte, almacenamiento, procesamiento y distribución) ascienden a \$3,472,312 USD/año. Estos resultados corresponden únicamente al análisis del almacenamiento sin tecnología. Cabe mencionar que se mantienen los límites de la cadena ilustrados en la **Figura 2**.

En este escenario, la CP genera un total de 31,825 toneladas de CO₂/año. Sin embargo, debido a que esta cantidad coincide con el CO₂ fijado por los cultivos utilizados como materia prima, las emisiones netas de la CP se reducen a 0 toneladas de CO₂/año. Por otro lado, la cadena normal (CN) de combustibles convencionales produce 2,695,432 toneladas de CO₂/año. Desde el punto de vista económico, los impuestos al carbono en la CP son 0 USD/año, mientras que en la CN ascienden a ~\$86,256,028 USD/año, lo que demuestra una ventaja significativa en términos de costos ambientales y fiscales al optar por la CP. Las emisiones más representativas de la CP son las generadas por el uso de pellets (30,686 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por la producción de pellets (578.9 ton CO₂/año) y las generadas por ocupación y cambio de tierra (474.9 ton CO₂/año). Las emisiones por transporte en la CP representan sólo el 0.27% del total. En la CN, las emisiones más relevantes son las generadas por el uso de combustibles convencionales (~2,693,132 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por transporte del combustible (2,294.7 ton CO₂/año). Cabe destacar que el modelo seleccionó la Refinería de Guanajuato como fuente principal de combustible, enviando un flujo de ~429,527 ton/año para cubrir la demanda.

La inversión anual en los sectores de salud y educación es de \$12,529 USD, mientras que la inversión per cápita asciende a \$15,035 USD/año. Como resultado, el beneficio social total generado alcanza \$40,093 USD/año, equivalente al 0.0001% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena en términos porcentuales es del 0.001% para los sectores de salud y educación, y del 0.002% para el ingreso per cápita.

XV.VI.I.V Escenario 2.2: Minimización de las emisiones (almacén con tecnología)

En este escenario, que considera un almacén con control de temperatura y humedad, los resultados muestran que las ganancias serían negativas, con un monto de -\$3,465,943 USD/año. Este resultado se obtiene al balancear las ganancias totales de ~\$770,704 USD/año con los costos totales de la cadena propuesta, que ascienden a -\$4,236,647 USD/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la cadena serían de 0 toneladas de CO₂/año, manteniéndose neutralizadas como en el escenario anterior. Además, este escenario permitiría la contratación de 1,086 trabajadores (con el mismo salario del escenario anterior), generando un beneficio social estimado en \$80,192 USD/año.

Los volúmenes de residuos quemados y pellets generados permanecen idénticos al escenario sin tecnología. Sin embargo, la capacidad y localización de la infraestructura se modificó, teniendo almacenes en Colón, El Marqués y San Juan del Río, con capacidades de 1,923.6 ton/año, 4,761.2 ton/año y 1,015.2 ton/año, respectivamente. Cada planta opera al 100% de su capacidad.

Los costos fijos y los costos variables de cada planta son los siguientes: \$17.89 USD/ton y \$154.47 USD/ton para la planta de Colón, \$16.38 USD/ton y \$141.44 USD/ton para la planta de El Marqués y \$18.51 USD/ton y \$159.67 USD/ton para la planta de San Juan del Río. Por otro lado, las plantas de producción de pellets son instaladas en los municipios de Colón, Pedro

Escobedo y San Juan del Río, cambiando únicamente una localización con respecto a la de los almacenes. Los costos asociados a la instalación y operación de los almacenes ascenderían a \$1,263,861 USD/año, lo que representa más del doble del costo del almacén sin tecnología. Por su parte, las plantas de producción de pellets tendrían un costo de \$2,103,979 USD/año. Las ganancias por venta del pellet y al manejo de residuos son de ~\$434,214 USD/año y \$336,490 USD/año, respectivamente. Los gastos por quema de los residuos no utilizados y el pago a los agricultores se mantienen iguales a los reportados en el escenario sin tecnología, debido a que se tienen la misma cantidad de residuos sin tratar. En tanto a los otros gastos, los costos de traslado de residuos hacia el almacén ascienden a \$230,781 USD/año, el transporte hacia la refinería a ~\$235,730 USD/año y el transporte de los pellets a la central eléctrica disminuye a ~\$284,486 USD/año. Sin embargo, el costo total de transporte de la cadena propuesta se mantiene igual al de la opción sin tecnología, con un monto total de \$750,996 USD/año.

Las emisiones netas de la CP siguen siendo de 0 toneladas de CO₂ al año. De manera similar, las emisiones generadas por la CN y los costos asociados a los impuestos al carbono se mantienen idénticos. Así, mientras que la CP no incurre en gastos por impuestos al carbono, la CN sigue registrando un costo anual de ~\$86,256,028 USD. Las fuentes principales de emisiones en ambas cadenas también permanecen sin cambios. En la CP, el uso de pellets sigue representando la mayor parte de las emisiones (30,686 toneladas de CO₂ al año), seguido de la producción de pellets (578.9 toneladas de CO₂ al año), así como las emisiones por ocupación y cambio de uso de suelo (474.9 toneladas de CO₂ al año). En la CN, el uso de combustibles convencionales (~2,693,132 toneladas de CO₂ al año) y el transporte de éstos (~2,295 toneladas de CO₂ al año) continúan dominando las emisiones totales. Al igual que en el escenario anterior, la Refinería de Guanajuato fue seleccionada como fuente de suministro de combustibles fósiles.

En este escenario, la implementación de tecnología en el almacenamiento genera un incremento en la inversión social. La inversión en salud y educación aumenta a \$25,060 USD/año, mientras que la inversión per cápita se eleva a \$30,072 USD/año. Esto genera un beneficio social total de \$80,192 USD/año, equivalente al 0.0002% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena en términos porcentuales es del 0.002% para los sectores de salud y educación, y del 0.003% para el ingreso per cápita.

XV.VI.I.VI Análisis ambiental: Resumen comparativo. Comparativa entre escenarios 2.1 y 2.2

La

presenta una comparación de los datos obtenidos en los escenarios de minimización de emisiones, evaluando el desempeño de ambas tecnologías (con y sin control de temperatura y humedad). Se destaca que la principal diferencia entre ambas opciones radica en los costos asociados al uso de la tecnología. El almacén con control de temperatura y humedad implica un incremento del 28.3% en el flujo de dinero total en comparación con el almacén sin tecnología. Esto se debe a que, como se observa en la tabla, los costos del almacén con tecnología son más del doble que los del almacén sin tecnología.

Tabla 21. Impacto ambiental-Metodología II: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Minimización de las emisiones				
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*	
Ventas (GV)	\$ 434,213.8	\$ 434,213.8	0%	
Gan. Manejo (GM)	\$ 336,490.0	\$ 336,490.0	0%	
Ingresos Totales	\$ 770,703.8	\$ 770,703.8	0%	
Costos Fijos Almacén (CF_A)	\$ 11.6	\$ 17.9 \$ 16.4 \$ 18.5	≠	
Costos Variables Almacén (CV_A)	\$ 59.3	\$ 154.5 \$ 141.4 \$ 159.7	≠	
Costos Almacén (CC_A)	\$ 545,327.1	\$ 1,263,861.1	131.8%	

Costos Plantas (CC_P)	\$ 2,058,178.8	\$ 2,103,979.4	2.2%
Cotos Totales Instalación Plantas (CTCC)	\$ 2,603,505.9	\$ 3,367,840.4	29.4%
Cost. Quema (CQR)	\$ 4,224.5	\$ 4,224.5	0%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	\$ -	0%
Cost. Transp. Relleno (CTRR)	\$ -	\$ -	0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 202,389.4	\$ 230,781.1	14.0%
Cost. Transp. Refinería (CTB)	\$ 187,784.8	\$ 235,729.5	25.5%
Cost. Transp. Central (CTE)	\$ 360,822.1	\$ 284,485.7	-21.2%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 750,996.3	\$ 750,996.3	0%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 8,690,109,929.8	\$ 8,690,109,929.8	0%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 117,810.0	\$ 117,810.0	0%
Costos Totales CP	\$ 3,472,312.2	\$ 4,236,646.7	22.0%
FLUJO DE DINERO TOTAL DE LA CP	\$ 2,701,608.4	\$ 3,465,942.9	28.3%

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

Así mismo, los costos por transporte hacia el almacén aumentan en el escenario con la implementación de la tecnología en un 14%, así como en el transporte hacia la planta de producción de pellets en un 25.5%, mientras que los costos por transporte hacia la central eléctrica disminuyen en un 21.2%. Por otro lado, los costos capitales por instalación de las plantas aumentan en 2.2% debido a la instalación de una planta adicional en comparación con el escenario sin tecnología, además de las capacidades de cada planta.

Otro aspecto para resaltar es el hecho de que la cantidad de almacenes se incrementa, instalando dos almacenes más en el escenario con tecnología respecto al que no la considera. La **Figura 8** ofrece una representación visual de la ubicación de los almacenes y plantas, así como el flujo de materiales dentro del sistema. Incluye el destino de los residuos no procesados, que en este caso son quemados en el mismo lugar donde se generan. Cabe mencionar que en algunos municipios que utilizan residuos una parte de éstos también se quema.

Dentro de los resultados para el análisis ambiental, se tienen diferencias en las emisiones generadas por el transporte; esto se debe

principalmente a la diferencia entre las ubicaciones de los almacenes y plantas, así como la capacidad de éstas. Sin embargo, dentro del balance global de ambos escenarios, las emisiones totales en cada escenario numéricamente son las mismas.

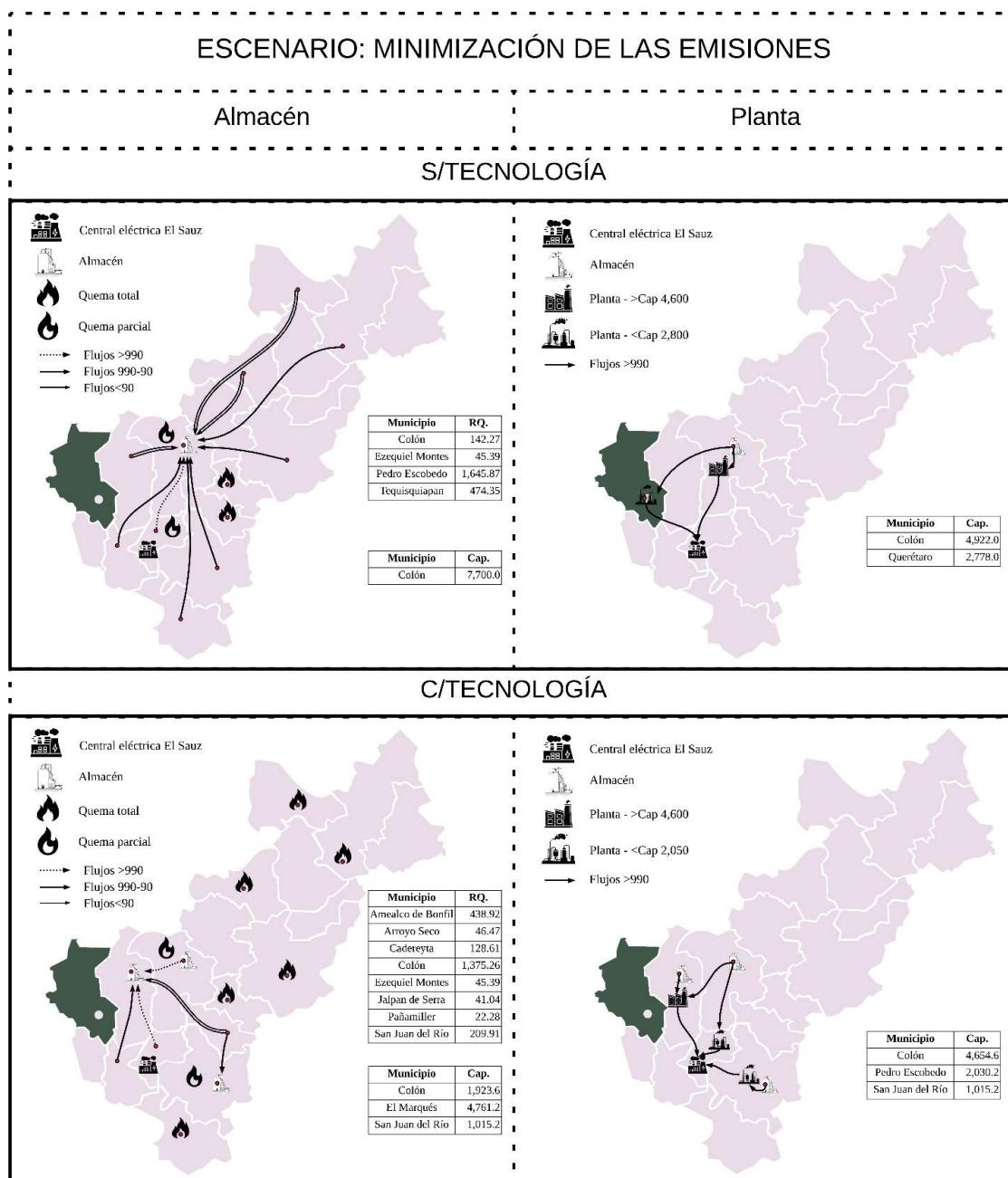


Figura 8. Comparativa de la red logística del Escenario 2: Distribución de instalaciones y residuos. Metodología II.

Particularmente, en el caso del almacén con control de temperatura y humedad, las emisiones debidas al transporte de los residuos al almacén y al transporte de la materia prima a la planta tienen un incremento del 14% y 25.5%, respectivamente; esto en comparación con el almacén sin control. Por otro lado, las emisiones por transporte de los pellets a la central eléctrica disminuyen en un 21.2% con respecto a la del almacén sin control.

Ambos balances debido a las emisiones por transporte representan un valor del 0.27% del total de las emisiones en ambos escenarios.

La **Tabla 22** presenta un compendio de los resultados obtenidos en estos escenarios; de manera global, la implementación de tecnología en el almacenamiento no genera diferencias en términos de emisiones o costos de impuestos al carbono.

Tabla 22. *Impacto ambiental-Metodología II: Comparativa de emisiones entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.*

Minimización de las emisiones			
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación *
Emis. Fijadas (ECO_2F)	31,825.0	31,825.0	0%
Emis. CP CO ₂ c/cambio de tierra (ETE)	31,825.0	31,825.0	0%
Emis. CP CO ₂ s/cambio de tierra (ETE)	31,350.1	31,350.1	0%
Emis. CN CO ₂ (ETF)	2,695,432.2	2,695,432.2	0%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	0.0	0.0	0%
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EUCT)	474.9	474.9	0%
Emis. Transp. MP (BECO_2_T)	21.3	26.7	25.5%
Emis. Prod. Pellets (EECO_2)	578.9	578.9	0%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T)	40.9	32.2	-21.2%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	30,686.0	30,686.0	0%
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	22.9	26.1	14%
Emis. Quema (QECO_2)	5.7	5.7	0%
Emis. Relleno (URECO_2)	0.0	0.0	0%
Emis. Transporte a Relleno (URECO_2_T)	0.0	0.0	0%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCECO_2_T)	2,294.7	2,294.7	0%
Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	2,693,131.8	2,693,131.8	0%
Flujo de Combustible Conv. (FCC_R)	429,526.6	429,526.6	0%

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

Se observa un aumento significativo en la inversión social al incorporar tecnología en el almacenamiento. La inversión en salud y educación, así como aquella per cápita se duplican en el escenario con tecnología. Este incremento se debe a los mayores costos asociados a las plantas con tecnología, así como al número de almacenes y plantas instaladas, lo que a su vez genera un mayor impacto económico. El número de trabajadores también se duplica, lo que implica un mayor impacto en la generación de empleo. Los resultados detallados se presentan en la siguiente

Tabla 23.

Tabla 23. Impacto ambiental-Metodología II: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Minimización de emisiones				
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*	
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 12,529.2	\$ 25,060.0	100%	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 12,529.2	\$ 25,060.0	100%	
Dinero de inversión per cápita (MIWA_PIB)	\$ 15,035.0	\$ 30,072.0	100%	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 40,093.4	\$ 80,192.1	100%	
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 390,792.4	\$ 781,584.8	100%	
Tasa de retención (TRW)	\$ 83,473.3	\$ 166,946.5	100%	
Cantidad de trabajadores (TW)	543.0	1,086.0	100%	
Salario a cada trabajador	\$ 719.7	\$ 719.7	0%	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

XV.VI.I.VII Escenario 3.1: Maximización del beneficio social (almacén sin tecnología)

En este escenario, enfocado en la maximización del beneficio social y sin considerar el control de temperatura y humedad en el almacenamiento, los resultados muestran que las ganancias serían negativas, alcanzando un monto de -\$5,635,490 USD/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la cadena propuesta serían de ~6,091 toneladas de CO₂/año. Este escenario permitiría la contratación de 428 trabajadores, distribuidos entre el almacén y la planta de producción, generando un beneficio social calculado en \$31,583 USD/año.

En cuanto a la producción y operación, se procesarían 9,100 toneladas de residuos al año, generando 7,462 toneladas de pellets en el mismo periodo. El modelo propone la instalación de un solo almacén en el municipio de Jalpan de Sierra con una capacidad de 9,100 toneladas al año operando a la misma capacidad. Por su parte, la planta de producción de pellets se instalará en el municipio de Ezequiel Montes, con capacidad operativa de 9,100 toneladas/año. Ambas instalaciones operan al máximo de su capacidad. Las ganancias por venta del pellet y al manejo de residuos son de ~\$513,162 USD/año y \$397,670 USD/año, respectivamente.

Respecto a los costos asociados, la instalación y operación del almacén implicarían un gasto anual de ~\$627,712 USD, teniendo un costo fijo de \$11.6 USD/ton y un costo variable de \$57.4 USD/ton. Por otro lado, la instalación y operación de la planta tendrían un costo de ~\$2,205,699 USD, con un costo fijo de \$19.7 USD/ton y un costo variable de \$222.7 USD/ton. Los residuos no empleados serían quemadas en el lugar, lo que generaría una multa de ~\$4,225 USD/ton. Además, el traslado de residuos al almacén supondría un costo de \$1,615,775 USD/año. Por otra parte, el transporte de los residuos del almacén a la planta generaría un costo de ~\$1,447,452 USD/año. Finalmente, el envío de los pellets producidos a la central eléctrica tendría un costo de ~\$510,455 USD/año, mientras que el pago a los agricultores por los residuos utilizados en el proceso ascendería a \$139,230 USD/año.

En total, los costos asociados a la cadena propuesta (recolección, transporte, almacenamiento, procesamiento y distribución) ascienden a ~\$6,546,322 USD/año. Los límites de la cadena propuesta se encuentran ilustrados en la **Figura 2**. Estos resultados corresponden únicamente al análisis del almacenamiento sin tecnología.

Las emisiones totales de la CP son de ~37,916 ton CO₂/año. Sin embargo, al considerar las emisiones fijadas por los cultivos (31,825 ton

CO₂/año), las emisiones netas de la cadena se reducen a ~6,091 ton CO₂/año. Por otro lado, las emisiones generadas por la CN de combustibles convencionales alcanzan un total de 2,704,275 ton CO₂/año, reflejando una huella de carbono significativamente mayor. Desde una perspectiva económica, los costos por impuestos al carbono para la CP ascienden a \$195,072 USD al año, lo que representa sólo el 0.23% del impuesto total de la CN, que alcanza los \$86,210,925 USD anuales. Esto evidencia el alto costo ambiental y financiero asociado al uso de combustibles fósiles en la CN. En términos de fuentes de emisiones, en la CP, el uso de pellets es el mayor contribuyente (36,265 toneladas de CO₂ al año), seguido de la producción de pellets (684.3 toneladas de CO₂ al año) y las emisiones derivadas de la ocupación y cambio de uso de suelo (561.3 toneladas de CO₂ al año). El transporte en la CP representa sólo el 1.07% del total de emisiones. En la CN, las emisiones más significativas provienen del uso de combustibles convencionales (~2,691,724 toneladas de CO₂ al año) y el transporte de estos combustibles (12,549 toneladas de CO₂ al año). Las emisiones derivadas de la quema de residuos (2.24 toneladas de CO₂ al año) son prácticamente insignificantes dentro del total.

Cabe destacar que, en este modelo, la Refinería de Tula fue seleccionada como fuente de combustible, con un flujo de 429,302 toneladas anuales para satisfacer la demanda.

En este escenario, la inversión en salud y educación es de ~\$9,870 USD/año, mientras que la inversión per cápita asciende a ~\$11,844 USD/año. Esto genera un beneficio social total de \$31,583 USD/año, equivalente al 0.0001% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena en términos porcentuales es del 0.001% para los sectores de salud y educación, así como para el ingreso per cápita.

XV.VI.I.VIII *Escenario 3.2: Maximización del beneficio social (almacén con tecnología)*

En este escenario, que considera un almacén con control de temperatura y humedad, los resultados muestran que las ganancias serían negativas, alcanzando un monto de -\$3,607,496 USD/año, mientras que las emisiones generadas por la cadena propuesta serían de 52.9 toneladas de CO₂/año. Este escenario también permitiría la contratación de 362 trabajadores, generando un beneficio social estimado en \$26,728 USD/año.

En cuanto a la producción y operación, se procesarían 7,700 toneladas de residuos al año, generando 6,314 toneladas de pellets en el mismo periodo. El modelo propone la instalación de un solo almacén en el municipio de Tequisquiapan con una capacidad de 7,700 toneladas al año operando a la misma capacidad. Por su parte, la planta de producción de pellets se instalará en el municipio de Amealco de Bonfil, con capacidad operativa de 7,700 toneladas/año. Ambas instalaciones operan al máximo de su capacidad. Las ganancias por venta del pellet y al manejo de residuos son de ~\$434,214 USD/año y \$336,490 USD/año, respectivamente.

Respecto a los costos asociados, la instalación y operación del almacén implicarían un gasto anual de \$1,143,624 USD, teniendo un costo fijo de \$15.5 USD/ton y un costo variable de \$133 USD/ton. Por otro lado, la instalación y operación de la planta tendrían un costo de ~\$1,898,270 USD, con un costo fijo y variable de \$19.9 USD/ton y \$226.7 USD/ton, respectivamente.

Los residuos no empleados serían quemadas en el lugar, lo que generaría una multa de ~\$4,225 USD/ton. Además, el traslado de residuos al almacén supondría un costo de \$381,133 USD/año. Por otra parte, el transporte de los residuos del almacén a la planta generaría un costo de \$539,583 USD/año. Finalmente, el envío de los pellets producidos a la central eléctrica tendría un costo de \$297,781 USD/año, mientras que el pago a los

agricultores por los residuos utilizados disminuiría a \$117,810 USD/año. En total, los costos de la cadena propuesta ascienden a \$4,378,200 USD/año.

La implementación de tecnología en los almacenes genera una reducción significativa de las emisiones netas de la CP, que disminuyen a 224.2 toneladas de CO₂ al año. Esta diferencia se debe a cambios en la cantidad de almacenes instalados y en el flujo de materiales transportados, a pesar de que el flujo de residuos orgánicos permanece constante. Las emisiones totales de la CP en este escenario son de 32,049 toneladas de CO₂ al año. Sin embargo, el balance con las emisiones fijadas por los cultivos modifica el resultado final en comparación con el escenario 3.1.

Por otro lado, las emisiones generadas por la CN también presentan variaciones respecto al escenario 3.1. Los costos por impuestos al carbono para la CP son de ~\$7,182 USD/año, mientras que para la CN ascienden a \$86,256,109 USD/año. En términos de impuestos al carbono, la reducción de emisiones en la CP puede traducirse en un menor costo asociado a este concepto, lo que refuerza el beneficio de implementar tecnología en el almacenamiento. Las emisiones más representativas de la CP se deben al uso de pellets (30,686 ton CO₂/año), seguidas a la producción de pellets (578.9 ton CO₂/año), así como la ocupación y cambio de tierra (474.9 ton CO₂/año) siendo las más significativas. En la CN, las emisiones por el uso de combustibles convencionales (2,693,134 ton CO₂/año) y el transporte (~12,556 ton CO₂/año) dominan el total. De igual manera que el escenario anterior, se selecciona la Refinería de Tula.

Nuevamente la implementación de tecnología en el almacenamiento genera una reducción en la inversión social. La inversión en salud y educación disminuye a ~\$8,353 USD/año, mientras que la inversión per cápita se reduce a \$10,023 USD/año. Esto genera un beneficio social total de \$26,728 USD/año, equivalente al 0.0001% del PIB de Querétaro. La contribución de la cadena es del 0.001% para todos los sectores.

XV.VI.I.IX Análisis social: Resumen comparativo: Comparativa entre escenarios 3.1 y 3.2

La **Tabla 24** presenta una comparación de los datos obtenidos en los escenarios de maximización del beneficio social, evaluando el desempeño de ambas tecnologías (con y sin control de temperatura y humedad). La principal diferencia entre ambas opciones radica en la cantidad de residuos empleados. El almacén con control de temperatura y humedad emplea menos residuos que el almacén sin uso de la tecnología, 7,700 ton/año y 9,100 ton/año, respectivamente.

Tabla 24. Impacto social-Metodología II: Comparativa de costos entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.

Maximización del beneficio social			
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación*
Ventas (GV)	\$ 513,161.7	\$ 434,213.8	-15.4%
Gan. Manejo (GM)	\$ 397,670.0	\$ 336,490.0	-15.4%
Ingresos Totales	\$ 10,831.7	\$ 770,703.8	-15.4%
Costos Fijos Almacén (CF_A)	\$ 11.6	\$ 15.5	≠
Costos Variables Almacén (CV_A)	\$ 57.4	\$ 133.0	≠
Costos Almacén (CC_A)	\$ 627,711.6	\$ 1,143,624.0	82.2%
Costos Fijos Plantas (CF_P)	\$ 19.7	\$ 19.9	≠
Costos Variables Plantas (CV_P)	\$ 222.7	\$ 226.7	≠
Costos Plantas (CC_P)	\$ 2,205,698.9	\$ 1,898,269.5	-13.9%
Cotos Totales Instalación Plantas (CTCC)	\$ 2,833,410.6	\$ 3,041,893.5	7.4%
Cost. Quema (CQR)	\$ 4,224.5	\$ 4,224.5	0%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	\$ -	0%
Cost. Transp. Relleno (CTRR)	\$ -	\$ -	0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 1,615,775.1	\$ 179,173.5	-88.9%
Cost. Transp. Refinería (CTB)	\$ 1,447,451.6	\$ 1,259,025.9	-13.0%
Cost. Transp. Central (CTE)	\$ 510,454.5	\$ 1,292,257.4	153.2%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 3,573,681.2	\$ 2,730,456.9	-23.6%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 8,685,565,941.3	\$ 8,690,118,103.5	0.1%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 139,230.0	\$ 117,810.0	-15.4%
Costos Totales CP	\$ 6,546,321.8	\$ 5,890,160.4	-10.0%
FLUJO DE DINERO TOTAL DE LA CP	\$ 5,635,490.1	\$ 5,119,456.6	-9.2%

NOTA: * La variación fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

En cuanto a los costos, el almacén con tecnología representa un incremento del 82.2% en los costos respecto al escenario sin tecnología, a pesar de que la cantidad de residuos es menor; por lo tanto, la capacidad de ambas plantas es diferente. A su vez, los costos de las plantas de producción de pellets aumentarían un 7.4%. Específicamente, los costos por transporte de residuos al almacén disminuyen en un 88.9%, y los costos de transporte hacia las plantas de producción disminuyen en un 13.0%. Por otro lado, los costos de transporte hacia la central eléctrica aumentan más de 1.5 veces con respecto a los costos del almacén sin tecnología, lo que se debe principalmente a la ubicación de la planta y la distancia con la central eléctrica. Ambos escenarios instalan un solo almacén y planta de producción de pellets. Por su parte, la **Figura 9** ofrece una representación visual de la ubicación de los almacenes y plantas, así como el flujo de materiales dentro del sistema. Incluye el destino de los residuos no procesados, que en este caso son quemados en el mismo lugar donde se generan. Cabe mencionar que, en algunos municipios que utilizan residuos, una parte de estos también se quema.

En este caso, se observa una reducción del 15.4% en los principales indicadores sociales al implementar tecnología en los almacenes. La inversión en salud, educación e inversión per cápita disminuyen un 15.4%. El beneficio social total, así como el número de trabajadores se reduce en la misma proporción. Estos cambios se deben a las distintas capacidades operativas de los almacenes y plantas en cada escenario. En el caso del almacén con tecnología, se trabaja con una menor cantidad de residuos, lo que impacta en la generación de empleo y la inversión social. Estos resultados se resumen en la **Tabla 25**.

Tabla 25. *Impacto social-Metodología II: Comparativa social entre escenarios con y sin tecnología en el almacenamiento.*

Maximización del beneficio social			
Variable	Almacén S/Control	Almacén C/Control	Variación *

Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 9,869.7	\$ 8,352.6	-15.4%
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 9,869.7	\$ 8,352.6	-15.4%
Dinero de inversión per cápita (MIWA_PIB)	\$ 11,843.7	\$ 10,023.2	-15.4%
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 31,583.1	\$ 26,728.4	-15.4%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 307,897.0	\$ 260,528.3	-15.4%
Tasa de retención (TRW)	\$ 65,766.8	55,648.8	-15.4%
Cantidad de trabajadores (TW)	428.0	362.0	-15.4%
Salario a cada trabajador	\$ 719.4	\$ 719.7	0%

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el almacén sin tecnología.

ESCENARIO: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL

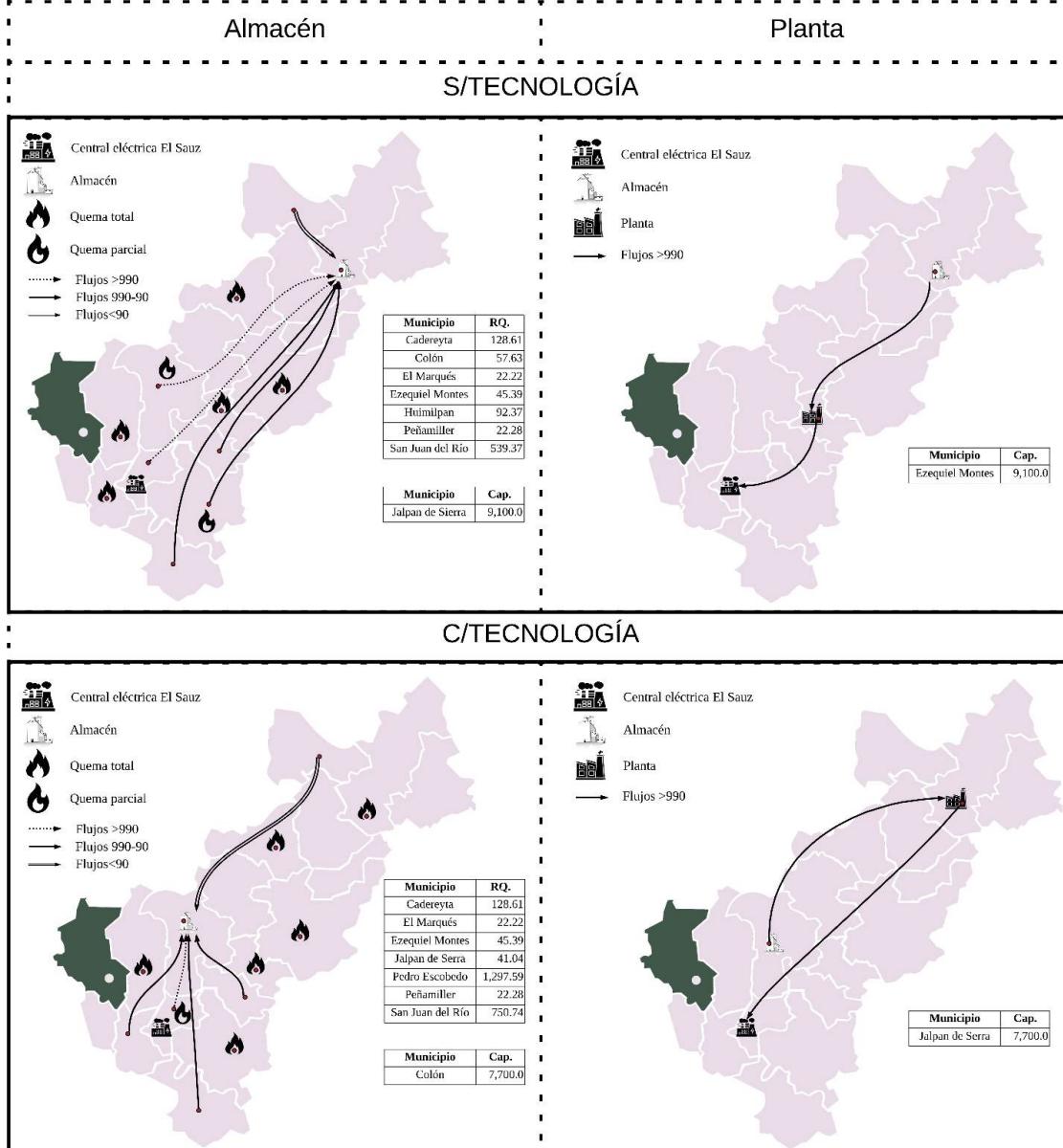


Figura 9. Comparativa de la red logística del Escenario 3: Distribución de instalaciones y residuos.
Metodología II.

XV.VII RESULTADOS MODELO MATEMÁTICO DINÁMICO

Se evaluaron 47 diferentes variedades de cultivos para los 18 municipios del estado de Querétaro. Por otra parte, también se contemplan dos tipos de almacenamiento de residuos agrícolas, integrados como parte de un set “a” en el modelo dinámico, así como del estático, para que de esta manera en el mismo modelo elija qué es más viable dependiendo de la función objetivo. Los tipos de almacenes a elegir son:

- ❖ Sin tecnología de control de temperatura y humedad.
- ❖ Con tecnología de climatización.

Para cada tipo de almacenamiento se analizaron tres objetivos de optimización:

- ❖ Maximización del beneficio económico
- ❖ Maximización del beneficio social
- ❖ Minimización de emisiones de CO₂.

El total de residuos generados por los 47 cultivos de residuos en el estado de Querétaro se estimó en 422,128.3 toneladas por año, con una capacidad de fijación de 812,236,634 toneladas de CO₂. Por otro lado, la demanda energética a satisfacer se calculó en 7,288,505,971 kWh/año para el modelo dinámico, mientras que, para el modelo estático en 31,746,834,270 kWh/año, cada uno calculado de acuerdo con su respectivo modelo.

A continuación, se presentan los resultados del primer objetivo tanto para el modelo dinámico como el estático, así como su respectiva comparativa.

XV.VII.I ESCENARIO 1.1: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO – DINÁMICO

Este escenario, que prioriza la maximización del beneficio económico, presenta pérdidas anuales de -\$116,539.7 millones USD. La producción de

pellets alcanza 38,528 toneladas anuales, siendo transformados de 417,354 toneladas de residuos consideradas, representando el 98.9%, con un costo logístico total de \$18.6 millones USD, donde el transporte de residuos a almacenes consume el 70.5% de los costos logísticos, seguidos por los costos por transporte a la planta de pellets (18.0%) y seguidos por el transporte a la central eléctrica (11.5%). La infraestructura incluye 16 almacenes estratégicamente ubicados, destacando instalaciones en El Marqués (110,000 ton capacidad) operando al 75.9% de su capacidad seguida de la de Colón (28,250 ton capacidad) y Pedro Escobedo (110,000 ton capacidad); ambas operan al 75.2% de su capacidad, mientras que las demás plantas no sobrepasan el 70% de capacidad. La mayoría de los almacenes se instalan sin tecnología exceptuando por los almacenes instalados en Jalpan de Serra (1,000 ton capacidad), Landa de Matamoros (1,000 ton capacidad) y San Juan del Río (55,500 ton capacidad). Por otro lado, de las plantas se instala la infraestructura de 18 plantas de pellets destacándose en operación aquella en San Juan del Río (110,000 ton capacidad) operando al 81.4% de su capacidad; ésta es seguida de la de Pedro Escobedo (110,000 ton capacidad) operando al 80.5% de su capacidad. Nuevamente las demás plantas no sobrepasan el 80% de la capacidad instalada. Los detalles de esta cadena se ilustran en la **Figura 10.**

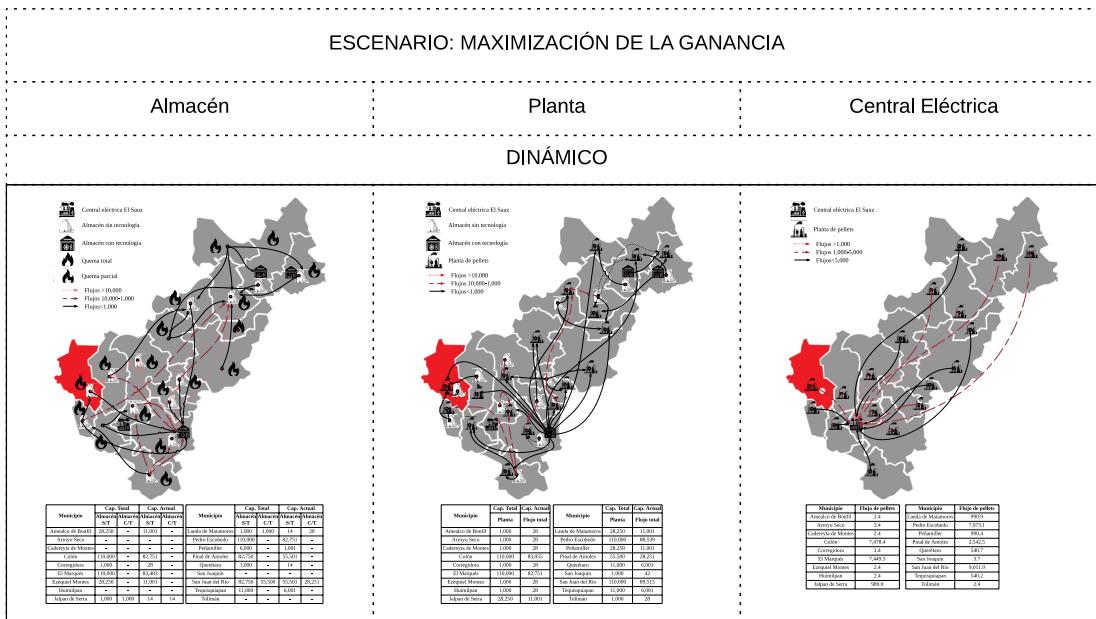


Figura 10. Maximización del beneficio económico. Distribución logística de la cadena dinámica.

La CP llega a tener un saldo total de costos con valor de \$137.4 millones USD. Dentro de los costos más representativos en la cadena son los debidos a la instalación tanto de las plantas como de los almacenes con una inversión de \$112.5 millones USD llegando a representar hasta el 81.8% de los costos totales —almacén (24.7%) y planta (75.3%)—. Así mismo se encuentran los ya mencionados por el transporte, representando el 13.5% de los costos totales terminando con los costos por pago a los agricultores debido a la compra de la materia prima representando el 4.6%. De manera conjunta, la CN presenta un costo total de \$10,933.5 millones USD, donde los principales se deben al transporte del combustible con un valor de \$10,906.9 millones USD representando el 99.8% de los costos; el resto son debido al tratamiento de los residuos sin emplear, los cuales se han manejado por la quema de estos. Las ganancias anuales totales en la cadena ascienden a \$20.9 millones USD obtenidas por la venta (12.7%) y manejo de los residuos (87.3%). Los valores específicos por costos en la cadena se ejemplifican en la **Tabla 26**.

Tabla 26. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 1.1.

MODELO DINAMICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA

VARIABLE	VALOR	%*
Ganancia de la CP	- \$ 116,539,708.99	
Cant. Residuos (FRAT)	422,128.3	100.0%
Cant. Residuos Usados (FTRU)	417,354.0	98.9%
Cant. Residuos S/Usar (FTST)	4,774.3	1.1%
Cant. Pellets (PCE_D)	38,528.0	1.4%
Ganancias Totales de la CP	20,887,940.4	100.0%
Ventas (GV)	2,649,570.6	12.7%
Gan. Manejo (GM)	18,238,369.8	87.3%
Costos Almacén (CC_A)	\$ 27,814,686.4	24.7%
Costos Plantas (CC_P)	\$ 84,660,653.51	75.3%
Cotos Totales Plantas (CTTAP)	\$ 112,475,339.92	81.8%
Cost. Quema (CQR)	\$ 20,169,014.71	0.2%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Relleno (CTR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 13,081,235.90	70.5%
Cost. Transp. Refinería (CTMP)	\$ 3,347,401.38	18.0%
Cost. Transp. Central (CTP)	\$ 2,138,155.96	11.5%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 18,566,793.23	13.5%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 10,906,901,561.65	99.8%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 6,385,516.20	4.6%
Costos Totales CP	\$ 137,427,649.35	100.0%
Costos Totales CN	\$ 10,933,456,092.57	100.0%

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de cada categoría, como residuos totales, transporte total, costos totales, etc.

La evaluación de emisiones de la CP —que comprende las mismas secciones que las descritas en la metodología I y II— logra emisiones de 231,383 ton CO₂. No obstante, al considerar la captura de carbono por parte de los cultivos utilizados como materia prima (812,236,634 ton CO₂/año), las emisiones netas de la CP se vuelven negativas, debido a que las emisiones fijadas por los cultivos son mayores a las generadas por la CP. Por otro lado, en la CN las emisiones totales ascienden a 3,395,903 ton CO₂ por año. De acuerdo con la regulación vigente en Querétaro sobre bonos de carbono e impuestos subnacionales, el costo por tonelada de CO₂ es de \$32.03 USD (640.6 MXN) (MÉXICO₂, 2024). Aplicando este costo, los impuestos al carbono

de la CP ascienden a \$108.8 millones USD por año, mientras que para la CN al tener emisiones a favor no pagaría por este impuesto.

La distribución de emisiones dentro de la cadena con mayor peso son las generadas por el uso de pellets siendo aportadora del 80.9% de las emisiones totales, seguidas de las emisiones por ocupación y cambio de tierra con el 16.6%, terminando con las emisiones por la producción de pellets con el 1.5%. Las emisiones por transporte en la CP representan sólo el 0.9% del total de las emisiones. En la CN, las fuentes más relevantes son las generadas por el uso de combustibles convencionales (3,380,133 ton CO₂/año), seguidas de las emisiones por transporte (15,759 ton CO₂/año). Cabe destacar que, en este escenario, el modelo seleccionó la Refinería de Tula en Hidalgo como la principal fuente de suministro de combustible, con un flujo de 539,096 ton por año para satisfacer la demanda calculada en el modelo.

En este escenario, la inversión anual en los sectores de salud, educación e inversión per cápita alcanzan los \$802,666 USD, \$3.6 millones USD y \$926,560 USD, respectivamente, representando el 0.1%, 1.3% y 0.3% del beneficio en el sector salud, educación e inversión per cápita actual en Querétaro. En total, el beneficio social anual generado asciende a \$5.32 millones USD, lo que representa aproximadamente el 0.2% del PIB de Querétaro. En este escenario se generan 3,129 empleos directos con salarios de 720 USD/mes (112% del mínimo regional). La **Tabla 27** muestra cada valor.

Tabla 27. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 1.1.

MODELO DINAMICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA		
VARIABLE	VALOR	%*
Beneficio Social Total de la CP (BGEA)	0.00232	0.2%
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 802,666.3	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 3,588,949.1	
Dinero invertido en PIB (MIWA_PIB)	\$ 926,599.6	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 5,318,214.9	
BS_E	0.001	0.1%
BS_H	0.013	1.3%

BS. PIB	0.003	0.3%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 27,025,619.7	
Tasa de retención (TRW)	\$ 3,513,330.6	
Cantidad de trabajadores (TW)	3,129.0	
Salario a cada trabajador	\$ 8,637.1	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total del beneficio social.

XV.VII.II ESCENARIO 1.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO – ESTÁTICO

Este escenario de optimización económica bajo condiciones estáticas registra pérdidas anuales de -\$93.9 millones USD. La producción alcanza 342,104 toneladas anuales de pellets, procesando 417,200 toneladas de residuos agrícolas que representan el 98.8% del total disponible. Los costos logísticos totales suman \$20.98 millones USD, con una distribución donde el transporte a almacenes absorbe el 26.7% de este monto, mientras que el traslado a plantas de pellets y centrales eléctricas representa 16.8% y 56.5% respectivamente.

La red logística comprende 22 almacenes estratégicamente distribuidos (véase **Figura 11**), destacando las instalaciones en Querétaro con capacidad de 82,750 toneladas operando al 100% de su capacidad y sin emplear la tecnología seguido de Amealco de Bonfil con 82,737 toneladas al 99.98%, y Pedro Escobedo con 95,258 toneladas al 86.6%. La mayoría de estas instalaciones presentan niveles de utilización inferiores al 80%, siendo poco más de la mitad de tipo convencional (sin tecnología) y los diez restantes con tecnología. El sistema productivo incluye 18 plantas de pellets, donde sobresalen la instalación en Pedro Escobedo (110,000 toneladas) operando al 100.0% de su capacidad, San Juan del Río y Tequisquiapan (55,500 toneladas) funcionando a plena capacidad también (100.0%) además de la instalación en Querétaro (110,000 toneladas) operando al 91.9%. Las demás plantas mantienen niveles de utilización por debajo del 80%.

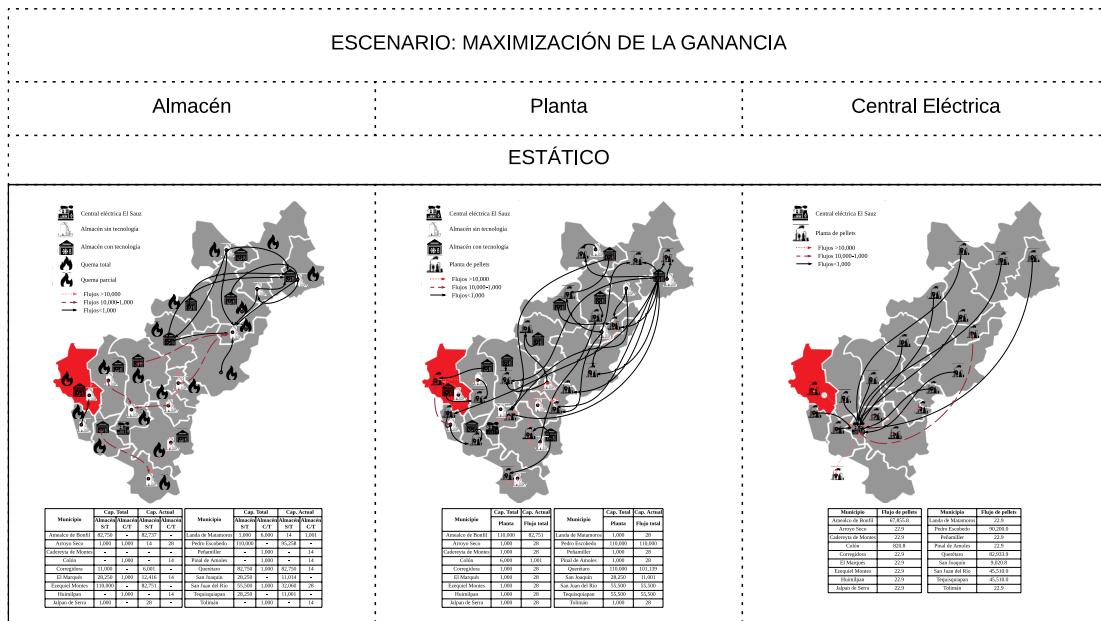


Figura 11. Maximización del beneficio económico. Distribución logística de la cadena estática.

En el análisis financiero, la CP reporta costos totales por \$135.66 millones USD, donde la inversión en infraestructura representa el 79.8% del total, distribuido entre almacenes (23.7%) y plantas (76.3%). Los costos de transporte alcanzan el 15.5%, mientras que los pagos a agricultores por materia prima equivalen al 4.7%. Por su parte, la CN incurre en \$46,844.6 millones USD de costos, dominados en un 99.9% por el transporte de combustible convencional. Las ganancias anuales ascienden a \$41.76 millones USD, generadas principalmente por el manejo de residuos (43.7%) complementado con ventas de pellets (56.3%). El desglose de costos se presenta en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 1.2.

MODELO ESTÁTICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA			
VARIABLE	VALOR	%*	
Ganancia de la CP	- \$ 93,901,224.94		
Ganancias Totales de la CP	41,758,132.08	100.0%	
Ventas (GV)	23,526,492.08	56.3%	
Gan. Manejo (GM)	18,231,640.00	43.7%	
Costos Almacén (CC_A)	\$ 25,663,043.74	23.7%	
Costos Plantas (CC_P)	\$ 82,637,019.84	76.3%	
Cotos Totales Plantas (CTTAP)	\$ 108,300,063.58	79.8%	

Cost. Quema (CQR)	\$ 20,819,587.71	0.0%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Relleno (CTR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 5,595,942.51	26.7%
Cost. Transp. Refinería (CTMP)	\$ 3,529,467.73	16.8%
Cost. Transp. Central (CTP)	\$ 11,850,723.20	56.5%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 20,976,133.44	15.5%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 46,817,385,261.00	99.9%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 6,383,160.00	4.7%
Costos Totales CP	\$ 135,659,357.02	100.0%
Costos Totales CN	\$ 46,844,588,008.71	100.0%
Demanda (DFC)(DE)	\$ 31,746,834,270.00	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de cada categoría, como residuos totales, transporte total, costos totales, etc.

El impacto ambiental muestra que la CP emite 1,696,372 ton CO₂ en operaciones, cifra que aumenta a 1,729,193 ton CO₂ al considerar cambios de uso de suelo. Sin embargo, la captura de carbono por cultivos (812,236,634 ton CO₂/año) genera un balance neto negativo. La CN produce 14,576,723 ton CO₂ anuales. La distribución de emisiones en la CP revela que el uso de pellets contribuye con 96.2%, seguido por cambio de uso de suelo (1.9%), producción de pellets (1.8%) y transporte (0.1%). En la CN, el 99.5% de emisiones proviene del transporte de combustibles fósiles. Bajo la regulación de bonos de carbono de Querétaro (\$32.03 USD/tonelada), la CN enfrenta impuestos anuales por \$466.87 millones USD, mientras que la CP, al tener emisiones netas negativas, no realiza pagos por este concepto.

En el ámbito social, el modelo genera inversiones anuales de \$4.2 millones USD en educación (equivalente al 0.6% del presupuesto estatal), \$3.8 millones USD en salud (1.4% del presupuesto estatal) y \$4.3 millones USD en desarrollo per cápita (0.3% del presupuesto estatal) dando como resultado un beneficio global de \$12.3 millones USD representando el 0.5% del beneficio total en el estado (véase **Tabla 29**). La operación crea 32,691 empleos directos con salarios promedios de 720 USD/mes.

Tabla 29. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 1.2.

MODELO DINAMICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA		
VARIABLE	VALOR	%*
Beneficio Social Total de la CP (BGEA)	0.005374	0.5%
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 4,211,737.33	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 3,807,895.06	
Dinero invertido en PIB (MIWA_PIB)	\$ 4,314,051.03	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 12,333,683.42	
BS_E	0.006016188	0.6%
BS_H	0.014186168	1.4%
BS_PIB	0.01286272	1.3%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 282,317,904.96	
Tasa de retención (TRW)	\$ 36,701,327.64	
Cantidad de trabajadores (TW)	\$ 32,691.00	
Salario a cada trabajador		8,635.95

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total del beneficio social.

XV.VII.III COMPARATIVA ENTRE EL ESCENARIO 1.1 Y 1.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO

Al comparar ambos modelos en su capacidad para maximizar el beneficio económico, se observan diferencias significativas en todos los indicadores clave. Esto se debe principalmente a la cantidad de residuos, si bien, ambos parten de la misma cantidad de materia prima, conforme se procede en la cadena, los rendimientos finales son diferentes debido a que en el modelo estático no se considera los cambios que sufren los residuos conforme al paso del tiempo. Otro aspecto por considerar son la cantidad de almacenes que se instalan tanto en un modelo como en otro, así como la tecnología que selecciona o no; lo anterior afecta nuevamente esta decisión en la producción final de pellets. Los rendimientos entre un tipo de almacén y otro son diferentes además de los costos por instalación dependiendo de la capacidad y tipo de almacén son factores que considerar. Ahora, si bien contarán con la misma cantidad y tipo de almacenes, la distribución de los mismo es otro aspecto que influye al final del balance en los costos de la cadena. Todos estos aspectos influyen en los ámbitos tanto económicos, ambientales y sociales, generando la variabilidad reportada entre cada uno de

ellos. En la **Figura 12** se presentan las redes logísticas para ambos escenarios.

Particularmente, el modelo dinámico registra pérdidas anuales de -\$116.5 millones USD, mientras que el estático presenta un resultado considerablemente mejor, con -\$93.9 millones USD, lo que representa un incremento del 24.1% en las pérdidas. Esta marcada diferencia se explica, en parte, por el menor rendimiento en la producción de pellets, pese a que por caso contrario se presenta una mayor eficiencia en el uso de recursos del enfoque dinámico, que produce 38,528 toneladas de pellets utilizando el 98.9% de los residuos disponibles (417,354 toneladas), frente a las 342,104 toneladas del modelo estático, que emplea un 98.8% de los residuos (417,200 toneladas). Aunque la producción de pellets es un 88.7% mayor en el estático, su estructura de costos es notablemente menos eficiente.

En términos de costos logísticos, el modelo dinámico mantiene un gasto total de \$18.6 millones USD, distribuido en transporte a almacenes (70.5%), plantas de pellets (18.0%) y centrales eléctricas (11.5%). Por su parte, el estático incurre en \$20.98 millones USD, con una distribución porcentual diferente - plantas de pellets (56.5%), almacenes (26.75%), y centrales eléctricas (16.8%)- con un costo absoluto un 11.5% superior. Esta diferencia se acentúa al analizar los costos totales de la CP. El modelo dinámico registra \$112.5 millones USD, mientras que el estático alcanza \$137.4 millones USD en la inversión hacia la infraestructura, en ambos casos los costos predominados se deben a las plantas. Dentro de los costos totales en la CP, la instalación de infraestructura representa alrededor del 80% en ambos casos, pero el estático requiere un 8.4% menos pese a contar con más almacenes (22 frente a 16), esto muestra una menor utilización de capacidad en plantas y almacenes, así como de ocupación (véase **Tabla 30** y **Tabla 31**).

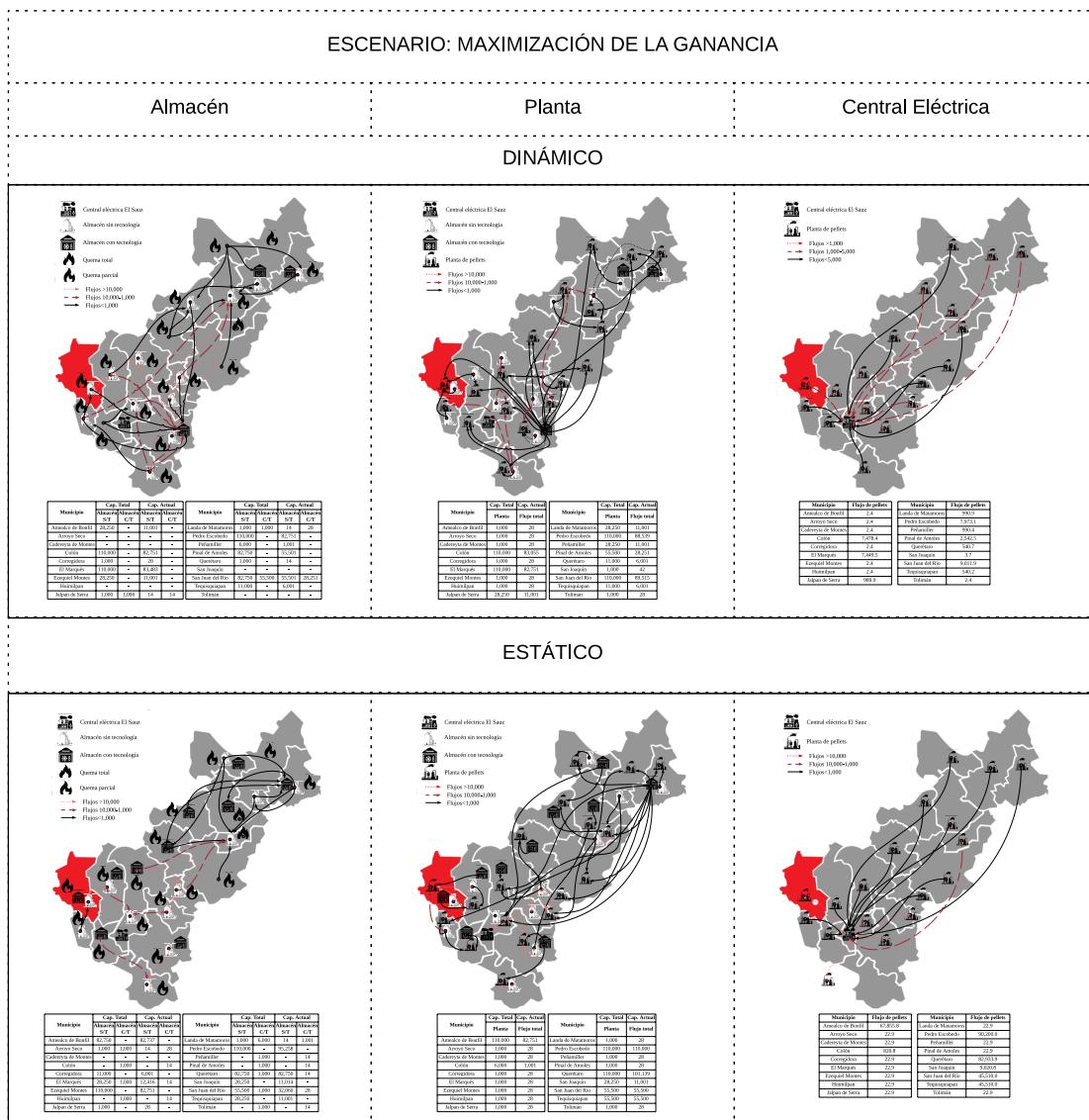


Figura 12. Comparativa de modelos en el aspecto económico: Infraestructura y red logística.

Tabla 30. Tabla de especificaciones por almacén y tipo de modelo: Escenario 1.

4. Colón	Dinámico		X		7		82,751		75.2%
	Estático	X		1		14		1.4%	
5. Corregidora	Dinámico		X		1		28		2.8%
	Estático		X		3		6,001		54.6%
6. El Marqués	Dinámico		X		7		83,483		75.9%
	Estático	X	X	1	4	14	12,416	1.4%	44.0%
7. Ezequiel Montes	Dinámico		X		4		11,001		38.9%
	Estático		X		7		82,751		75.2%
8. Huimilpan	Dinámico								
	Estático	X		1		14		1.4%	
9. Jalpan de Serra	Dinámico	X	X	1	1	14	14	1.4%	1.4%
	Estático		X		1		28		2.8%
10. Landa de Matamoros	Dinámico	X	X	1	1	28	14	2.8%	1.4%
	Estático	X	X	2	1	1,001	14	16.7%	1.4%
11. Pedro Escobedo	Dinámico		X		7		82,751		75.2%
	Estático		X		7		95,258		86.6%
12. Peñamiller	Dinámico		X		2		1,001		16.7%
	Estático	X		1		14		1.4%	
13. Pinal de Amoles	Dinámico		X		6		55,501		67.5%
	Estático	X		1		14		1.4%	
14. Querétaro	Dinámico		X		1		14		1.4%
	Estático	X	X	1	6	14	82,750	1.4%	100.0%
15. San Joaquín	Dinámico								
	Estático		X		4		11,014		39.0%
16. San Juan del Río	Dinámico	X	X	5	6	28,251	55,501	50.9%	67.5%
	Estático	X	X	1	5	28	32,060	2.8%	63.5%
17. Tequisquiapan	Dinámico		X		3		6,001		54.6%
	Estático		X		4		11,001		38.9%
18. Tolimán	Dinámico								
	Estático	X		1		14		1.4%	

*NOTA: La capacidad "1" corresponde al valor de 1,000 ton/a, la "2" a 6,000 ton/a, la "3" a 11,000 ton/a, la "4" a 28,250 ton/a, la "5" a 55,500 ton/a, la "6" a 82,750 ton/a y la "7" a 110,000 ton/a.

Tabla 31. Registro total de almacenes y plantas instalados por modelo empleado.

CAP ALMACÉN	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,750	110,000	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	
DINÁMICO	6	1	1	2	1	2	3	16
ESTÁTICO	12	1	1	3	1	2	2	22
SIN TECNOLOGÍA							CON TECNOLOGÍA	
DINÁMICO		13				3		16
ESTÁTICO		12				10		22

CAP PLANTA	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,750	110,000	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	
DINÁMICO	8	0	2	3	1	0	4	18
ESTÁTICO	11	1	0	1	2	0	3	18

Las ganancias anuales también reflejan esta disparidad. Al considerar las ganancias totales (\$20.9 millones dinámico vs. \$41.8 millones estático), el modelo estático muestra una relación pérdidas/ganancias de 2.25 (\$93.9 USD/\$41.8 USD), mientras que el dinámico registra 5.58 (\$116.5/\$20.9). Esto indica que el estático genera \$1 USD de ganancia por cada \$2.25 de pérdida, frente a \$1 por cada \$5.58 en el dinámico, representando una ventaja del 148.1% en eficiencia relativa. Sin embargo, frente a los costos totales la CP por el modelo dinámico es 0.18% mayor que la estática. En caso contrario, en costos la CN es 76.7% menor a la estática, esto se debe a la cantidad de demanda calculada a cubrir por ambos modelos; mientras uno hace una estimación de 31,746.8 millones kWh (estático) el otro hace una de 7,288.5 millones kWh representando una disminución en la estimación del 77%, reflejando la importancia del cálculo de la demanda al considerar cambios en los flujos de la demanda.

En el aspecto impositivo, el modelo dinámico la CN enfrenta impuestos al carbono por \$108.8 millones USD anuales, mientras que el estático debe pagar \$466.8 millones USD, un 76.7% más. Esta diferencia se debe a que, aunque ambos modelos logran emisiones netas negativas (-812 y -810.5 millones de toneladas CO₂, respectivamente), el estático genera un 86.6% más de emisiones disminuyendo el balance por captura de carbono, lo que podría reducir su contribución fiscal. Particularmente en ambos escenarios las emisiones en la CP más representativas con las emitidas por el uso de los pellets 80.9% (dinámico) y 96.2% (estático). Seguidas por las del cambio de tierra, donde éstas presentan un incremento del 17.3% en el modelo dinámico; en cambio, en tanto las emisiones por transporte son 11.5% menos.

Finalmente, en el ámbito social, el modelo estático genera un beneficio total de \$12.3 millones USD, un 56.9% superior a los \$5.32 millones USD del dinámico. En este escenario se generan 2,649.2 empleos por millón USD (estático) frente a los 588.2 empleos por millón USD del dinámico. Particularmente, en los aspectos de cada sector (educación, salud, desarrollo social) el modelo dinámico es 19.1%, 94.3% y 21.5% menor que el estático; siendo este último mayor en un 56.9% al beneficio global social con una representación del 0.5% frente al 0.2% del dinámico.

XV.VII.IV ESCENARIO 2.1: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES – DINÁMICO

Este escenario prioriza la reducción de la huella ambiental mediante un enfoque dinámico, logrando emisiones significativamente menores. El sistema presenta pérdidas anuales de -\$66.15 millones USD, con una producción de 16,422 toneladas de pellets anuales procesando 194,824 toneladas de residuos (46.2% del total disponible). Los costos logísticos totales alcanzan \$11.5 millones USD, con una distribución donde el transporte a almacenes representa el 34%, a plantas de pellets el 60.5% y a centrales eléctricas el 5.5%.

La infraestructura consta de 9 almacenes, destacando Ezequiel Montes (110,000 toneladas) operando al 75.2% de capacidad sin empleo de tecnología y Huimilpan (82,750 toneladas) al 67.1% con empleo de tecnología en su instalación. Las plantas de pellets suman 18 unidades, con la mayoría de las instalaciones operando al 100%, como lo son las de Corregidora, Querétaro y San Juan del Río con capacidad de 28,250 toneladas, seguida la de Colón con capacidad de 6,000 toneladas continuando con los municipios de Cadereyta, El Marqués, Ezequiel Montes, Pedro Escobedo, Tequisquiapan y Tolimán con capacidad de 1,000 toneladas. La **Figura 13** representa la distribución de todos los flujos, así como de infraestructura en la cadena.

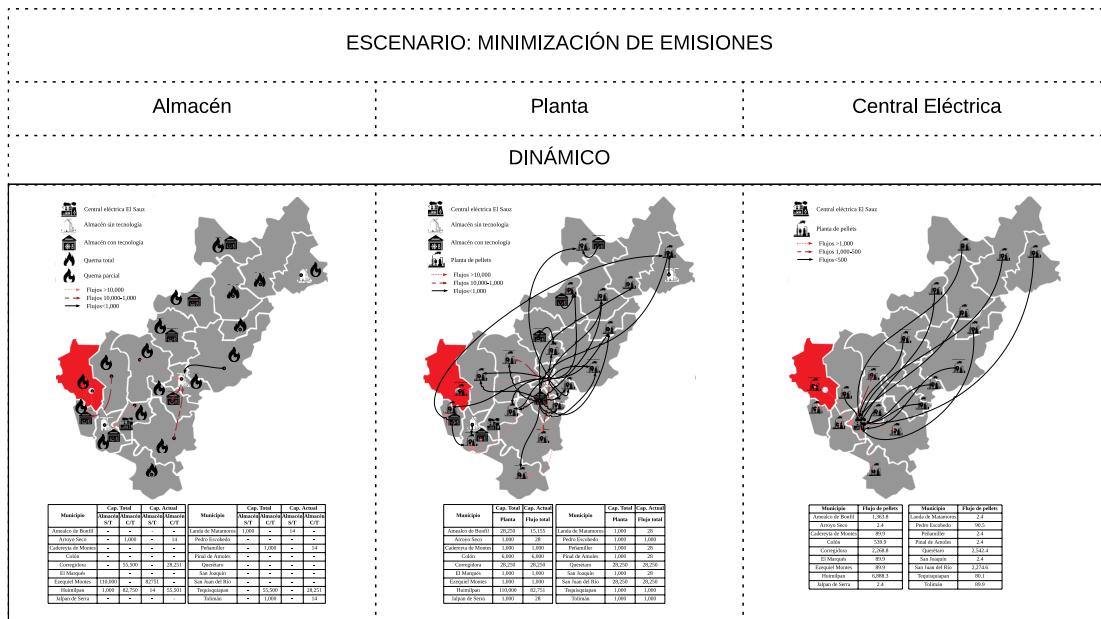


Figura 13. Minimización de emisiones. Distribución logística de la cadena dinámica.

La CP registra costos totales de \$75.8 millones USD, donde la inversión en infraestructura representa el 80.9% (almacenes 31.9%, plantas 68.1%). Los costos de transporte alcanzan el 15.1%, mientras los pagos a agricultores son el 3.9%. La CN incurre en \$11,957.7 millones USD, con el 91.9% destinado a transporte de combustible y el restante a los costos por quema. Las ganancias anuales son \$9.6 millones USD (88.3% por manejo de residuos, 11.7% por ventas). Todo el desglose de costos es esquematizado en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 2.1.

MODELO DINÁMICO: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES		
VARIABLE	VALOR	%*
Ganancia de la CP	-\$ 90,811,870.52	
Ganancias Totales de la CP	\$ 9,033,107.86	100.0%
Ventas (GV)	\$ 1,075,425.26	11.9%
Gan. Manejo (GM)	\$ 7,957,682.60	88.1%
Costos Almacén (CC_A)	\$ 20,341,549.62	35.8%
Costos Plantas (CC_P)	\$ 36,504,058.05	64.2%
Cotos Totales Plantas (CTTAP)	\$ 56,845,607.66	56.9%
Cost. Quema (CQR)	\$ 1,014,007,986.71	8.4%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Relleno (CTR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 17,320,334.67	43.1%
Cost. Transp. Refinería (CTMP)	\$ 20,790,216.14	51.7%
Cost. Transp. Central (CTP)	\$ 2,102,720.51	5.2%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 40,213,271.32	40.3%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 10,997,554,687.62	91.5%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 2,786,099.40	2.8%
Costos Totales CP	\$ 99,844,978.38	100.0%
Costos Totales CN	\$ 12,014,348,773.73	100.0%
Demanda (DFC)(DE)	\$ 7,288,505,791.30	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de cada categoría, como residuos totales, transporte total, costos totales, etc.

Las emisiones de la CP son 82,616 ton CO₂ (operaciones) y 100,266 ton CO₂ (con cambio de suelo), compensadas por la captura de carbono, resultando en emisiones netas negativas. La CN emite 3,410,729 ton CO₂. La distribución muestra: uso de pellets 79.6%, cambio de suelo 17.6%, producción pellets 1.5%, transporte 1.3%. En la CN: combustibles 99.9%, transporte 0.1%. Bajo la regulación de bonos de carbono de Querétaro, la CN enfrenta impuestos anuales por \$109.24 millones USD, mientras que la CP no realiza pagos por este concepto (véase **Tabla 33**).

Tabla 33. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 2.1.

MODELO DINÁMICO: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES		
VARIABLE	VALOR	%*
Emis. Fijadas (ECO_2F)	812,236,634.11	
Emis. CP CO ₂ (ETE) S/cambio de tierra	81,989.95	
Emis. CP CO ₂ (ETE) C/cambio de tierra	103,924.73	
Emis. CN CO ₂ (ETF)	3,411,723.47	
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EUCT)	21,934.78	21.1%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	- 812,132,709.4	
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	1,962.01	1.9%
Emis. Transp. MP (MPECO_2_T)	2,355.07	2.3%
Emis. Prod. Pellets PECO_2)	1,434.00	1.4%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T) (CEECO_2_T)	238.19	0.2%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	76,000.68	73.1%
EMISIONES TOTALES POR TRANSPORT CP	4,555.26	4.4%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCECO_2_T)	2,904.00	0.1%
Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	3,408,226.60	99.9%
Emis. Quema (QEKO_2)	592.87	0.0%
Emis. Relleno (UREKO_2)	-	0.0%
Emis. Transporte a Relleno (UREKO_2_T)	-	0.0%
Refinería usada (FCTCC)	Refinería de Salamanca	
Comb, Conv. Mercado (FCTCC)	543,576.81	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de emisiones de la CP y CN.

El impacto social incluye \$0.34 millones USD en educación (0.05% presupuesto), \$1.73 millones USD en salud (0.6%) y \$0.39 millones USD en desarrollo per cápita (0.1%), generando 1,059 empleos directos con salarios de 720 USD/mes y un beneficio al estado del 0.1%. La síntesis de los datos se muestra en la **Tabla 34**.

Tabla 34. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 2.1.

MODELO DINAMICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA		
VARIABLE	VALOR	%*
Beneficio Social Total de la CP (BGEA)	0.00129348	0.1%
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 448,861.26	15.1%
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 2,001,594.79	67.4%
Dinero invertido en PIB (MIWA_PIB)	\$ 517,969.70	17.4%
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 2,968,425.75	100.0%
BS_E	0.000641169	0.1%
BS_H	0.007456865	0.7%
BS_PIB	0.001544372	0.2%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 15,163,496.17	
Tasa de retención (TRW)	\$ 1,971,254.50	66.4%
Cantidad de trabajadores (TW)		1,756.00
Salario a cada trabajador	\$ 8,635.25	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total del beneficio social.

XV.VII.V ESCENARIO 2.2: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES – ESTÁTICO

En el enfoque estático para reducción de emisiones muestra pérdidas de -\$16.35 millones USD. En este enfoque se producen 46,494 toneladas de pellets usando sólo 56,700 toneladas de residuos (13.4% del total). Costos por infraestructura de \$18.6 millones USD (plantas 68.8%, almacenes 31.2%) y logísticos por \$2.55 millones USD (transporte a almacenes 22.4%, plantas 4.8%, centrales 72.8%).

Con sólo 2 almacenes (véase **Figura 14**), Amealco de Bonfil y Corregidora poseen capacidades operativas de 55,500 toneladas para ambos funcionando al 51.3% y 50.9%, respectivamente mientras que el sistema opera con 18 plantas destacando Amealco de Bonfil (28,250 toneladas) al 99.9% y Huimilpan (28,250 toneladas) al 99.2%. Los costos de la CP ascienden a \$22 millones USD (infraestructura 84.5%, transporte 11.6% y pago a los agricultores 3.9%). Por otro lado, la CN presenta costos por \$49,532.7 millones USD (96.9% transporte combustible), y ganancias por \$5.68 millones USD, 56.3% por ventas y el resto por manejo residuos. El desglose numérico de

todos los flujos de dinero, así como de residuos empleados y transformados se presenta en la **Tabla 35**.

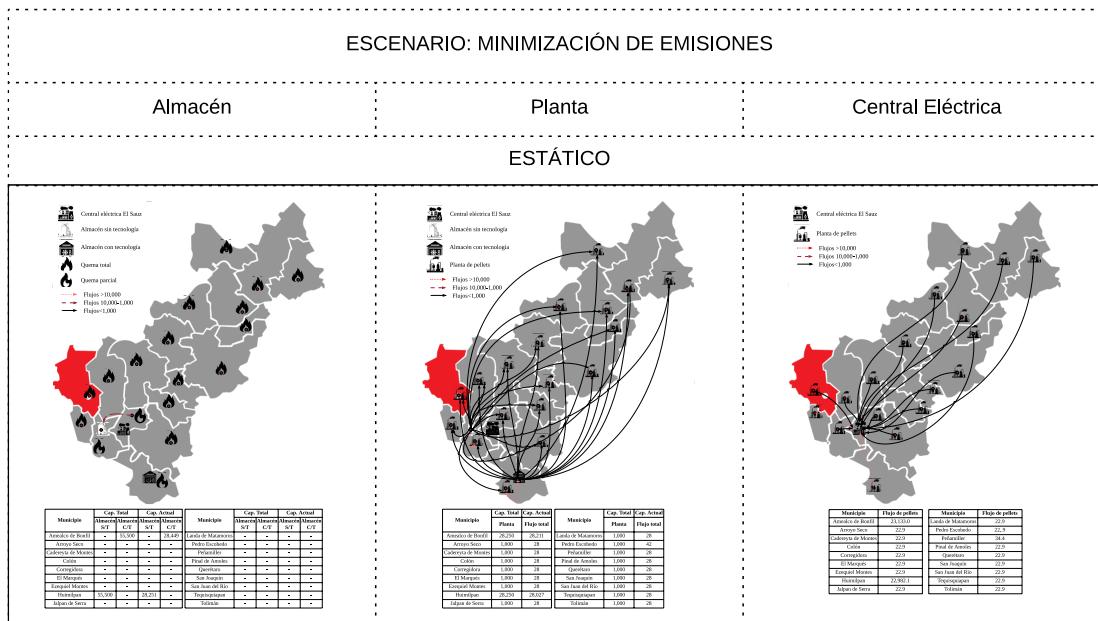


Figura 14. Minimización de emisiones. Distribución logística de la cadena estática.

Tabla 35. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 2.2.

MODELO ESTÁTICO: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES			
VARIABLE	VALOR		%*
Ganancia de la CP	- \$	225,700,464.45	
Ganancias Totales de la CP	\$	40,987,428.30	100.0%
Ventas (GV)	\$	23,092,278.30	56.3%
Gan. Manejo (GM)	\$	17,895,150.00	43.7%
Costos Almacén (CC_A)	\$	39,831,180.79	30.5%
Costos Plantas (CC_P)	\$	90,809,976.92	69.5%
Cotos Totales Plantas (CTTAP)	\$	130,641,157.71	49.0%
Cost. Quema (CQR)	\$	53,348,237.71	0.1%
Cost. Relleno (CUR)	\$	-	0.0%
Cost. Transp. Relleno (CTR)	\$	-	0.0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$	47,305,478.33	36.5%
Cost. Transp. Refinería (CTMP)	\$	47,005,176.01	36.2%
Cost. Transp. Central (CTP)	\$	35,470,730.70	27.3%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$	129,781,385.04	48.7%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$	46,842,391,107.98	99.9%
Pago Agricultores (CTDA)	\$	6,265,350.00	2.3%
Costos Totales CP	\$	266,687,892.75	100.0%

Costos Totales CN	\$ 46,902,004,695.69	100.0%
Demanda (DFC)(DE)	31,746,834,270.00	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de cada categoría, como residuos totales, transporte total, costos totales, etc.

Las emisiones de la CP son de 230,513 ton CO₂ (236,564 con cambio de suelo) mientras que las de la CN de 14,885,459 ton CO₂. En la CP, las emisiones provienen principalmente del uso de pellets (95.5%), seguido por cambio de suelo (2.6%), producción (1.8%) y transporte (0.1%). En la CN, el transporte genera el 99.9% de las emisiones. En este escenario el impuesto a pagar por la CN es de \$476.75 millones USD. La **Tabla 36** sintetiza todos los aspectos ambientales considerados en el modelo matemático.

Tabla 36. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 2.2.

MODELO ESTÁTICO: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES		
VARIABLE	VALOR	%*
Emis. Fijadas (ECO_2F)	812,236,634.11	
Emis. CP CO ₂ (ETE) S/cambio de tierra	1,677,432.66	
Emis. CP CO ₂ (ETE) C/cambio de tierra	1,717,380.99	
Emis. CN CO ₂ (ETF)	14,529,216.84	
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EUCT)	39,948.33	2.3%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	- 810,519,253.1	
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	5,358.65	0.3%
Emis. Transp. MP (MPECO_2_T)	5,324.63	0.3%
Emis. Prod. Pellets PEKO_2)	30,791.94	1.8%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T) (CEECO_2_T)	4,018.04	0.2%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	1,631,939.40	95.0%
EMISIONES TOTALES POR TRANSPORT CP	14,701.32	0.9%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCECO_2_T)	12,369.16	0.1%
Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	14,516,816.48	99.9%
Emis. Quema (QEKO_2)	31.19	0.0%
Emis. Relleno (UREKO_2)	-	0.0%
Emis. Transporte a Relleno (URECO_2_T)	-	0.0%
Refinería usada (FCTCC)	1.00	
Comb, Conv. Mercado (FCTCC)	2,315,281.74	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de emisiones de la CP y CN.

El impacto social presenta un valor de \$0.33 millones USD por el sector educación, \$0.65 millones USD por el sector salud y \$0.36 millones USD

por el sector de desarrollo, con 2,221 empleos directos y manejando el mismo salario mensual que los escenarios anteriores. Por cada sector se puede tener una contribución del 0.05%, 0.2% y 0.1% para los sectores educación, salud y desarrollo respectivamente llegando a representar el 0.1% del beneficio actual en Querétaro. Todos los aspectos sociales considerados se muestran en la **Tabla 37**.

Tabla 37. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 2.2.

MODELO ESTÁTICO: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES		
VARIABLE	VALOR	%*
Beneficio Social Total de la CP (BGEA)	0.005972099	0.6%
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 4,436,690.40	32.4%
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 4,699,242.23	34.3%
Dinero invertido en PIB (MIWA_PIB)	\$ 4,569,561.67	33.3%
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 13,705,494.29	100.0%
BS_E	0.006337519	0.6%
BS_H	0.017506848	1.8%
BS_PIB	0.013624547	1.4%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 290,962,706.58	
Tasa de retención (TRW)	\$ 37,825,151.86	276.0%
Cantidad de trabajadores (TW)		33,691.68
Salario a cada trabajador	\$ 8,636.04	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total del beneficio social.

XV.VII.VI COMPARATIVA ENTRE EL ESCENARIO 2.1 Y 2.2: MINIMIZACIÓN DE EMISIONES

El análisis detallado de los modelos dinámico y estático en el escenario de minimización de emisiones revela diferencias fundamentales en su desempeño ambiental. El modelo dinámico registra emisiones netas de -812,136,368 toneladas de CO₂, superando al modelo estático (-812,000,070 toneladas) por un margen del 0.02%, lo que demuestra una ligera ventaja en captura de carbono. Esta ventaja, aunque numéricamente modesta, refleja una mayor eficiencia en la captura de carbono, respaldada por un uso más estratégico de los recursos disponibles y equivale a más de 136 mil toneladas

de CO₂ adicionales capturadas, comparable a las emisiones anuales de aproximadamente 29.6 mil vehículos (EPA, 2024).

El modelo dinámico produce 16,422 toneladas de pellets utilizando el 46.2% del total disponible de materia. En contraste, el modelo estático genera 46,494 toneladas de pellets, pero emplea apenas el 13.4% de los residuos totales. Esta diferencia del 70.9% en eficiencia de aprovechamiento evidencia que el modelo dinámico aprovecha mejor la materia prima, evitando el desperdicio de 227,304 toneladas de residuos no utilizados frente a las 365,428 toneladas del estático. Por parte de las ganancias éstas son 69.9% mayores en el modelo dinámico enfrentándose un valor de \$9.6 millones USD contra \$5.7 millones USD.

La infraestructura requerida por cada modelo muestra configuraciones distintas (véase **Figura 15**). El modelo dinámico opera con 9 almacenes frente a los 2 del modelo estático, pero con una utilización promedio un 19.2% mayor. En plantas de pellets, ambos mantienen 18 instalaciones ayudando un poco en que en ambos casos los costos predominantes se deben a la infraestructura representando alrededor del 80.9 y 84.5% para el dinámico y estático, respectivamente; sin embargo, el modelo estático requiere un 69.7% menos debido a la menor cantidad de materia prima tratada y por ende de infraestructura (véase **Tabla 38** y **Tabla 39**).

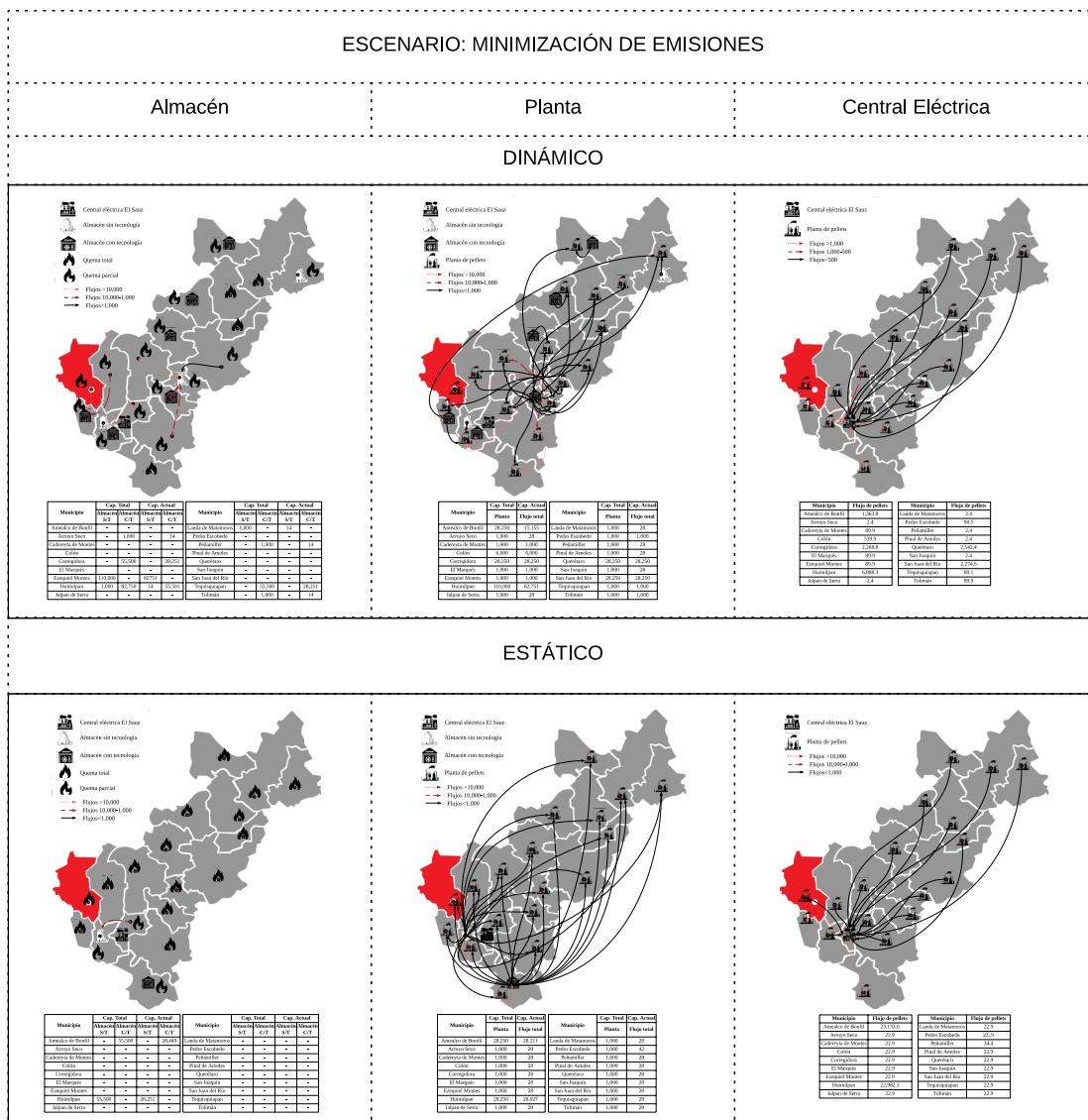
Tabla 38. Registro total de almacenes y plantas instalados por modelo empleado: Escenario 2.

CAP ALMACÉN	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,750	110,000	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	
DINÁMICO	5	0	0	0	2	1	1	9
ESTÁTICO	0	0	0	0	2	0	0	2
SIN TECNOLOGÍA							CON TECNOLOGÍA	
DINÁMICO	3				6			9
ESTÁTICO	1				1			2
CAP PLANTA	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,750	110,000	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	
DINÁMICO	12	1	0	4	0	0	1	18
ESTÁTICO	16	0	0	2	0	0	0	18

Tabla 39. Tabla de especificaciones por almacén y tipo de modelo: Escenario 2.

Ubicación	Tipo de modelo	Tecnología		Capacidad*		Flujo		% ocupación	
		SI	NO	C/Tec	S/Tec	C/Tec	S/Tec	C/Tec	S/Tec
1. Amealco de Bonfil	Dinámico								
	Estático	X		5		28449		51.3%	
2. Arroyo Seco	Dinámico	X		1		14		1.4%	
	Estático								
3. Cadereyta	Dinámico								
	Estático								
4. Colón	Dinámico								
	Estático								
5. Corregidora	Dinámico	X		5		28251		50.9%	
	Estático								
6. El Marqués	Dinámico								
	Estático								
7. Ezequiel Montes	Dinámico		X		7		82751		75.2%
	Estático								
8. Huimilpan	Dinámico	X	X	6	1	55501	14	67.1%	1.4%
	Estático		X		5		28251		50.9%
9. Jalpan de Serra	Dinámico								
	Estático								
10. Landa de Matamoros	Dinámico		X		1		14		1.4%
	Estático								
11. Pedro Escobedo	Dinámico								
	Estático								
12. Peñamiller	Dinámico	X		1			14		1.4%
	Estático								
13. Pinal de Amoles	Dinámico								
	Estático								
14. Querétaro	Dinámico								
	Estático								
15. San Joaquín	Dinámico								
	Estático								
16. San Juan del Río	Dinámico								
	Estático								
17. Tequisquiapan	Dinámico	X		5		28251		50.9%	
	Estático								
18. Tolimán	Dinámico	X		1			14		1.4%
	Estático								

*NOTA: La capacidad "1" corresponde al valor de 1,000 ton/a, la "2" a 6,000 ton/a, la "3" a 11,000 ton/a, la "4" a 28,250 ton/a, la "5" a 55,500 ton/a, la "6" a 82,750 ton/a y la "7" a 110,000 ton/a.



de materia empleada tanto en un modelo como en el otro, aunque en ambos casos este costo representa el 3.9% de los costos totales.

Particularmente en este análisis, el modelo estático muestra una relación pérdidas/ganancias de 2.88 (\$16.3 USD/\$5.67 USD), mientras que el dinámico registra 6.86 (\$66.15/\$9.6). Esto indica que el estático genera \$1 USD de ganancia por cada \$2.88 de pérdida, frente a \$1 por cada \$6.86 en el dinámico, representando una ventaja del 138.2% en eficiencia relativa. Sin embargo, frente a los costos totales la CP por el modelo dinámico es 70.9% mayor que la estática, por el contrario, en costos la CN es 75.9% menor a la estática.

La demanda energética calculada por cada modelo explica parte de estas y futuras diferencias. El estático proyecta cubrir 31,746.8 millones de kWh, frente a los 7,288.5 millones de kWh del dinámico, una diferencia del 77.0% que impacta directamente en la estructura de costos y emisiones. Esta variación se refleja en los costos de la CN, donde el modelo dinámico incurre en \$10,994.5 millones por transporte, un 77.1% menos que los \$47,988.1 millones del estático.

En el desglose de emisiones brutas, el modelo dinámico muestra un mejor desempeño en varios componentes clave. Particularmente, el análisis detallado de los datos de emisiones revela diferencias significativas en el desempeño ambiental de ambos modelos. El modelo estático presenta una intensidad de emisiones de 1.5 ton CO₂ por cada \$1,000 USD de costos totales (calculado como emisiones totales/costos CP), mientras que el dinámico registra 14.5 ton CO₂ por igual valor, mostrando una ventaja del 89.5% en eficiencia ambiental por unidad de inversión. Esta diferencia se acentúa al analizar las emisiones específicas por tipo de actividad. Las emisiones por uso de pellets representan el 79.6% del total, mientras que en el modelo estático alcanzan el 95.5%, manteniendo la misma proporción a escala global, pero con valores absolutos mayores. Así mismo, se observa que la única ventaja

del modelo dinámico es en las emisiones por producción de pellets (1,506 ton CO₂ vs 4,264 ton CO₂) logrando una reducción del 64.7%. Esta brecha se explica por el mayor volumen de procesamiento del modelo estático (46,494 vs 16,422 toneladas de pellets). Individualmente, las emisiones por transporte (1,299 vs 289 toneladas CO₂) y cambio de tierra (17,650 vs 6,051 toneladas CO₂) tienen un aumento del 77.8% y 65.7% respectivamente. Sin embargo, la aparente ventaja en las emisiones por transporte se relativiza al considerar la producción total, donde el modelo dinámico muestra una intensidad de emisiones logísticas de 0.079 ton CO₂/ton pellet, comparado con 0.0062 ton CO₂/ton pellet del estático, revelando que el primero es 92.2% más intensivo en emisiones por unidad transportada.

El impacto en la CN amplifica las diferencias entre ambos modelos. El modelo dinámico genera 3.41 millones de toneladas de CO₂, frente a los 14.89 millones del estático, una diferencia del 336.4% que refleja la mayor eficiencia en la estimación de la demanda global del primer enfoque. Esta brecha se concentra principalmente en las emisiones por uso de combustibles convencionales (99.9% del total para ambos).

La eficiencia global se manifiesta en el balance neto de emisiones. El modelo dinámico logra -812.1 millones de toneladas CO₂ netas, superando al estático (-812 millones) por 0.02%, gracias a una mejor optimización de sus flujos energéticos y mayor aprovechamiento de los residuos disponibles (194,824 vs 56,700 toneladas utilizadas). Siendo así que, de los impuestos al carbono, calculados a \$32.03 USD por tonelada, el modelo dinámico debe pagar por obligaciones fiscales de la CN \$109.2 millones anuales frente a los \$476.7 millones del estático, representando un ahorro del 77.1%.

Finalmente, en términos de beneficios sociales asociados, el modelo dinámico genera 1,059 empleos directos con una inversión social total de \$2.46 millones, mientras que el estático crea 2,221 puestos con \$1.34 millones. Esta diferencia del 110% en generación de empleo contrasta con una

inversión 83% mayor en el modelo dinámico, reflejando compensaciones entre cantidad y calidad de los beneficios sociales distribuidos por la instalación de mayor infraestructura. Específicamente el modelo dinámico alcanza a cubrir el 84% más del PIB.

XV.VII.VII ESCENARIO 3.1: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL – DINÁMICO

Priorizando el impacto social, este escenario genera un beneficio de \$9 millones USD (\$7.96 millones USD por manejo de residuos y \$1.1 millones USD por venta de pellets) con pérdidas de -\$90.8 millones USD. En este escenario se producen 15,638 toneladas de pellets usando 182,098 toneladas residuos (43.1% del total disponible).

Los costos por infraestructura (\$56.85 millones USD) se deben a los 29 almacenes operativos destacando Arroyo Seco (1,000 toneladas) y Colón (1,000 toneladas) al 100% ambos almacenes sin emplear la tecnología- y las 18 plantas con Cadereyta (1,000 toneladas), Corregidora (1,000 toneladas), El Marqués (1,000 toneladas), Huimilpan (1,000 toneladas), Tequisquiapan (1,000 toneladas) y Tolimán (1,000 toneladas) operando al 100%; la distribución logística puede observarse en la **Figura 16**. Por otra parte, los costos por transporte (\$40.2 millones USD) se deben principalmente a los costos por traslado hacia la refinería (51.7%) seguidos de los de traslado a los almacenes (43.1%) culminando con los del transporte a la central (5.2%). Particularmente, los costos totales en la CP de \$99.8 millones USD son especialmente por la infraestructura (56.9%) continuando con los de intercambio de flujos (40.3%) y terminando con el pago a los agricultores (2.8%). De manera análoga los de la CN con \$12,014.3 millones USD son principalmente por el transporte (99.9%). Todos estos valores pueden observarse en la **Tabla 40**.

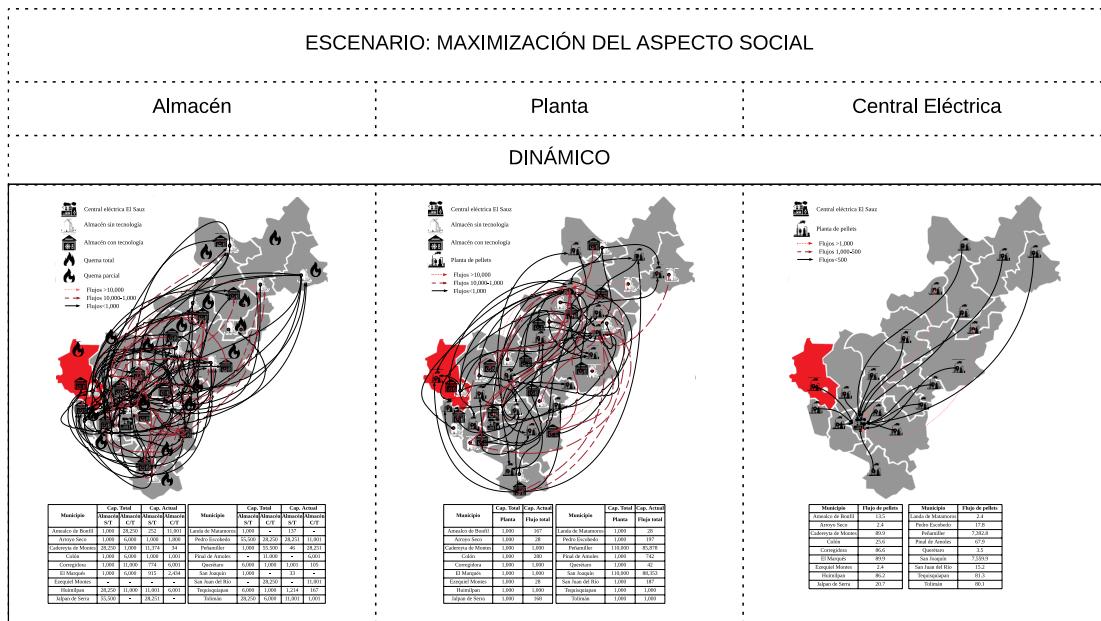


Figura 16. Comparativa de modelos en el aspecto social: Infraestructura y red logística.

Tabla 40. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 3.1.

MODELO DINÁMICO: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL			
VARIABLE	VALOR		%*
Ganancia de la CP	-\$	66,154,407.39	
Ganancias Totales de la CP	\$	9,643,149.74	100.0%
Ventas (GV)	\$	1,129,340.94	11.7%
Gan. Manejo (GM)	\$	8,513,808.80	88.3%
Costos Almacén (CC_A)	\$	19,561,560.23	31.9%
Costos Plantas (CC_P)	\$	41,785,062.05	68.1%
Cotos Totales Plantas (CTTAP)	\$	61,346,622.28	80.9%
Cost. Quema (CQR)	\$	960,246,999.71	8.0%
Cost. Relleno (CUR)	\$	-	0.0%
Cost. Transp. Relleno (CTR)	\$	-	0.0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$	3,903,447.40	34.0%
Cost. Transp. Refinería (CTMP)	\$	6,935,530.60	60.5%
Cost. Transp. Central (CTP)	\$	631,149.65	5.5%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$	11,470,127.65	15.1%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$	10,994,449,748.75	91.9%
Pago Agricultores (CTDA)	\$	2,980,807.20	3.9%
Costos Totales CP	\$	75,797,557.13	100.0%
Costos Totales CN	\$	11,957,677,555.66	100.0%
Demand (DFC)(DE)		7,288,505,791.30	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de cada categoría, como residuos totales, transporte total, costos totales, etc.

En el aspecto de emisiones, la CP presenta un balance total de 103,925 ton CO₂ mientras que la CN un valor de 3,411,723 ton CO₂. La distribución que sigue la primera cadena descrita y ordenada de manera descendente son las emisiones por uso pellets (73.1%), cambio de suelo (21.1%), transporte 4.4% y producción (1.4%), mientras que la CN presenta el mismo comportamiento que los escenarios anteriores con un valor del 99.9% de los costos debido al transporte. En este escenario el impuesto a pagar por la CN es de \$109.3 millones USD. En la **Tabla 41** se encuentra el compendio de factores analizados en el modelo.

Tabla 41. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 3.1.

MODELO DINÁMICO: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL		
VARIABLE	VALOR	%*
Emis. Fijadas (ECO_2F)	812,236,634.11	
Emis. CP CO ₂ (ETE) S/cambio de tierra	82,616.13	
Emis. CP CO ₂ (ETE) C/cambio de tierra	100,266.04	
Emis. CN CO ₂ (ETF)	3,410,728.98	
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EUCT)	17,649.91	17.6%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	- 812,136,368.1	
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	442.17	0.4%
Emis. Transp. MP (MPECO_2_T)	785.64	0.8%
Emis. Prod. Pellets PEKO_2)	1,505.90	1.5%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T) (CEECO_2_T)	71.50	0.1%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	79,810.92	79.6%
EMISIONES TOTALES POR TRANSPORT CP	1,299.31	1.3%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCECO_2_T)	2,903.18	0.1%
Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	3,407,264.35	99.9%
Emis. Quema (QECO_2)	561.44	0.0%
Emis. Relleno (URECO_2)	-	0.0%
Emis. Transporte a Relleno (URECO_2_T)	-	0.0%
Refinería usada (FCTCC)	1.00	
Comb, Conv. Mercado (FCTCC)	543423.3414	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de las emisiones de CP y CN.

El impacto social se reparte en \$0.45 millones USD en el sector educativo (0.1%), \$2 millones USD en el sector salud (0.7%) y \$0.52 millones USD en el sector de desarrollo (0.2%), con 1,756 empleos directos

contribuyendo al 0.1% del PIB de Querétaro. Todos los aspectos considerados en el modelo para la parte social se encuentran en la **Tabla 42**.

Tabla 42. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 3.1.

MODELO DINÁMICO: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL		
VARIABLE	VALOR	%*
Beneficio Social Total de la CP (BGEA)	0.001073308	0.1%
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 335,705.27	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 1,731,507.39	
Dinero invertido en PIB (MIWA_PIB)	\$ 395,945.18	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 2,463,157.85	
BS_E	0.000479533	0.05%
BS_H	0.006450665	0.6%
BS_PIB	0.001180545	0.1%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 9,147,661.61	
Tasa de retención (TRW)	\$ 1,189,196.01	
Cantidad de trabajadores (TW)	1,059.00	
Salario a cada trabajador	\$ 8,638.02	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total del beneficio social.

XV.VII.VIII **ESCENARIO 3.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL – ESTÁTICO**

Finalmente, el enfoque estático para el beneficio social muestra pérdidas de -\$225.7 millones USD. En este escenario se producen 335,790 toneladas pellets usando 409,500 toneladas residuos (97.0% del disponible) y genera unas ganancias de \$17.9 millones USD por manejo de residuos y \$23.1 millones USD por venta de pellets.

Los costos más representativos en la CP se deben a la infraestructura, llegando a representar el 48.7% del total, con 24 almacenes destacando la instalada en Pedro Escobedo (6,000 toneladas) operando al 100%, mientras las otras no sobrepasan el 80% de operatividad. Este mismo escenario instala 18 plantas con destacado funcionamiento las ubicadas en Cadereyta y El Marqués, ambas instaladas con una capacidad de 6,000 toneladas y operando al 100%, seguidas de las ubicadas en Corregidora, Jalpan de Serra, Landa de Matamoros, Peñamiller, Pinal de Amoles, San Joaquín, Tequisquiapan y

Tolimán, todas con una capacidad de 28,250 toneladas y operando al 100% también (véase **Figura 17**). De estos costos, el 30.5% corresponden a los costos por almacenes instalados y el 69.5% a los de las plantas. Seguido a estos costos, se encuentran los debidos al intercambio de flujos (\$129.78 millones USD) con un 36.5% debido a los traslados hacia los almacenes, 36.2% debidos al traslado hacia la refinería y terminando con un 27.3% por los del transporte a la central. Finalmente, en magnitud le siguen los costos por pago a los agricultores representando sólo el 2.3% del total. Por otro lado, en la CN el 99.9% de los costos se deben a los de transporte. Para más información sobre los costos reportados por el modelo estático ver **Tabla 43**.

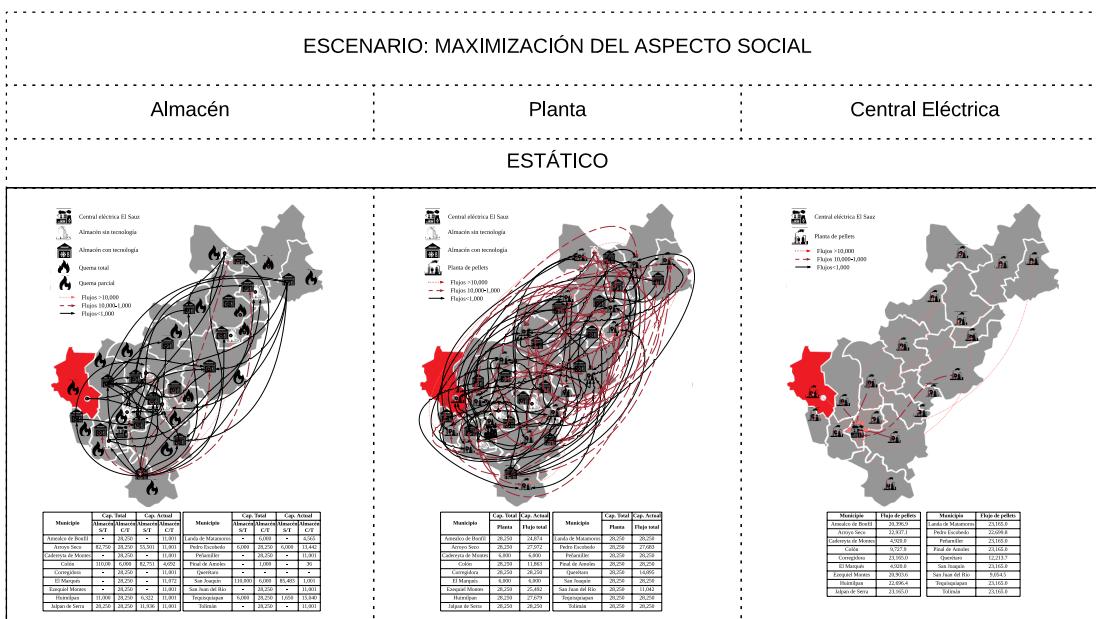


Figura 17. Maximización del beneficio económico. Distribución logística de la cadena dinámica.

Tabla 43. Desglose total de los costos en la cadena: Escenario 3.2.

MODELO ESTÁTICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA		
VARIABLE	VALOR	%*
Ganancia de la CP	-\$ 16,347,787.66	
Ganancias Totales de la CP	\$ 5,675,182.38	100.0%
Ventas (GV)	\$ 3,197,392.38	56.3%
Gan. Manejo (GM)	\$ 2,477,790.00	43.7%
Costos Almacén (CC_A)	\$ 5,803,414.26	31.2%
Costos Plantas (CC_P)	\$ 12,804,659.04	68.8%
Cotos Totales Plantas (CTTAP)	\$ 18,608,073.30	84.5%
Cost. Quema (CQR)	\$ 1,543,751,837.71	3.1%
Cost. Relleno (CUR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Relleno (CTR)	\$ -	0.0%
Cost. Transp. Almacén (CTR)	\$ 570,048.26	22.4%
Cost. Transp. Refinería (CTMP)	\$ 122,568.55	4.8%
Cost. Transp. Central (CTP)	\$ 1,854,769.93	72.8%
Cost. Transp. Totales (CTTE)	\$ 2,547,386.74	11.6%
Cost. Transp. Mercado (CTFCC)	\$ 47,988,113,551.37	96.9%
Pago Agricultores (CTDA)	\$ 867,510.00	3.9%
Costos Totales CP	\$ 22,022,970.04	100.0%
Costos Totales CN	\$ 49,532,732,899.1	100.0%
Demanda (DFC)(DE)	\$ 31,746,834,270.00	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de cada categoría, como residuos totales, transporte total, costos totales, etc.

De las emisiones en la CP se tienen 1,717,381 ton CO₂ netas y en la CN: 14,529,217 ton CO₂. Su distribución sigue el orden de las generadas por el uso pellets representando el 95%, cambio de suelo con 2.3%, producción con 1.8% y transporte 0.9%. Particularmente el impuesto a pagar por la CN es de \$465.3 millones USD. En la **Tabla 44** se pueden observar todos los factores y resultados para la parte de emisiones.

Tabla 44. Desglose total de emisiones en la cadena: Escenario 3.2.

MODELO ESTÁTICO: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL		
VARIABLE	VALOR	%*
Balance de emisiones totales de la CP	- 812,000,070.2	
Emis. Fijadas (ECO_2F)	812,236,634.11	
Emis. CP CO ₂ (ETE) S/cambio de tierra	230,512.90	
Emis. CP CO ₂ (ETE) C/cambio de tierra	236,563.94	
Emis. CN CO ₂ (ETF)	14,885,458.97	
Emis. CO ₂ por ocupación y cambio de tierra (EUCT)	6,051.04	2.6%
Emis. CO ₂ de la Cadena (EPCP)	- 812,000,070.2	
Emis. Transp. Almacén (RAECO_2_T)	64.57	0.0%
Emis. Transp. MP (MPECO_2_T)	13.88	0.0%
Emis. Prod. Pellets PEKO_2)	4,263.50	1.8%
Emis. Transp. Pellets. (EMECO_2_T) (CEECO_2_T)	210.10	0.1%
Emis. Uso pellets (EUECO_2)	225,960.84	95.5%
EMISIONES TOTALES POR TRANSPORT CP	288.56	0.1%
Emis. Transp. Comb. Conv. (FCECO_2_T)	12,671.70	0.1%
Emis. Uso Comb. Conv. (FUECO_2)	14,871,884.66	99.9%
Emis. Quema (QECO_2)	902.61	0.0%
Emis. Relleno (URECO_2)	-	0.0%
Emis. Transporte a Relleno (URECO_2_T)	-	0.0%
Refinería usada (FCTCC)	1.00	
Comb, Conv. Mercado (FCTCC)	2,371,911.43	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total de las emisiones de la CP y CN.

En el impacto social se genera un aumento de \$4.44 millones USD para el sector educación (0.6%), \$4.70 millones USD para el sector salud (1.8%) y \$4.57 millones USD para el sector en desarrollo (1.4%), con 33,692 empleos directos y un aporte al PIB de Querétaro con valor del 0.6%. La **Tabla 45** muestra una síntesis de los resultados por el aspecto social.

Tabla 45. Desglose total del beneficio social en la cadena: Escenario 3.2.

MODELO DINAMICO: MAXIMIZACIÓN DE LA GANANCIA		
VARIABLE	VALOR	%
Beneficio Social Total de la CP (BGEA)	0.0005831512	0.1%
Dinero invertido en sector educación (MIWA_E)	\$ 334,493.00	
Dinero invertido en sector salud (MIWA_H)	\$ 648,549.25	
Dinero invertido en PIB (MIWA_PIB)	\$ 355,243.44	
Beneficio Social Total (BSGA)	\$ 1,338,285.68	
BS_E	0.000477801	0.05%
BS_H	0.002416146	0.2%
BS_PIB	0.001059189	0.1%
Salario a todos los trabajadores (STAP)	\$ 19,184,354.28	
Tasa de retención (TRW)	\$ 2,493,966.06	
Cantidad de trabajadores (TW)	2,221.00	
Salario a cada trabajador	\$ 8,637.71	

NOTA: * La variación porcentual fue calculada considerando como base el valor total del beneficio social.

XV.VII.IX COMPARATIVA ENTRE EL ESCENARIO 3.1 Y 3.2: MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO SOCIAL

El análisis de los indicadores sociales revela diferencias fundamentales en cómo ambos modelos distribuyen sus beneficios a la comunidad. El modelo dinámico genera un beneficio social total de \$2.97 millones USD, que representa apenas el 21.7% del \$13.71 millones USD logrados por el modelo estático, evidenciando una marcada diferencia en la escala de impacto entre ambos enfoques, pues si bien el dinámico presenta un menor beneficio global (0.1% vs. 0.6%) para el PIB de Querétaro.

En el desglose sectorial, las inversiones muestran patrones divergentes. Para educación, el modelo dinámico destina \$448,861 - equivalente al 15.1% de su beneficio social total-, un 89.9% menos que los \$4.44 millones del estático - representando el 32.4% de sus recursos sociales-. Esta diferencia en inversión absoluta se reduce al comparar la eficiencia por empleo generado: el dinámico invierte \$255.6 USD por puesto de trabajo creado (\$448,861/1,756 empleos), frente a los \$131.7 USD del estático

(\$4.44M/33,692 empleos), mostrando que el primero destina un 94.1% más por empleado al sector educación.

La inversión en desarrollo (o PIB) muestra que el modelo dinámico asigna \$517,970 USD, apenas el 11.3% de los \$4.57 millones del estático. Sin embargo, este último concentra el 33.3% de su beneficio social en este rubro, frente al 17.4% del dinámico, evidenciando una diferencia del 88.7% en priorización estratégica. Esta brecha se repite en salud, donde el dinámico invierte \$2 millones (67.4% del total social) frente a \$4.7 millones del estático (34.3% del total), una diferencia del 57.4%. Sin embargo, al analizar la eficiencia por dólar invertido, el modelo dinámico muestra ventajas cualitativas: cada millón USD genera 592 empleos directos, frente a 2,458 del estático, pero con beneficios per cápita un 88.7% superiores.

La generación de empleo presenta una disparidad más notable. El modelo estático genera 33,692 puestos de trabajo, un 94.8% más que los 1,756 del dinámico. No obstante, al analizar la calidad del empleo, ambos modelos mantienen salarios equivalentes al 112% del mínimo regional (\$720 USD/mes), demostrando que la ventaja cuantitativa del estático no se traduce en mejores remuneraciones individuales, debido a que bien se emplearon los mismos parámetros para ambos modelos. Por su parte, los indicadores de retención laboral muestran otra dimensión de comparación. El modelo dinámico retiene \$1.97 millones en impuestos laborales, mientras que el estático alcanza \$37.83 millones, una diferencia del 94.8% que refleja su mayor escala de contratación.

Un análisis de eficiencia global revela que el modelo dinámico genera \$29.7 USD de beneficio social por cada \$1,000 USD de costos totales, comparado con \$51.4 USD del estático (calculado como beneficio social total/costos CP). Esta ventaja del 57.9% en eficiencia de inversión social contrasta con la mayor escala absoluta del modelo estático. Por otro lado, el modelo estático produce \$40.82 de beneficio social por tonelada de pellet

producida, el dinámico genera \$189.8 por tonelada, una diferencia del 365%. Esta disparidad se explica por la menor producción del modelo dinámico (15,638 vs 335,790 toneladas).

Ahora bien, al examinar el desempeño de ambos modelos, se revelan diferencias fundamentales en su capacidad para reducir el impacto climático. El modelo dinámico logra emisiones netas de -812.13 millones de toneladas de CO₂, superando ligeramente al estático (-810.5 millones), lo que representa una ventaja del 0.2% en captura de carbono. Esta diferencia, aunque aparentemente modesta, equivale a la absorción anual de 1,618.4 millones de árboles maduros, según EPA (2024).

Por otro lado, la producción de pellets muestra una diferencia significativa: mientras el modelo dinámico genera 15,638 toneladas, el estático produce 335,790 toneladas, un 95.3% más. Sin embargo, esta mayor producción en el modelo estático se debe al aprovechamiento de residuos, utilizando el 97% de materia disponible frente a las 182,098 toneladas del dinámico, lo que representa una diferencia de más de la mitad en eficiencia de materia prima. Los costos operativos favorecen claramente al modelo dinámico, con gastos logísticos totales de \$40.2 millones, un 69% inferiores a los \$129.78 millones del estático. Esta eficiencia se refleja particularmente en el transporte a plantas (51.7% de los costos en el dinámico vs 36.2% en el estático). Por su parte, el modelo estático presenta una mejor distribución en tanto todos los costos, incluyendo los debidos por el transporte a plantas, teniendo un 36.5% para almacenes y 27.3% para la central eléctrica, evidenciando una mejor optimización de la red de distribución (véase **Figura 18**) en comparación con el dinámico (43.1% almacenes y 5.2% plantas). La comparación de infraestructura revela que el modelo dinámico opera con 29 almacenes, 5 más que los del estático, pero con una utilización promedio menor de 20.9% (véase **Tabla 46** y **Tabla 47**). En plantas de pellets, ambos mantienen 18 instalaciones (véase **Tabla 46**), llegando a dar una distribución parecida en tanto las representaciones del total de costos por infraestructura

con un 64.2% y 35.8% para plantas y almacenes del modelo dinámico respectivamente mientras que el estático se tiene 69.5% plantas y 30.5% almacenes. Sin embargo, dentro de los costos totales de la CP ya sea para el dinámico (56.9% del total de costos) o estático (49%), el primero es 56.5% mayor en este rubro. Como último factor analizado, los costos por la CP se definen mayormente por el uso del combustible convencional con un 91.5% para el dinámico y 99.9% para estático, esto nuevamente se debe a la cantidad de demanda calculada a cubrir por ambos modelos efecto que también se tiene en el cálculo de las emisiones; mientras la estimación de 31,746.8 millones kWh llevada a cabo por cualquier escenario, pero aplicando el modelo estático, los otros hacen una estimación de 7,288.5 millones kWh representando la misma disminución en la estimación del 74.4%.

Tabla 46. Tabla de especificaciones por almacén y tipo de modelo: Escenario 3.

CAP ALMACÉN	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,750	110,000	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	
DINÁMICO	11	6	3	6	3	0	0	29
ESTÁTICO	1	5	1	14	0	1	2	24
SIN TECNOLOGÍA							CON TECNOLOGÍA	
DINÁMICO	15				14			29
ESTÁTICO	7				17			24
CAP PLANTA	1,000	6,000	11,000	28,250	55,500	82,750	110,000	TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	
DINÁMICO	16	0	0	0	0	0	2	18
ESTÁTICO	0	2	0	16	0	0	0	18

Tabla 47. Registro total de almacenes y plantas instalados por modelo empleado: Escenario 3.

Ubicación	Tipo de modelo	Tecnología		Capacidad*		Flujo		% ocupación	
		SI	NO	C/Tec	S/Tec	C/Tec	S/Tec	C/Tec	S/Tec
1. Amealco de Bonfil	Dinámico	X	X	4	1	11001	252	38.9%	25.2%
	Estático	X		2		11001		38.9%	
2. Arroyo Seco	Dinámico	X	X	2	1	1850	1000	30.8%	10%
	Estático	X	X	4	6	11001	55501	38.9%	67.1%
3. Cadereyta	Dinámico	X	X	1	4	34	11374	3.4%	40.3%
	Estático	X		4		11001		38.9%	
4. Colón	Dinámico	X	X	2	1	1001	1000	16.7%	100%
	Estático	X	X	2	7	4692	82751	78.2%	75.2%
5. Corregidora	Dinámico	X	X	3	1	6001	774	54.6%	77.4%
	Estático	X		4		11001		38.9%	
6. El Marqués	Dinámico	X	X	2	1	2434	915	40.6%	91.5%
	Estático	X		4		11072		39.2%	
7. Ezequiel Montes	Dinámico								
	Estático	X		4		11001		38.9%	
8. Huimilpan	Dinámico	X	X	3	4	6001	11001	54.6%	38.9%
	Estático	X	X	4	3	11001	6322	38.9%	57.5%
9. Jalpan de Serra	Dinámico		X		5		28251		50.9%
	Estático	X	X	4	4	11001	11936	38.9%	42.3%
10. Landa de Matamoros	Dinámico		X		1		137		13.7%
	Estático	X		2		4565		76.1%	
11. Pedro Escobedo	Dinámico	X	X	4	5	11001	28251	38.9%	50.9%
	Estático	X	X	4	2	13442	6000	47.6%	100%
12. Peñamiller	Dinámico	X	X	5	1	28251	46	50.9%	4.6%
	Estático	X		4		11001		38.9%	
13. Pinal de Amoles	Dinámico	X		3		6001		54.6%	
	Estático	X		1		36		3.6%	
14. Querétaro	Dinámico	X	X	1	2	105	1001	10.5%	16.7%
	Estático								
15. San Joaquín	Dinámico		X		1		33		3.3%
	Estático	X	X	2	7	1001	85483	16.7%	77.7%
16. San Juan del Río	Dinámico	X		4		11001		38.9%	
	Estático	X		4		11001		38.9%	
17. Tequisquiapan	Dinámico	X	X	1	2	167	1214	16.7%	20.2%
	Estático	X	X	4	2	15039	1650	53.2%	27.5%
18. Tolimán	Dinámico	X	X	2	4	1001	11001	38.9%	16.7%
	Estático	X		4		11001		38.9%	

*NOTA: La capacidad "1" corresponde al valor de 1,000 ton/a, la "2" a 6,000 ton/a, la "3" a 11,000 ton/a, la "4" a 28,250 ton/a, la "5" a 55,500 ton/a, la "6" a 82,750 ton/a y la "7" a 110,000 ton/a.

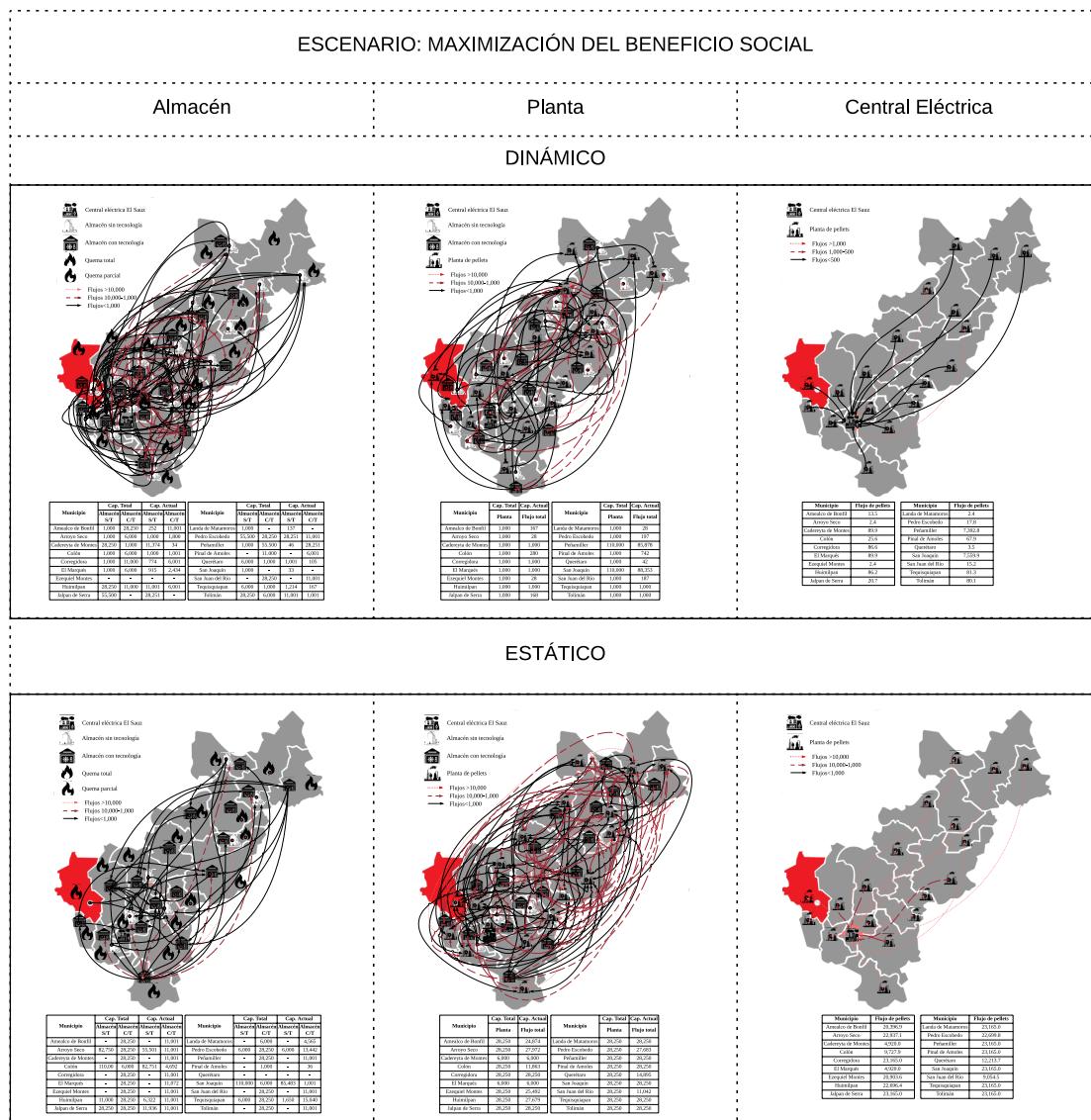


Figura 18. Comparativa de modelos en el aspecto social: Infraestructura y red logística.

En el desglose de emisiones brutas, el modelo dinámico presenta una distribución más parecida a grandes rasgos, exceptuando las emitidas por el cambio de tierra debido a que unas representan el 21.1% de las emisiones totales por la CP (dinámico), mientras que las otras sólo representan el 2.3% (estático). El transporte contribuye con apenas el 4.4% del total (4,555 toneladas), frente al 0.9% (14,701 toneladas) en el estático. La producción de pellets representa el 1.4% (1,434 toneladas) en el dinámico comparado con el 1.8% (30,792 toneladas) en el estático. El uso final de pellets, aunque menor en volumen absoluto en el dinámico (76,001 toneladas CO₂ vs 1,631,939),

muestra una intensidad de emisiones equivalente por tonelada producida (4.86 ton CO₂ por ton pellet).

La huella de carbono de la CN muestra que en el modelo dinámico se generan 3.41 millones de toneladas de CO₂, mientras el estático emite 14.5 millones, una diferencia del 76.5%. Esta brecha se explica principalmente por el uso de combustibles convencionales, que tanto en el estático como dinámico representan el 99.9% de sus emisiones totales. El transporte en la CN también varía significativamente, con el modelo estático emitiendo 12,369 toneladas contra 2,904 del dinámico, un 76.5% menores. En el ámbito de los impuestos al carbono, la CN del modelo dinámico enfrenta obligaciones fiscales por \$109.3 millones anuales, comparado con \$465.3 millones del estático, una diferencia del 76.5%.

Este análisis exhaustivo demuestra que, aunque ambos modelos se logran emisiones netas negativas gracias a la captura de carbono, el enfoque dinámico ofrece ventajas decisivas: mayor eficiencia operativa (69% menos costos logísticos), menor impacto ambiental relativo (95.3% menos emisiones por producción) y mejor desempeño financiero (76.5% menos impuestos al carbono). El modelo estático, si bien produce mayores volúmenes, lo hace a costa de una huella de carbono significativamente más amplia y una estructura de costos menos sostenible.

XVI CONCLUSIONES

En este trabajo se han desarrollado dos modelos matemáticos, uno con enfoque estático y otro con un enfoque dinámico, de la cadena de suministro destinada a la producción de pellets combustibles a partir de residuos agroindustriales en el estado de Querétaro. El modelo dinámico integra variaciones temporales derivada de aspectos como la estacionalidad de la biomasa (residuos agroindustriales) y por ende su disponibilidad además de la demandad energética fluctuante y el impacto de distintas estrategias de almacenamiento de los residuos.

Eficiencia del modelado dinámico frente a escenarios variables. La implementación de un modelo matemático dinámico, en contraste con uno estático, permitió evidenciar la importancia de considerar la estacionalidad, la variabilidad en la demanda y los cambios en la composición de la biomasa para la planificación de la cadena de suministro. El enfoque dinámico, programado en GAMS mediante modelos MILP y MINLP, ofreció resultados más robustos, resilientes y ajustados a condiciones reales, con beneficios en términos de costos operativos, reducción de emisiones y generación de valor social.

Optimización multiobjetivo: economía, sociedad y ambiente. Los resultados evidencian que la cadena de suministro óptima no debe centrarse exclusivamente en la rentabilidad económica. Las funciones objetivo-integradas permitieron identificar soluciones que, aunque no maximizan el beneficio económico, logran compromisos valiosos entre sostenibilidad ambiental y beneficio social. Esto es clave para la toma de decisiones en políticas públicas energéticas en contextos regionales como Querétaro.

El modelo dinámico permitió obtener soluciones operativas más ajustadas a la realidad. En concreto, se observó:

- ❖ Una reducción del 24.1% en el beneficio económico del sistema respecto al modelo estático.
- ❖ Una disminución del 78.3% en el impacto social, derivado de un uso más racional de los recursos y una redistribución eficiente del beneficio económico hacia los sectores de salud, educación y desarrollo estatal.
- ❖ Un leve incremento del 1.5% en las emisiones de CO₂, explicado por la menor producción de pellets (38,528 toneladas/año frente a 342,104 del modelo estático), y el uso más focalizado de rutas logísticas.

Cumpliéndose así parcialmente la hipótesis. Desde un punto de vista operativo, el modelo dinámico generó una calendarización más robusta, sensible a los cambios en la oferta y demanda, y capaz de reajustar decisiones logísticas e inversiones de infraestructura. Adicionalmente, se demostró que el control ambiental en los almacenes (tecnología de humedad y temperatura) influye considerablemente en la calidad de la biomasa y, por ende, en la eficiencia de la producción de pellets.

Frente al enfoque dinámico, el modelo estático no representa de la mejor manera el caso de estudio presentado, debido a que no considera la degradación y rendimientos reales de la materia con el paso del tiempo, llegando a reportar producciones más elevadas de pellets de lo que a la realidad podrían obtenerse, afectando así toda la cadena subsecuente al nodo de la producción de pellets, así como las variables que se aniden con este aspecto.

Importancia de la planificación flexible y escalable. La calendarización dinámica propuesta representa una herramienta eficaz para planificar sistemas energéticos alternativos, especialmente en entornos donde la disponibilidad de materia prima es incierta y la demanda fluctuante. La adaptabilidad del modelo a diferentes escalas territoriales y su capacidad para

integrar múltiples fuentes de biomasa lo convierte en una plataforma útil para otros estados o regiones con condiciones similares.

Contribución científica y potencial de replicabilidad. Esta tesis no sólo propone una solución local para la gestión energética sustentable, sino que también contribuye al campo de la ingeniería de procesos, la optimización de cadenas de suministro y el desarrollo de bioenergía. Los métodos empleados, la codificación en GAMS y el diseño multiobjetivo pueden ser adaptados para otras aplicaciones dentro del aprovechamiento de residuos, incluyendo biogás, biofertilizantes o cogeneración energética.

XVII ÁREAS DE OPORTUNIDAD O TRABAJO FUTURO

Comparación con otras opciones de bioenergéticos: El análisis se enfocó en los pellets combustibles; sin embargo, se podrían implementar otros tipos de biocombustibles, ya sean en otro estado de materia como el bioetanol, biodiesel, bioturbosina o como el biogás o biohidrógeno. Esto podría permitir nuevas perspectivas sobre la sinergia entre tecnologías o el complemento dentro de una matriz energética sustentable.

Optimización de parámetros técnicos de la biomasa: Futuras investigaciones pueden incluir la simulación de los cambios fisicoquímicos en la biomasa (humedad, poder calorífico, contenido de cenizas, etc.) bajo las mismas condiciones de almacenamiento u otras, así como de transporte.

Vinculación con políticas públicas y normativas: Un área clave de oportunidad es la integración de escenarios de planeación energéticas alineados con los ODS y las regulaciones mexicanas o queretanas. Esto permitiría evaluar cómo cambios en incentivos fiscales, subsidios o penalizaciones ambientales afectan la viabilidad del modelo dinámico.

Realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Una línea de investigación relevante puede ser el complementar el modelo de optimización con un ACV completo de la cadena de suministro. Esto permitirá cuantificar de forma integral los impactos ambientales asociados a cada etapa. El ACV facilitaría la comparación objetiva con otros biocombustibles o combustibles convencionales, incorporando indicadores como acidificación, eutrofización, huella hídrica o demanda energética acumulada. De esta manera, se podría validar los beneficios ambientales del modelo aparte de las emisiones de CO₂, que son las únicas que se contemplan en este trabajo.

La combinación de estos elementos permitirá avanzar hacia cadenas de suministro bioenergéticas más robustas y con un entendimiento profundo de sus impactos multidimensionales.

XVIII REFERENCIAS

- Abdulrazik, A., Elsholkami, M., Elkamel, A., & Simon, L. (2017). Multi-products productions from Malaysian oil palm empty fruit bunch (EFB): Analyzing economic potentials from the optimal biomass supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 168, 131–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.088>
- Aboytes-Ojeda, M., Castillo-Villar, K. K., & Cardona-Valdés, Y. (2022). Bi-objective stochastic model for the design of biofuel supply chains incorporating risk. *Expert Systems with Applications*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117285>
- Abusaq, Z., Habib, M. S., Shehzad, A., Kanan, M., & Assaf, R. (2022). A Flexible Robust Possibilistic Programming Approach toward Wood Pellets Supply Chain Network Design. *Mathematics*, 10(19), 3657. <https://doi.org/10.3390/math10193657>
- Agar, D. A., Rudolfsson, M., Kalén, G., Campargue, M., Da Silva Perez, D., & Larsson, S. H. (2018). A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass. *Fuel Processing Technology*, 180, 47–55. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2018.08.006>
- Agar, D. A., Svanberg, M., Lindh, I., & Athanassiadis, D. (2020). Surplus forest biomass – The cost of utilisation through optimised logistics and fuel upgrading in northern Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 275. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123151>
- Aghalari, A., Aladwan, B. S., Marufuzzaman, M., Tanger, S., Da Silva, B. K., & Gude, V. G. (2021). Optimizing a pellet supply system: Market-specific pellet production with biomass quality considerations. *Computers and Chemical Engineering*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107417>

Ahmadi, L., Kannangara, M., & Bensebaa, F. (2020). Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100627>

Aithal, A., Singh, M. K., Ray, P., & Duraipandian, R. (2021). An Integrated Approach to understand Supply Chain Optimization through the Lens of Technology. *Shanlax International Journal of Management*, 8(S1-Feb), 167-178–167–178. <https://doi.org/10.34293/MANAGEMENT.V8IS1-FEB.3772>

Albashabsheh, N. T., & Heier Stamm, J. L. (2019). Optimization of lignocellulosic biomass-to-biofuel supply chains with mobile pelleting. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 545–562. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.12.015>

An, H., Wilhelm, W. E., & Searcy, S. W. (2011). Biofuel and petroleum-based fuel supply chain research: A literature review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3763–3774. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.06.021>

Arsham, H. (2018). *Modelos Deterministas: Optimización Lineal*. <https://home.ubalt.edu/ntsbarsh/business-stat/opre/spanishd.htm>

Badr, H., Ahmed, W., Badr, H., & Ahmed, W. (2023a). A Comprehensive Analysis of Demand Prediction Models in Supply Chain Management. *American Journal of Industrial and Business Management*, 13(12), 1353–1376. <https://doi.org/10.4236/AJIBM.2023.1312075>

Badr, H., Ahmed, W., Badr, H., & Ahmed, W. (2023b). A Comprehensive Analysis of Demand Prediction Models in Supply Chain Management. *American Journal of Industrial and Business Management*, 13(12), 1353–1376. <https://doi.org/10.4236/AJIBM.2023.1312075>

- Baghizadeh, K., Cheikhrouhou, N., Govindan, K., & Ziyarati, M. (2022). Sustainable agriculture supply chain network design considering water-energy-food nexus using queuing system: A hybrid robust possibilistic programming. *Natural Resource Modeling*, 35(1). <https://doi.org/10.1111/nrm.12337>
- Batidzirai, B., Faaij, A. P. C., & Smeets, E. (2006). Biomass and bioenergy supply from Mozambique. *Energy for Sustainable Development*, 10(1), 54–81. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60507-4](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60507-4)
- Beamon, B. M., & Chen, V. C. P. (2001). Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research*, 39(14), 3195–3218. <https://doi.org/10.1080/00207540110053156>
- Bedoya Sepulveda, V., Vélez Bolívar, M. A., Ospina Correa, J. D., & Martínez Crespo, J. (2024). *Planificación y control dinámico para la gestión de riesgos en cadenas bayesianas de suministros del sector de la construcción*. 1–11. <https://doi.org/10.26507/paper.3554>
- Boukherroub, T., LeBel, L., & Lemieux, S. (2017). An integrated wood pellet supply chain development: Selecting among feedstock sources and a range of operating scales. *Applied Energy*, 198, 385–400. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.013>
- Bui-Duy, L., Le, L. T., Vu-Thi-Minh, N., Hoang-Huong, G., Bui-Thi-Thanh, N., & Nguyen, P. N. (2023). Economic and environmental analysis of biomass pellet supply chain using simulation-based approach. *Asia Pacific Management Review*. <https://doi.org/10.1016/j.apmrv.2023.02.002>
- Burgess Clifford, C. (2014). *Why Biofuels?* <https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/643>
- Calvente, A. M. (2007). *El concepto moderno de sustentabilidad*.

- Childerhouse, P., & Towill, D. R. (2011). Arcs of supply chain integration. *International Journal of Production Research*, 49(24), 7441–7468. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.524259>
- Chong, E. K. P., & Žak, S. H. (2013). *AN INTRODUCTION TO OPTIMIZATION*. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-2699421-dcbeb18742.pdf>
- Chopra, Sunil., & Meindl, Peter. (2016). *Supply chain management : strategy, planning, and operation*. Pearson.
- Chowdhury, P., Mahi, N. A., Yeassin, R., Chowdhury, N. U. R., & Farrok, O. (2025). Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges. *Energy Conversion and Management*: X, 25, 100889. <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2025.100889>
- Coelho, F. (2019). *Sustentabilidad*. <https://www.significados.com/sustentabilidad/>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(25), 52–63. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63439013005>
- Crohn, D. M., & Valenzuela-Solano, C. (2003). Modeling Temperature Effects on Decomposition. *Journal of Environmental Engineering*, 129(12), 1149–1156. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2003\)129:12\(1149\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2003)129:12(1149))
- de Souza, H. J. P. L., Arantes, M. D. C., Vidaurre, G. B., Andrade, C. R., Carneiro, A. de C. O., de Souza, D. P. L., & Protásio, T. de P. (2020). Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. *Renewable Energy*, 149, 128–140. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.12.015>

- Demirbas, T., & Demirbas, A. H. (2010). Bioenergy, green energy, biomass and biofuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 32(12), 1067–1075. <https://doi.org/10.1080/15567030903058600>;CTYPE:STRING:JOURNAL
- Duc, D. N., Meejaroen, P., & Nananukul, N. (2021). Multi-objective models for biomass supply chain planning with economic and carbon footprint consideration. *Energy Reports*, 7, 6833–6843. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.10.071>
- Ebadian, M. (2003). *DESIGN AND SCHEDULING OF AGRICULTURAL BIOMASS SUPPLY CHAIN FOR A CELLULOSIC ETHANOL PLANT*.
- EGUCHI, T., OBA, F., KOZAKI, S., & MURAYAMA, T. (2006). Dynamic Scheduling with Processing Time Uncertainty Using the Mixture of Periodic Optimization and Real-time Scheduling. *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS Series C*, 72(717), 1630–1637. <https://doi.org/10.1299/kikaic.72.1630>
- Emenike, S. N., & Falcone, G. (2020). A review on energy supply chain resilience through optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110088. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110088>
- Enyinda, I. E., Ogbuehi, A., & Awoala Briggs, C. (2008, January). *Global Supply Chain Risks Management: A New Battleground for Gaining Competitive Advantage*. https://www.researchgate.net/publication/228349231_Global_Supply_Chain_Risks_Management_A_New_Battleground_for_Gaining_Competitive_Advantage
- EPA. (2024). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator | US EPA*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- ESFE. (2022, March 23). *Decreto de Presupuesto de Egresos del Estado de Querétaro para el Ejercicio Fiscal 2022 - Entidad Superior de Fiscalización*

del Estado. Entidad Superior de Fiscalización Del Estado de Querétaro.
https://esfe-qro.gob.mx/wpf_file/decreto-de-presupuesto-de-egresos-del-estado-de-queretaro-para-el-ejercicio-fiscal-2022/

Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., & Høibø, O. (2011). The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. *Biomass and Bioenergy*, 35(8), 3342–3349.
<https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2010.09.011>

Forero Nuñez, C. A., Guerrero Fajardo, C. A., & Sierra Vargas, F. E. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación. *ITECKNE*, 9(1). <https://doi.org/10.15332/ITECKNE.V9I1.57>

García Aramendiz, J. S. (2022). *Caracterización y análisis de las variables de proceso involucradas en el peletizado de residuos madereros*. Universidad de los Andes. <https://hdl.handle.net/1992/59301>

Garrido-Romero, M. (2020). *Biocombustibles y producción de biohidrógeno*.

Gassen, G., Graciolli, O. D., Chiwiacowsky, L. D., & Mesquita, A. (2019). Proposta de um modelo de programação linear para otimização do planejamento agregado de produção de brocas para empresa multinacional. *Revista Produção Online*, 19(1), 21–43.
<https://doi.org/10.14488/1676-1901.v19i1.3013>

GEP. (2021). *Supply Chain Collaboration: Meaning, Features, Importance & Impact | GEP Blog*. <https://www.gep.com/blog/technology/complete-guide-to-supply-chain-collaboration-what-why-and-how>

Gobierno de México. (2025, June). *Electricity*.

González, Z., Feria, M. J., Vargas, F., & Rodríguez, A. (2012). Comparison of the Heating Values of Various Types of Fuel from Non-Wood Raw

- Materials. *American Journal of Environmental Engineering*, 2(4), 91–96. <https://doi.org/10.5923/J.AJEE.20120204.04>
- GREET. (2023). *GREET: The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model* | Department of Energy.
- Guo, X., Voogt, J., Annevelink, B., Snels, J., & Kanellopoulos, A. (2020). Optimizing resource utilization in biomass supply chains by creating integrated biomass logistics centers. *Energies*, 13(22). <https://doi.org/10.3390/en13226153>
- Guo, Y., Liu, F., Song, J. S., & Wang, S. (2025). Supply chain resilience: A review from the inventory management perspective. *Fundamental Research*, 5(2), 450–463. <https://doi.org/10.1016/J.FMRE.2024.08.002>
- Gupta, A., & Maranas, C. D. (2003). Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8–9), 1219–1227. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00048-6)
- Gutiérrez Núñez, N. L. (2023). Agricultura forrajera y geografía lechera en México. Itinerarios e imponderables de la revolución verde en el Estado de México, 1936-1970. *Quinto Sol*, 27(3). <https://doi.org/10.19137/QS.V27I3.7500>
- Hernandez De Lira, I. O., Montañez, L. E., López Villanueva, A., Rodríguez-Martínez, A., Gadi, S. K., & Balagurusamy, N. (2017). Avances, Retos y perspectivas de Bioenergía en México. *SERIEPONENCIAS*, 69. https://www.researchgate.net/publication/322700530_Avances_Retos_y_perspectivas_de_Bioenergia_en_Mexico
- Hernández-Neri, N., Gutiérrez-Antonio, C., García-Trejo, J. F., Feregrino-Pérez, A. A., & Toledano-Ayala, M. (2022). Valorisation of rice husks and bean straws through fuel pellets production: An experimental and modelling approach. *Revista Mexicana de Ingeniera Química*, 21(2). <https://doi.org/10.24275/RMIQ/ALIM2679>

- Huang, Y., Chen, C. W., & Fan, Y. (2010). Multistage optimization of the supply chains of biofuels. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 820–830.
<https://doi.org/10.1016/J.TRE.2010.03.002>
- Hughes, N. M., Shahi, C., & Pulkki, R. (2014). A Review of the Wood Pellet Value Chain, Modern Value/Supply Chain Management Approaches, and Value/Supply Chain Models. *Journal of Renewable Energy*, 2014, 1–14.
<https://doi.org/10.1155/2014/654158>
- Ikhwana, A. (2018). Supply chain management of coffee commodities. *MATEC Web of Conferences*, 197, 14003.
<https://doi.org/10.1051/MATEC201819714003>
- INEGI. (2020, July 19). *Censos Económicos 2019*.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/>
- INEGI. (2022). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021*.
<https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/>
- Ishii, K., Furuichi, T., Fujiyama, A., & Watanabe, S. (2016). Logistics cost analysis of rice straw pellets for feasible production capacity and spatial scale in heat utilization systems: A case study in Nanporo town, Hokkaido, Japan. *Biomass and Bioenergy*, 94, 155–166.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.007>
- ISO. (2021a). *17225-1 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 1: General requirements*.
- ISO. (2021b). *17225-2 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets*.
- ISO. (2021c). *17225-6 Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Part 6: Graded non-woody pellets*.

- Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904–2915. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1750727>
- Ivanov, D., & Sokolov, B. (2012). Dynamic supply chain scheduling. *Journal of Scheduling*, 15(2), 201–216. <https://doi.org/10.1007/s10951-010-0189-6>
- Iyer-Raniga, U. (2019). Using the ReSOLVE framework for circularity in the building and construction industry in emerging markets. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 294(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/294/1/012002>
- Jolalpa Barrera, J. L., Espinosa García, J. A., Cuevas Reyes, V., Moctezuma López, G., & Romero Santnillán, F. (2009). NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN EN LA CADENA PRODUCTIVA DE ALFALFA EN EL ESTADO DE HIDALGO. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 25, 104–115. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14118560011>
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2008.08.005>
- Kalyan T. Talluri, & Garrett J. van Ryzin. (2006). *The Theory and Practice of Revenue Management* (Springer Science & Business Media, Ed.; ilustrada, Vol. 68).
- Kontuš, E., Šorić, K., Šarlija, N., Kontu, E., Sori, K., & Sa Sarlija, N. (2023). Capital structure optimization: a model of optimal capital structure from the aspect of capital cost and corporate value. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*, 36(2). <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2147565>

- Koopialipoor, M., Noorbakhsh, A., Koopialipoor, M., & Noorbakhsh, A. (2020). Applications of Artificial Intelligence Techniques in Optimizing Drilling. *Emerging Trends in Mechatronics.* <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.85398>
- Kunak. (2025). *Contaminación del aire en vertedero.* <https://kunakair.com/es/contaminacion-del-aire-en-vertederos/>
- Kuranc, A., Stoma, M., Rydzak, L., & Pilipiuk, M. (2020). Durability Assessment of Wooden Pellets in Relation with Vibrations Occurring in a Logistic Process of the Final Product. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 5890, 13(22), 5890. <https://doi.org/10.3390/EN13225890>
- Larson, P. D. (2001). Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies, David Simchi-Levi Philip Kaminsky Edith Simchi-Levi. *Journal of Business Logistics*, 22(1), 259–261. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00165.x>
- León-Olivares, E., Minor-Popocatl, H., Aguilar-Mejía, O., & Sánchez-Partida, D. (2020). Optimization of the Supply Chain in the Production of Ethanol from Agricultural Biomass Using Mixed-Integer Linear Programming (MILP): A Case Study. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2020/6029507>
- Lun, Y. H. V., Quaddus, M., Naim, M., & Disney, S. (2016). Special issue on “innovative service and manufacturing design.” *International Journal of Production Economics*, 171, 163–164. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2015.11.010>
- Malik, K., Capareda, S. C., Kamboj, B. R., Malik, S., Singh, K., Arya, S., & Bishnoi, D. K. (2024). Biofuels Production: A Review on Sustainable Alternatives to Traditional Fuels and Energy Sources. *Fuels* 2024, Vol. 5, Pages 157-175, 5(2), 157–175. <https://doi.org/10.3390/FUELS5020010>

- Mansuy, N., Thiffault, E., Lemieux, S., Manka, F., Paré, D., & Lebel, L. (2015). Sustainable biomass supply chains from salvage logging of fire-killed stands: A case study for wood pellet production in eastern Canada. *Applied Energy*, 154, 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.048>
- Martínez-Guido, S. I., Bernabé-Martínez, R., Gutiérrez-Antonio, C., & Hernández, S. (2023). Supply chain optimal planning for revalorization of empty plastic pesticide and fertilizer containers. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 52, pp. 3301–3306). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50526-6>
- Martínez-Guido, S. I., García-Trejo, J. F., Gutiérrez-Antonio, C., Domínguez-González, A., Gómez-Castro, F. I., & Ponce-Ortega, J. M. (2021). The integration of pelletized agricultural residues into electricity grid: Perspectives from the human, environmental and economic aspects. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128932>
- Martínez-Guido, S. I., Ríos-Badrán, I. M., Gutiérrez-Antonio, C., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy*, 130, 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.084>
- Masiriz, S., & Stornelli, J. (2024). *MEXICAN ELECTRICITY MARKET OPERATION YEAR 2023 AND 1H 2024*.
- MÉXICO2. (2024). *NOTA TÉCNICA Impuesto al Carbono en Querétaro*.
- Mobini, M., Sowlati, T., & Sokhansanj, S. (2013). A simulation model for the design and analysis of wood pellet supply chains. *Applied Energy*, 111, 1239–1249. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.026>
- Mohammed, N. I., Kabbashi, N., Abass Alade, Mohammed, N. I., Kabbashi, N., & Abass Alade. (2018). Significance of Agricultural Residues in

Sustainable Biofuel Development. *Agricultural Waste and Residues*.
<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.78374>

Monroy Garduño, L. F., Andrade Gómez, M. A., Estrada Ortiz, P., Baeza López, B. I., Téllez Ojeda, E., Moreno Hernández, R., Gutiérrez Antonio, C., & Martínez Guido, S. I. (2023). REVALORIZACIÓN SUSTENTABLE DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES DE LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE. *Perspectivas de La Ciencia y La Tecnología* |, 4, 63–82.

Montgomery, T. D., Han, H. S., & Kizha, A. R. (2016). Modeling work plan logistics for centralized biomass recovery operations in mountainous terrain. *Biomass and Bioenergy*, 85, 262–270.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.023>

Navarro-Puyuelo, A., Reyero, I., Moral, A., Bimbela, F., & Gandía, L. M. (2017). Rutas y retos para la valorización de biogás Routes and challenges for biogas valorization. *Avances En Investigación En Ingeniería*, 14(1)(1), 211–224. [https://doi.org/https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1299](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1299)

Ng, R. T. L., & Maravelias, C. T. (2017). Design of biofuel supply chains with variable regional depot and biorefinery locations. *Renewable Energy*, 100, 90–102. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2016.05.009>

Niu, Y., Tan, H., & Hui, S. (2016). Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Progress in Energy and Combustion Science*, 52, 1–61.
<https://doi.org/10.1016/J.PECS.2015.09.003>

Padilla-Rivera, A., Morales Brizard, M., Merveille, N., & Güereca-Hernandez, L. P. (2024). Barriers, Challenges, and Opportunities in the Adoption of the Circular Economy in Mexico: An Analysis through Social Perception. *Recycling*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/recycling9050071>

PAOT. (2012). Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos. *Procuraduría Ambiental y Del Ordenamiento Territorial*. http://centro.paot.org.mx/documentos/sagarpa/est_intersecretarial_bioenergeticos.pdf

Pegoretti Leite de Souza, H. J., Muñoz, F., Mendonça, R. T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., de Souza, D. P. L., de Paula Protásio, T., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2021). Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. *Renewable Energy*, 163, 1802–1816. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.10.065>

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (E. D. Glandt, M. T. Klein, & T. F. Edgar, Eds.; 5th ed.). McGraw-Hill. https://elbunkerdequimica.wordpress.com/wp-content/uploads/2020/09/plant-design-and-economics-for-chemical-engineers-by-max-peters-klaus-timmerhaus-ronald-west-max-peters-z-lib.org_.pdf

Petropoulos, F., Apiletti, D., Assimakopoulos, V., Babai, M. Z., Barrow, D. K., Ben Taieb, S., Bergmeir, C., Bessa, R. J., Bijak, J., Boylan, J. E., Browell, J., Carnevale, C., Castle, J. L., Cirillo, P., Clements, M. P., Cordeiro, C., Cyrino Oliveira, F. L., De Baets, S., Dokumentov, A., ... Ziel, F. (2022). Forecasting: theory and practice. *International Journal of Forecasting*, 38(3), 705–871. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.001>

Pinatti, D. G., Conte, R. A., Soares, Á. G., Pereira, M. L. G., Romão, É. L., Ferreira, J. C., Oliveira, I., & Marton, L. F. M. (2010). Biomass refinery as a renewable complement to the petroleum refinery. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8(1). <https://doi.org/10.2202/1542-6580.1928/MACHINEREADABLECITATION/RIS>

- Poudel, S. R., Marufuzzaman, M., & Bian, L. (2016). A hybrid decomposition algorithm for designing a multi-modal transportation network under biomass supply uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 94, 1–25.
<https://doi.org/10.1016/J.TRE.2016.07.004>
- Pradhan, P., Gadkari, P., Arora, A., & Mahajani, S. M. (2019). Economic feasibility of agro waste pelletization as an energy option in rural India. *Energy Procedia*, 158, 3405–3410.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.936>
- Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2021). Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel*, 285, 119145.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2020.119145>
- Prado-Acebo, I., Cubero-Cardoso, J., Lu-Chau, T. A., & Eibes, G. (2024). Integral multi-valorization of agro-industrial wastes: A review. *Waste Management*, 183, 42–52.
<https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2024.05.001>
- Quddus, M. A., Ibne Hossain, N. U., Mohammad, M., Jaradat, R. M., & Roni, M. S. (2017). Sustainable network design for multi-purpose pellet processing depots under biomass supply uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 110, 462–483.
<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.06.001>
- Quesada, H., Gazo, R., Sanchez, S., Quesada, H., Gazo, R., & Sanchez, S. (2012). Critical Factors Affecting Supply Chain Management: A Case Study in the US Pallet Industry. *Pathways to Supply Chain Excellence*.
<https://doi.org/10.5772/33635>
- Rajput, S. P., Jadhav, S. V., & Thorat, B. N. (2020). Methods to improve properties of fuel pellets obtained from different biomass sources: Effect

of biomass blends and binders. *Fuel Processing Technology*, 199, 106255. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2019.106255>

Ramos, A., & Cerisola, S. (2016). *OPTIMIZACIÓN ESTOCÁSTICA*.

Reyes Suárez, Y., Arteaga Barrueta, M., Morejón Mesa, Y., & Fuentes Sánchez, A. (2020). Valoración del potencial energético de los residuos agroindustriales de tomate para su empleo como biocombustible. *Ingeniería Agrícola*, 10(2), e06. <https://www.redalyc.org/journal/5862/586263256006/html/#B9>

Ribo, S. (2024). *The 13R's of the circular economy: beyond the 3R's* | Revivack. <https://revivack.com/the-13-rs-of-the-circular-economy-beyond-the-3-rs/>

Ríos-Badrán, I. M., Lizardo-Ocampo, I., García-Trejo, J. F., Santos-Cruz, J., & Gutiérrez-Antonio, C. (2020). Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, 145, 500–507. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2019.06.048>

ROCA Desarrollos. (2024). *Collaborative efforts for Queretaro's industrial growth in 2024*. <https://rocadesarrollos.com/esfuerzos-colaborativos-para-el-crecimiento-industrial-de-queretaro-en-2024-i-13-marzo-2024/>

Rojas Guerra, M. (2023, July 1). *¿Qué significa optimizar y para qué sirve?* 
Diccionario SEO. <https://www.qdq.com/blog/que-significa-optimizar>

https://www.researchgate.net/publication/267927614_Residuos_Agriculturales_Caracterizacion_y_estrategias_sustentables_para_su_Aprovechamiento

- Roni, M. S., Eksioglu, S. D., Searcy, E., & Jha, K. (2014). A supply chain network design model for biomass co-firing in coal-fired power plants. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61, 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.10.007>
- Roni, M. S., Thompson, D. N., & Hartley, D. S. (2019). Distributed biomass supply chain cost optimization to evaluate multiple feedstocks for a biorefinery. *Applied Energy*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113660>
- Rossini, G., Toscano, G., Duca, D., Corinaldesi, F., Foppa Pedretti, E., & Riva, G. (2013). Analysis of the characteristics of the tomato manufacturing residues finalized to the energy recovery. *Biomass and Bioenergy*, 51, 177–182. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2013.01.018>
- Ruszczynski, A. (2011). Nonlinear optimization. *Nonlinear Optimization*, 1–448. <https://doi.org/10.2307/2007715>
- Sagastume Gutiérrez, A., Cabello Eras, J. J., Hens, L., & Vandecasteele, C. (2020). The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122317>
- Salinas-Callejas, E., & Gasca-Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, 157, 75–82. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512739009>
- Sanahuja-Parejo, O. (2022). *TESIS-2022-174*.

- Sanahuja-Parejo, O., García Martínez, T., & Callén Romero, M. S. (2022). *Estrategias de bajo coste para la producción de bio-aceites derivados de la pirólisis de biomasa lignocelulósica*. INSTITUTO DE CARBOQUÍMICA.
- Sánchez-García, S., Athanassiadis, D., Martínez-Alonso, C., Tolosana, E., Majada, J., & Canga, E. (2017). A GIS methodology for optimal location of a wood-fired power plant: Quantification of available woodfuel, supply chain costs and GHG emissions. *Journal of Cleaner Production*, 157, 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.058>
- Santinelli Ramos, M. Á. (2020). *México busca establecer la economía circular como una estrategia del gobierno federal con la ley general de economía circular* | Facultad de Responsabilidad Social. <https://www.anahuac.mx/mexico/EscuelasyFacultades/responsabilidadsocial/noticias/mexico-busca-establecer-la-economia-circular-como-una-estrategia-del-gobierno-federal-con>
- SAT. (2024). *Tarifas aplicables a pagos provisionales, retenciones y cálculo del ISR*. http://omawww.sat.gob.mx/normatividad_RMF_RGCE/Paginas/documentos2025/rmf/anexos/Anexo8_RMF2025-30122024.pdf
- Secretaría de Desarrollo Sustentable. (2023). *Anuario Económico-Querétaro Competitivo*.
- Secretaría de economía. (2024). *Querétaro: Entidad Federativa*. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/queretaro-qt?redirect=true>
- Selkimäki, M., Mola-Yudego, B., Röser, D., Prinz, R., & Sikanen, L. (2010). Present and future trends in pellet markets, raw materials, and supply logistics in Sweden and Finland. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.009>

SENER. (2023). *LISTA DE COMBUSTIBLES Y SUS PODERES CALORÍFICOS 2023 QUE SE CONSIDERARÁN PARA IDENTIFICAR A LOS USUARIOS CON UN PATRÓN DE ALTO CONSUMO, ASÍ COMO LOS FACTORES PARA DETERMINAR LAS EQUIVALENCIAS EN TÉRMINOS DE BARRILES EQUIVALENTES DE PETRÓLEO*. Secretaría de Energía.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/809207/lista_combustibles_y_sus_poderes_calorificos_2023.pdf

SENER. (2024). *P R O D E S E N 2 0 2 4 - 3 8 c a p 3*.
<https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2024/prodesen24-38cap3.PDF>

Seyedan, M., & Mafakheri, F. (2020). Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting: methods, applications, and research opportunities. *Journal of Big Data* 2020 7:1, 7(1), 1–22.
<https://doi.org/10.1186/S40537-020-00329-2>

SIAP. (2023). *Producción Agrícola*.

SIAP. (2024). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.
<https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

SIAP. (2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.
https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Silva-Hernández, C. A., Gutiérrez-Antonio, C., García-Trejo, J. F., & Feregrino-Pérez, A. A. (2020). *Revalorización de residuos agrícolas para la producción de pellets combustibles en el estado de Querétaro*. 13(1), 36–45. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/42/50>

Smidt, E., & Lechner, P. (2005). Study on the degradation and stabilization of organic matter in waste by means of thermal analyses. *Thermochimica Acta*, 438(1–2), 22–28. <https://doi.org/10.1016/J.TCA.2005.08.013>

Soltero, V. M., Román, L., Peralta, M. E., & Chacartegui, R. (2020). Sustainable biomass pellets using trunk wood from olive groves at the end of their life cycle. *Energy Reports*, 6, 2627–2640. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.017>

Stengel, R. F., & Mathematics. (1994). *Optimal control and estimation*. 639. <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB03635655>

Sydle. (2024, December 11). *Complejidad de la cadena de suministro: estrategias de gestión*. Blog SYDLE. <https://www.sydle.com/es/blog/complejidad-de-la-cadena-de-suministro-66bba9f41aab7d13a1051a80>

Tang, C., & Tomlin, B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.07.008>

Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M., & Masera, O. (2018). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 380–389. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.09.036>

Tauro, R., Santibañez-Aguilar, J. E., Rangel Heras, R., Álvarez Galán, O. A., Caballero, J. L., Odenthal, J., Arroyo, J. M., Velázquez Martí, B., & Ghilardi, A. (2022). Optimización de costos de transporte para el aprovechamiento energético de la biomasa. *Revista Geográfica*, 165, 11–29. <https://doi.org/10.35424/REGEO.165.2022.1126>

Tembo, G., Epplin, F. M., & Huhnke, R. (2003). Integrative Investment Appraisal of a Lignocellulosic Biomass-to-Ethanol Industry. *Western Journal of Agricultural Economics*, 28 (3), 611–633. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.31070>

- Thek, G., & Obernberger, I. (2012). The Pellet Handbook : The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets. *The Pellet Handbook*. <https://doi.org/10.4324/9781849775328>
- Trejo-Zamudio, D., García Trejo, J. F., & Gutiérrez-Antonio, C. (2019). Conversión de residuos a biocombustibles. *Ciencia*, 70, 64–71. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/70_1/PDF/ResiduosBiocombustibles.pdf
- Tzafestas, S. G. (1980). Distributed-parameter optimal control via mathematical programming. *Journal of the Franklin Institute*, 309(6), 399–438. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(80\)90093-9](https://doi.org/10.1016/0016-0032(80)90093-9)
- Uslu, A., Faaij, A. P. C., & Bergman, P. C. A. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206–1223. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2008.03.007>
- Viles, E., Santos, J., Arévalo, T. F., Tanco, M., & Kalemkerian, F. (2020). A New Mindset for Circular Economy Strategies: Case Studies of Circularity in the Use of Water. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 9781*, 12(22), 9781. <https://doi.org/10.3390/SU12229781>
- Vitale, I., Dondo, R. G., González, M., & Cóccola, M. E. (2022). Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. *Applied Energy*, 313. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118776>
- Wang, Y., Wang, J., Schuler, J., Hartley, D., Volk, T., & Eisenbies, M. (2020). Optimization of harvest and logistics for multiple lignocellulosic biomass feedstocks in the northeastern United States. *Energy*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117260>
- Windisch, J., Väätäinen, K., Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J., Asikainen, A., & Sikanen, L. (2015). Discrete-event simulation of an information-based raw

- material allocation process for increasing the efficiency of an energy wood supply chain. *Applied Energy*, 149, 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.122>
- Wu, J., Zhang, J., Yi, W., Cai, H., Li, Y., & Su, Z. (2022). Agri-biomass supply chain optimization in north China: Model development and application. *Energy*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122374>
- Xie, F., & Huang, Y. (2018). A multistage stochastic programming model for a multi-period strategic expansion of biofuel supply chain under evolving uncertainties. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 111, 130–148. <https://doi.org/10.1016/J.TRE.2018.01.015>
- You, F., Tao, L., Graziano, D. J., & Snyder, S. W. (2012). Optimal design of sustainable cellulosic biofuel supply chains: Multiobjective optimization coupled with life cycle assessment and input–output analysis. *AIChE Journal*, 58(4), 1157–1180. <https://doi.org/10.1002/AIC.12637>
- Yun, H., Clift, R., & Bi, X. (2020a). Environmental and economic assessment of torrefied wood pellets from British Columbia. *Energy Conversion and Management*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112513>
- Yun, H., Clift, R., & Bi, X. (2020b). Process simulation, techno-economic evaluation and market analysis of supply chains for torrefied wood pellets from British Columbia: Impacts of plant configuration and distance to market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109745>
- Zahraee, S. M., Golroudbary, S. R., Shiwakoti, N., Stasinopoulos, P., & Kraslawski, A. (2021). Economic and environmental assessment of biomass supply chain for design of transportation modes: Strategic and tactical decisions point of view. *Procedia CIRP*, 100, 780–785. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.044>

Zawiślak, K., Sobczak, P., Kraszkiewicz, A., Niedziółka, I., Parafiniuk, S., Kuna-Broniowska, I., Tanaś, W., Żukiewicz-Sobczak, W., & Obidziński, S. (2020). The use of lignocellulosic waste in the production of pellets for energy purposes. *Renewable Energy*, 145, 997–1003. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.051>

Zhang, Q., Shah, N., Wassick, J., Helling, R., & Van Egerschot, P. (2014). Sustainable supply chain optimisation: An industrial case study. *Computers & Industrial Engineering*, 74(1), 68–83. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2014.05.002>

Zhu, H. (2024). *Equilibrium Scheduling of Dynamic Supply Chain Network Resources Under Carbon Tax Policy* (pp. 393–407). https://doi.org/10.1007/978-3-031-50549-2_27

XIX ANEXOS

XIX.I ANEXO 1: CÁLCULO DE COSTOS PARA LA INFRAESTRUCTURA

El cálculo de los costos fijos y variables fue realizado de acuerdo con la metodología de porcentaje del costo del equipo entregado (Percentage of delivered-equipment cost) tomado de Peters et al. (2003) en el cual se estima el capital de inversión con base al costo del equipo. El capital de trabajo se calcula como un porcentaje del capital total de inversión. La siguiente ecuación describe este método:

$$C_n = \sum (E + f_1 E + f_2 E + f_3 E + \dots + f_n E) = \sum E (1 + f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n) \quad (70)$$

Donde $f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ son los factores para la tubería, sistemas eléctricos, instrumentación, costos indirectos, etc. Las Tablas de cada uno de los factores se muestran a continuación.

Tabla 48. Tabla de Factores de relación para estimar los elementos de inversión de capital en función del costo del equipo entregado.

	TIPOS DE PLANTAS		
	SÓLIDOS	FLUIDOS + SÓLIDOS	FLUIDOS
COSTOS DIRECTOS			
Equipo +envío (incluye bombas y compresores)	1	1	1
Instalación de equipo	0.45	0.39	0.47
Instrumentación y controles (instalación)	0.18	0.26	0.36
Tubería (instalada)	0.16	0.31	0.68
Aislamientos	0.08	0.085	0.09
Sistemas Eléctricos (instalada)	0.1	0.1	0.11
Edificios (incluyendo servicios)	0.25	0.29	0.18
Mejoras del sitio	0.15	0.12	0.1
Servicios Auxiliares (instalados)	0.4	0.55	0.7
Terreno	0.06	0.06	0.06
TOTAL	2.830	3.165	3.750
COSTOS INDIRECTOS			
Ingeniería y supervisión	0.33	0.32	0.33
Gastos de construcción	0.39	0.34	0.41

Cuestiones legales	0.04	0.04	0.04
Honorarios de contratistas (alrededor del 5% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.180	0.193	0.227
Contingencias (alrededor del 10% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.359	0.387	0.453
TOTAL	1.299	1.280	1.460
Capital fijo de inversión	4.129	4.445	5.210
Capital de trabajo (cerca del 15% del capital total de inversión)	0.729	0.784	0.919
TOTAL	4.857	5.229	6.129

El capital de trabajo es usualmente el 15% del capital total de inversión (aproximadamente el 18% del capital fijo) excepto cuando se trata de plantas que producen bienes de temporada donde el porcentaje se incrementa hasta 50% por la elevada cantidad de inventarios que deben mantenerse durante largos períodos.

La estimación por porcentaje del costo del equipo entregado se utiliza comúnmente para estimaciones preliminares y de estudio. Se produce resultados más precisos cuando se aplica a proyectos similares en configuración a plantas construidas recientemente. Para plantas comparables de diferente capacidad, a veces se ha informado que este método produce estimaciones precisas.

Dado que la planta es de tipo sólida, se considerarán los factores de la primera columna.

Para el almacén se trabaja bajo dos consideraciones, en el primer escenario se contará con la renta del terreno para el almacén con dimensiones de 1200 m² x 9 m por el precio de 90,000 MXN (\$ 54,000 USD) y como equipo únicamente se tendrá una retroexcavadora modelo Mecalac TLB830 4x4 con precio de 1,695,000 MXN (\$84,750 USD), la cual puede mover por garra 7.215 kg, reduciendo de esta manera la **Tabla 49** a la mostrada a continuación.

Tabla 49. Tabla de Factores: almacén sin tecnología.

	<u>TIPOS DE PLANTAS</u>
	<u>SÓLIDOS</u>
COSTOS DIRECTOS	
Equipo +envío	1
Instalación de equipo	0
Instrumentación y controles	0
Tubería	0
Aislamientos	0
Sistemas Eléctricos	0
Edificios	0.25
Mejoras del sitio	0.15
Servicios Auxiliares	0.4
Terreno	0.06
TOTAL	1.860
COSTOS INDIRECTOS	
Ingeniería y supervisión	0.33
Gastos de construcción	0.39
Cuestiones legales	0.04
Honorarios de contratistas (alrededor del 5% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.131
Contingencias (alrededor del 10% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.262
TOTAL	1.153
Capital fijo de inversión	3.013
Capital de trabajo (cerca del 15% del capital total de inversión)	0.532
TOTAL	3.545

Ahora bien, se considera la densidad de residuos como de 0.275 ton/m³ (obtenida del promedio de las referencias Reyes Suárez et al., (2020) y Rojas-León et al., (2014)). La planta en su totalidad podría contener 2,970 ton de residuos, siendo ésta la capacidad base de la planta. Al hacer uso de los valores obtenidos en la **Tabla 48**, los datos para esta planta se muestran en la **Tabla 50**.

Tabla 50. Factores totales para almacén sin tecnología.

COSTOS DIRECTOS	1.860	CD	\$ 157,635.00
COSTOS INDIRECTOS	1.153	CI	\$ 97,716.75
CFI	3.013	CFI	\$ 255,351.75
Capital de trabajo	0.532	Ctrabajo	\$ 45,062.07
COSTO TOTAL			
INVERSIÓN	3.545	CTI	\$ 300,413.82

Considerando así el monto de los CV de \$202,697 USD y los CF de \$151,716.8 USD con un capital total de \$354,413.8. Ahora bien, considerando una financiación total del proyecto bioenergético ante el gobierno se contempla una tasa de interés del 15% en un periodo de 7 años. Quedando el siguiente flujo de efectivo:

Tabla 51. Flujo de efectivo de almacén sin tecnología.

Capital Propio	\$	-	
Préstamo	\$	151,716.8	$i^* = 15\%$
Capital Total	\$	151,716.8	$n = 7$

Año	Sdo. Capital	Pago Capital	P. Intereses	Monto de pago	Plazo	Sdo. Capital	Pago No.
1	\$ 51,716.8	\$ 13,836.7	\$ 22,302.4	\$ 36,139.1	360	\$ 137,880.0	1
2	\$ 137,880.0	\$ 15,870.7	\$ 20,268.4	\$ 36,139.1	360	\$ 122,009.3	2
3	\$ 122,009.3	\$ 18,203.7	\$ 17,935.4	\$ 36,139.1	360	\$ 103,805.6	3
4	\$ 103,805.6	\$ 20,879.7	\$ 15,259.4	\$ 36,139.1	360	\$ 82,925.9	4
5	\$ 82,925.9	\$ 23,949.0	\$ 12,190.1	\$ 36,139.1	360	\$ 58,977.0	5
6	\$ 58,977.0	\$ 27,469.5	\$ 8,669.6	\$ 36,139.1	360	\$ 31,507.5	6
7	\$ 31,507.5	\$ 31,507.5	\$ 4,631.6	\$ 36,139.1	360	\$ 0.0	7

Dando un monto final de CF y CV \$36,139.08 y \$202,697.07, respectivamente.

Ahora bien, en tanto el escenario dos se seguirán teniendo las consideraciones del terreno y retroexcavadora del escenario uno sumado al equipamiento de equipos que ayuden con el control de temperatura y humedad, los equipos considerados son los siguientes:

1. Deshumidificadores Industriales: Ebac Industrial CD100: Para mantener niveles de humedad controlados en el almacén, es fundamental contar con deshumidificadores que permitan reducir la humedad relativa y evitar problemas como la proliferación de moho y la degradación de los residuos agroindustriales. El modelo Ebac Industrial CD100 ofrece una gran capacidad de deshumidificación y es conocido por su durabilidad en ambientes industriales, lo que asegura un rendimiento óptimo y una larga vida útil del equipo. Su capacidad de procesamiento es adecuada para el volumen del almacén, y al instalar dos unidades, se asegura una cobertura completa y eficiente del espacio.

2. Sistemas de Ventilación: Big Ass Fans Powerfoil X3.0: La ventilación adecuada es crucial para garantizar la circulación constante de aire y prevenir la acumulación de humedad en espacios confinados. Los ventiladores Big Ass Fans Powerfoil X3.0 ofrecen una alta capacidad de movimiento de aire, cubriendo grandes superficies con una baja necesidad de mantenimiento. La instalación de dos unidades permite controlar la circulación en todo el almacén, reduciendo así los puntos de humedad y mejorando el ambiente general del almacenamiento.

3. Aire Acondicionado Industrial: Daikin Ducted Rooftop Packaged Unit: Para regular la temperatura, se ha seleccionado el Daikin Ducted Rooftop Packaged Unit, que cuenta con una gran capacidad de enfriamiento y eficiencia energética. Este modelo es adecuado para entornos industriales debido a su diseño compacto, fácil instalación en el techo, y su capacidad para cubrir grandes áreas. Su capacidad de 60,000 BTU permite mantener el almacén a una temperatura constante, protegiendo los residuos de cambios bruscos de temperatura que pudieran acelerar su degradación. La instalación de una unidad es suficiente para alcanzar y mantener la temperatura óptima del almacén.

4. Sistema de Monitoreo Ambiental: Vaisala Indigo 520: Para garantizar un control preciso de la humedad y temperatura en todo el almacén, se ha seleccionado el Vaisala Indigo 520, que permite la conexión de hasta dos sondas por unidad, ofreciendo flexibilidad y capacidad para medir diferentes parámetros ambientales de forma simultánea. Con cinco unidades distribuidas estratégicamente, se asegura un monitoreo en tiempo real y en puntos críticos del almacén, permitiendo un seguimiento y ajuste inmediato en caso de cambios en las condiciones ambientales. Su durabilidad, precisión y capacidad de integración con sistemas de monitoreo centralizados lo convierten en una solución robusta para ambientes industriales.

5. Absorbedores de Humedad Industrial: Desecantes Absorpole: Como medida adicional de control de humedad, se utilizan Absorpole Desecantes, que ayudan a captar picos de humedad y proporcionan una capa extra de protección contra la acumulación de humedad en el almacén. Con diez unidades distribuidas

en puntos estratégicos, se minimizan los riesgos de condensación y se mantienen las condiciones ideales para el almacenamiento de los residuos agroindustriales. Los costos totales de los equipos se desglosan en la **Tabla 52**:

Tabla 52. Desglose de costos por equipos de almacén con tecnología.

CANT.	DATOS		TOTAL
1	Retroexcavadora	MXN 1,695,000.00	
1		\$ 84,750.00	\$ 84,750.00
Equipo de control (T y Humedad)			
2	Deshumidificador Ind	\$ 4,106.39	\$ 8,212.78
2	Sist. Ventilación Ind. ESENCE	\$ 5,938.00	\$ 11,876.00
1	Aire acondicionado Ind.	MXN 161,991.76	
		\$ 8,099.59	\$ 8,099.59
5	Sist. Monitoreo Amb.	\$ 2,061.00	\$ 10,305.00
2	Absorbedores de Humedad Ind.	MXN 5,060	
		\$ 253.00	\$ 506.00
	Subtotal Sist. T y H		\$ 38,999.37
	TOTAL		\$ 123,749.37

Por todos estos equipos, la **Tabla 48** para este escenario quedaría desglosada como se muestra en la **Tabla 53**.

Tabla 53. Tabla de Factores: almacén sin tecnología.

TIPOS DE PLANTAS	
SÓLIDOS	
COSTOS DIRECTOS	
Equipo + envío	1
Instalación de equipo	0.45
Instrumentación y controles	0.18
Tubería	0.16
Aislamientos	0.08
Sistemas Eléctricos	0.1
Edificios	0.25
Mejoras del sitio	0.15
Servicios Auxiliares	0.4
Terreno	0.06
TOTAL	2.830
COSTOS INDIRECTOS	
Ingeniería y supervisión	0.33

Gastos de construcción	0.39
Cuestiones legales	0.04
Honorarios de contratistas (alrededor del 5% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.180
Contingencias (alrededor del 10% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.359
TOTAL	1.299
Capital fijo de inversión	4.129
Capital de trabajo (cerca del 15% del capital total de inversión)	0.729
TOTAL	4.857

Al hacer uso de los valores obtenidos en la **Tabla 53**, los datos para esta planta se muestran en la **Tabla 54**.

Tabla 54. Factores totales para almacén sin tecnología.

COSTOS DIRECTOS	2.830	CD	\$ 350,210.71
COSTOS INDIRECTOS	1.299	CI	\$ 160,688.55
CFI	4.129	CFI	\$ 510,899.27
Capital de trabajo	0.729	CT	\$ 90,158.69
CAPITAL TOTAL INVERSIÓN	4.857	CTI	\$ 601,057.96

Después de los cálculos hechos, los montos quedan para los CV de \$440,369.4 USD y los CF de \$214,688.6 USD con un capital total de \$655,057.9. Ahora bien, considerando una financiación total del proyecto bioenergético ante el gobierno se contempla una tasa de interés del 15% en un periodo de 7 años, se obtiene el siguiente flujo de efectivo, Tabla 55.

Tabla 55. Flujo de efectivo de almacén con tecnología.

Capital Propio	\$	-	
Préstamo	\$	214,688.6	$i^* = 15\%$
Capital Total	\$	214,688.6	$n = 7$

Año	Sdo. Capital	Pago Capital	P. Intereses	Monto de pago	Plazo	Sdo. Capital	Pago No.
1	\$ 214,688.6	\$ 19,579.8	\$ 31,559.2	\$ 51,139.0	360	\$ 195,108.7	1
2	\$ 195,108.7	\$ 2,458.0	\$ 28,681.0	\$ 51,139.0	360	\$ 172,650.7	2
3	\$ 172,650.7	\$ 25,759.4	\$ 25,379.7	\$ 51,139.0	360	\$ 146,891.3	3
4	\$ 146,891.3	\$ 29,546.0	\$ 21,593.0	\$ 51,139.0	360	\$ 117,345.3	4
5	\$ 117,345.3	\$ 33,889.3	\$ 17,249.8	\$ 51,139.0	360	\$ 83,456.0	5
6	\$ 83,456.0	\$ 8,871.0	\$ 12,268.0	\$ 51,139.0	360	\$ 44,585.0	6
7	\$ 44,585.0	\$ 44,585.0	\$ 6,554.0	\$ 51,139.0	360	\$ 0.0	7

Dando un monto final de CF y CV \$51,139.03 y \$440,369.41, respectivamente.

Para la planta de producción se consideran todos los equipos para una planta PLT2000 con un monto final por todos los equipos de € 350,900.50 (\$385,990.55, con una moneda de cambio de \$1.10/€), por lo tanto, la **Tabla 48** queda representada para este análisis como se muestra en la **Tabla 56**.

Tabla 56. Tabla de Factores: planta.

	TIPOS DE PLANTAS
	SÓLIDOS
COSTOS DIRECTOS	
Equipo +envío	1
Instalación de equipo	0.45
Instrumentación y controles	0.18
Tubería	0.16
Aislamientos	0.08
Sistemas Eléctricos	0.1
Edificios	0.25
Mejoras del sitio	0.15
Servicios Auxiliares	0.4
Terreno	0.06
TOTAL	2.830
COSTOS INDIRECTOS	
Ingeniería y supervisión	0.33
Gastos de construcción	0.39
Cuestiones legales	0.04
Honorarios de contratistas (alrededor del 5% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.180
Contingencias (alrededor del 10% de los costos directos e indirectos de la planta)	0.359
TOTAL	1.299
Capital fijo de inversión	4.129
Capital de trabajo (cerca del 15% del capital total de inversión)	0.729
TOTAL	4.857

Al hacer uso de los valores obtenidos en la **Tabla 56**, los datos para esta planta se muestran en la **Tabla 57**.

Tabla 57. Factores totales para planta.

COSTOS DIRECTOS	2.830	CD	\$ 1,092,353.26
COSTOS INDIRECTOS	1.299	CI	\$ 501,208.73
CFI	4.129	CFI	\$ 1,593,561.99
Capital de trabajo	0.729	CTrabajo	\$ 281,216.82
CAPITAL TOTAL INVERSIÓN	4.857	CTI	\$ 1,874,778.81

Después de los cálculos hechos, los montos quedan para los CV de \$1,373,570.1 USD y los CF de \$501,208.7 USD con un capital total de \$1,874,778.8. Ahora bien, considerando una financiación total del proyecto bioenergético ante el gobierno se contempla una tasa de interés del 15% en un periodo de 7 años se obtiene el siguiente flujo de efectivo, Tabla 58.

Tabla 58. Flujo de efectivo de planta de pellets.

Capital Propio	\$	-	
Préstamo	\$	501,208.7	i*= 15%
Capital Total	\$	501,208.7	n= 7

Año	Sdo. Capital	Pago Capital	P. Intereses	Monto de pago	Plazo	Sdo. Capital	Pago No.
1	\$ 501,208.7	\$ 45,710.7	\$ 73,677.7	\$ 119,388.4	360	\$ 455,498.0	1
2	\$ 455,498.0	\$ 52,430.2	\$ 66,958.2	\$ 119,388.4	360	\$ 403,067.8	2
3	\$ 403,067.8	\$ 60,137.5	\$ 59,251.0	\$ 119,388.4	360	\$ 342,930.3	3
4	\$ 342,930.3	\$ 68,977.7	\$ 50,410.8	\$ 119,388.4	360	\$ 273,952.6	4
5	\$ 273,952.6	\$ 79,117.4	\$ 40,271.0	\$ 119,388.4	360	\$ 194,835.2	5
6	\$ 194,835.2	\$ 90,747.7	\$ 28,640.8	\$ 119,388.4	360	\$ 104,087.6	6
7	\$ 104,087.6	\$ 104,087.6	\$ 15,300.9	\$ 119,388.4	360	\$ 0.0	7

XIX.II ANEXO 2: LISTA DE FACTORES EMPLEADOS

Tabla 59. *Lista de parámetros empleados.*

Factor	Valores			Unidades	Referencia	Nota
	Metodología I y II	Dinámico	Estático			
AMAX _{i,j}	Tabla X	Tabla Y		ha	SIAP 2024	Área sembrada por cultivo
YR _{i,j,t}	Tabla X	Tabla Y			SIAP 2024	% de rendimiento
RG _j	Tabla X	Tabla Y			Garcia-Rios et al., 2024 Salcedo 2021 Silvia-Hernández et al. 2020	% residuos por cultivo
ICA _{m,c} ICA _{m,a,c}	1,000.0			ton/año		
SCA _{m,c} SCA _{m,a,c}	10,920.0	11,000.0	11,000.0	ton/año		Capacidad de todos los residuos de jitomate
PCR _j PCR _a	0.8					Promedio de rendimiento de producción de pellets
ICP _{k,c}	1,000.0			ton/año		
SCP _{k,c}	10,920.0	11,000.0	11,000.0	ton/año		

PTR_s^{FC} $PTR_{u,s,t}^{FC}$	Tabla X	Tabla Y			INEGI 2020	Población de cada municipio en Querétaro
FCM_s^{FC} $TR_{u,s,t}^{FC}$		2,770.0 9,972.0		kWh/habitante MJ/habitante	SENER 2023	Consumo eléctrico per cápita
FEC_o		48,000.0		MJ/ton gas natural		Poder calorífico del gas natural
FE_o		9,396.0		MJ/ton pellet	Guido et al. 2021	Poder calorífico del pellet
$CF_{m,c}^A$ $CF_{m,a,c}^A$	Tabla X	Tabla Y			Peters et al. 2003	Calculadas en el documento llamado "Costos almacén-plantas MCTS"
$CV_{m,c}^A$ $CV_{m,a,c}^A$	Tabla X	Tabla Y			Peters et al. 2003	
$CF_{k,c}^P$	Tabla X	Tabla Y			Peters et al. 2003	
$CV_{k,c}^P$	Tabla X	Tabla Y			Peters et al. 2003	
$D_{i,m}^1$ $D_{m,k}^2$ $D_{k,o}^3$	Tabla X	Tabla Y			GOOGLE MAPS	Distancias entre cada municipio
$D_{r,o}^4$	Tabla X	Tabla Y			GOOGLE MAPS	Distancias entre municipios y refinería

$D_{u,s,t}^0$					GOOGLE MAPS	
PDC	MXN 26.3 \$ 1,315.00		/L /m ³	CRE 2024	Consultados el día 16/10/2024 en la página para el estado de Querétaro en el municipio de Querétaro	
CEsp	2.50 0.0025		L/km m ³ /km	Tauro et al. 2022	Se tomará la ecuación de cálculo de costos por transporte	
CCT	14.0 3.9		m ³ /camión ton/camión	Tauro et al. 2022		
ρ^{Res}	0.28	ton/m ³	0.275	ton/m ³	Rojas-León et al. 2014	Densidad de residuos de jitomate y cebada promediados para obtener la densidad de los demás residuos a considerar
	0.27	ton/m ³			Reyes-Suárez et al. 2020	
ρ^{Comb}	832	kg/m ³	0.832	ton/m ³	Energéticos Nieto 2024	

PMGN	MXN 8.43 \$ 20,231.8320	/MJ /ton gas natural		
PUR	\$ 43.70	/ton		
PC	\$ 15.30	/ton		Puesto arbitraria mente
PV	\$ 68.77	/ton	Guido et al. 2021	Precio de venta del pellet
CMRO	MXN 874.00 \$ 43.70	/ton residuo recogido /ton		Precio de recolección de basura