



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

“Análisis de la Resiliencia en Sistemas de Optimización a Nivel
Macroscópico Involucrando el Nexo Agua-Energía-Alimentos”

TESIS presentada por:

M.C. JESÚS MANUEL NÚÑEZ LÓPEZ

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

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Director de Tesis: **Dr. José María Ponce Ortega**

Co-Director de Tesis: **Dr. Eusiel Rubio Castro**

Morelia, Michoacán

junio de 2022

ABSTRACT

Analyzing Resilience for Optimizing Systems at Macroscopic Level Involving the Water-Energy-Food Nexus

By

Ch.E. Jesús Manuel Núñez López

August 2022

PhD in Chemical Engineering Sciences

Supervised by PhD. José María Ponce Ortega and PhD. Eusiel Rubio Castro

This work presents a general methodology for quantifying the resilience in process systems engineering, where multi-objective optimization models for the optimal design of a resilient macroscopic system that incorporates the water-energy-food nexus targeting economic and environmental objectives are considered. The proposed models aim to properly satisfy and distribute water, energy, and food in areas that present extreme climate conditions. The models were coded and solved in the software GAMS. Different case studies from México were considered to show the applicability of the proposed approach. Results show that it is possible to obtain resilient solutions in satisfying water-energy and food needs with an appropriated distribution of resources, even when the climatic conditions are extreme.

Keywords: Resource integration, Multi-objective optimization, Perturbances, Resilience, Water-energy-food nexus.

RESUMEN

Análisis de la Resiliencia en Sistemas de Optimización a Nivel Macroscópico Involucrando el
Nexo Agua-Energía-Alimentos

Por

M.C. Jesús Manuel Núñez López

Agosto del 2022

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigido por Dr. José María Ponce Ortega y Dr. Eusiel Rubio Castro

En este trabajo se presenta una metodología general para cuantificar la resiliencia en ingeniería de procesos, se consideraron modelos de optimización multi-objetivo para el diseño óptimo de sistemas macroscópicos resilientes que incorporan el nexo agua-energía-alimentos, tomando en cuenta objetivos económicos y ambientales. Los modelos matemáticos buscan satisfacer de manera adecuada la distribución de agua, energía y alimentos en áreas que presentan condiciones climáticas extremas. Los modelos matemáticos fueron codificados y resueltos en el *software* GAMS. Diferentes casos de estudio pertenecientes a distintas regiones de México fueron considerados para mostrar la aplicabilidad de los modelos propuestos. Los resultados muestran que es posible obtener soluciones resilientes para satisfacer las necesidades de agua-energía y alimento con una apropiada distribución de los recursos, aun cuando se presentan condiciones climáticas extremas.

Palabras Clave: Integración de recursos, Nexo agua-energía-alimentos, Perturbaciones, Optimización multi-objetivo, Resiliencia.

DEDICATORIA

A mis padres por todo el amor y el apoyo incondicional que me han brindado siempre para cumplir cada uno de mis objetivos y por la formación que me dieron lo cual me permitió ser la persona que soy hoy en día.

A mis hermanos Julio y Cristhian por estar siempre a mi lado apoyándome.

A mis amigos del programa de posgrado de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Química y del área de optimización de procesos.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores el Dr. José María Ponce Ortega y el Dr. Eusiel Rubio Castro por haberme dado la oportunidad de la realización de esta tesis, por todo el tiempo, apoyo y motivación que me brindaron, así como también por los conocimientos proporcionados, los cuales fortalecieron mi formación tanto profesional como personal.

A mis maestros de doctorado y sinodales de mi trabajo de tesis por tesis por todas las enseñanzas y apoyo brindado. En especial al Dr. Fabricio Nápoles Rivera, al Dr. Oscar Martín Hernández Calderón y el Dr. Agustín Castro Montoya.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme permitido realizar esta experiencia de crecimiento personal y académico.

Al CONACYT por los recursos proporcionados.

ÍNDICE

ABSTRACT	i
RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Marco teórico	5
1.1.1 Programación matemática	5
1.1.2 Plataforma computacional GAMS	5
1.1.3 Fundamentos de la resiliencia	6
1.2 Antecedentes	10
1.2.1 Nexo agua-energía-alimentos	10
1.2.2 Historia de la resiliencia	10
1.3 Hipótesis	11
1.4 Objetivos	11
1.4.1 General	11
1.4.2 Particulares	11
1.5 Justificación	11
1.6 Alcance	12
2. METODOLOGÍA	13
3. CUANTIFICACIÓN DE LA RESILIENCIA EN EL NEXO AGUA-ENERGÍA ALIMENTOS A NIVEL MACROSCÓPICO	18
3.1 Planteamiento del problema	18
3.2 Superestructura	19
3.3 Modelo matemático	20
3.3.1 Funciones objetivo	20
3.3.2 Restricciones de las funciones objetivo	21
3.4 Caso de estudio	42
3.5 Resultados	43
3.6 Conclusiones	51

4. OPTIMIZACIÓN DE LA RESILIENCIA EN EL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS	52
4.1 Planteamiento del problema.....	52
4.2 Superestructura	53
4.3 Modelo matemático	53
4.4 Caso de estudio	55
4.5 Resultados	57
4.6 Conclusiones	64
5. ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA EN LA SEGURIDAD DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTO EN REGIONES DE CLIMA ÁRIDO Y SEMI-ÁRIDO.....	66
5.1 Planteamiento del problema.....	66
5.2 Caso de estudio	66
5.2.1 Monterrey	67
5.2.2 Hermosillo	68
5.3 Resultados	69
5.4 Conclusiones	74
6. CONCLUSIONES	76
7. REFERENCIAS	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Esquema de la funcionalidad y las curvas de rendimiento de un sistema interrumpido con fallo parcial y completo	7
2	Representación de la matriz tri-dimensional del sistema	8
3	Representación de la matriz bi-dimensional del sistema	9
4	Matriz de resiliencia del sistema	10
5	Representación del problema	18
6	Superestructura propuesta	19
7	Curva Pareto para el caso de estudio	44
8	Costos de penalización para el escenario A en caso de una helada	46
9	Costos de penalización para el escenario A en caso de una sequía	47
10	Costos de penalización para el escenario A en caso de una inundación	47
11	Costos de penalización para el escenario C en caso de una helada	48
12	Costos de penalización para el escenario C en caso de una sequía	48
13	Costos de penalización para el escenario C en caso de una inundación	49
14	Costos de penalización para el escenario G en caso de una helada	49
15	Costos de penalización para el escenario G en caso de una sequía	50
16	Costos de penalización para el escenario G en caso de una inundación	50
17	Planteamiento del problema	52
18	Superestructura propuesta	53
19	Caso de estudio	56
20	Producción de sectores	62
21	Producción de sectores cuando ocurre un desastre natural	63
22	Consumo de agua total en el sistema	63
23	Consumo de agua total en el sistema cuando ocurre un desastre natural	64
24	Planteamiento del problema	67

25	Matriz tri-dimensional para el caso de estudio de Hermosillo	70
26	Matriz tri-dimensional para el caso de estudio de Monterrey	70
27	Índices de riesgo para Hermosillo	72
28	Índices de riesgo para Monterrey	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Intensidad asociada para ciclones de acuerdo a la escala Saffir-Simpson	14
2	Asignación de valores para el número de días con heladas	15
3	Construcción de intervalos de clase de temperatura mínima	15
4	Clasificación de sequías	16
5	Índices de riesgo para sequías	16
6	Parques industriales de la región	43
7	Valores económicos para los escenarios del caso de estudio	45
8	Valores ambientales para los escenarios del caso de estudio	45
9	Servicios funcionales de cada uno de los sectores analizados	45
10	Valores mínimos de índices de resiliencia para los casos de estudio	51
11	Costos de penalización para servicios funcionales	57
12	Valores para la ganancia y emisiones de CO ₂ para el caso modificado	59
13	Ganancias en caso de la ocurrencia de algún fenómeno natural	60
14	Producción por cada distrito de cada sector en tonelada/año	61
15	Costos de penalización para el nexo agua-energía-alimentos en diferentes años	71
16	Matriz bi-dimensional para Hermosillo	71
17	Matriz bi-dimensional para Monterrey	72
18	Índices de resiliencia para Hermosillo	74
19	Índices de resiliencia para Monterrey	74

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, uno de los problemas más grande en el mundo es satisfacer las necesidades básicas para la vida cotidiana, como lo son el agua, la energía y los alimentos; esto principalmente debido a la urbanización, las limitaciones de los recursos, el manejo inadecuado de los mismos, la política, las estructuras gubernamentales, y el impacto que ha tenido el cambio climático. El nexo agua-energía-alimentos (WEFN) surge con el potencial de estudiar la relación entre el agua, la energía y los alimentos, y promover la seguridad y la eficiencia de los recursos para garantizar la sostenibilidad urbana y facilitar la adaptación al cambio climático. El cambio climático ejerce gran presión en la seguridad del agua, debido a eventos extremos como las inundaciones, las heladas y las sequías. En cuanto al sector energético, las fuentes de energía renovable se ven afectadas por los cambios en los patrones de precipitación, temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento o la disponibilidad del agua (Yalew y col., 2020). Por otro lado, el impacto del cambio climático también pone en riesgo la seguridad de los alimentos ya que el suministro de los mismos puede interrumpirse, mientras que el crecimiento de los cultivos puede afectarse por los cambios bruscos de temperatura (Fahad y col., 2021a). Además, los eventos climáticos extremos pueden afectar la distribución del agua y la transmisión de energía, lo cual provoca graves consecuencias en la producción de los alimentos.

La seguridad del nexo agua-energía-alimentos se ha convertido en una gran preocupación debido a las incertidumbres futuras (Yadav y col., 2021), ya que puede afectar potencialmente la productividad de los recursos (Sönmez y col., 2021); por lo tanto, abordar el efecto que tienen los desastres naturales sobre el nexo agua-energía-alimentos es un desafío crucial para aquellas ciudades donde este nexo es de suma importancia. Recientemente, se ha incrementado la frecuencia en la ocurrencia de diferentes desastres naturales (heladas, sequías e inundaciones) (Botzen y col., 2019). Estos eventos han puesto en riesgo la producción y la disponibilidad de los recursos; por lo tanto, la resiliencia es un factor crítico que debe incluirse en la evaluación del nexo para la sostenibilidad urbana.

El término resiliencia se ha empleado en varias áreas, pero en general, la resiliencia es la capacidad de resistir y adaptarse a una perturbación y recuperar su estado normal (Ribeiro y Peña Jardim Gonçalves, 2019). Núñez-López y col. (2021) definieron la resiliencia como la capacidad del sistema para preservar su(s) servicio(s) funcional(es) durante y después de un proceso de

interrupción. Existen diferentes medios para abordar la resiliencia. En primera instancia, se evaluaba la resiliencia mediante métodos cualitativos (Bruce y col., 2020; Pawar y col., 2021), pero últimamente se ha prestado especial atención al desarrollo de métodos cuantitativos principalmente en el área de ingeniería de procesos (Nezamoddini y col., 2017; Ahmadi y col., 2021). La cuantificación de la resiliencia en los sistemas de optimización ha traído grandes beneficios ya que permite identificar los escenarios donde se pueden presentar algunas fallas que disminuyen el rendimiento del sistema y así poder tomar decisiones sobre cómo abordar el problema antes, durante o después del diseño del sistema. Esto muestra la importancia de implementar marcos de planificación resilientes en comparación con los métodos de planificación convencionales.

Abordar la resiliencia es un factor clave para un sistema sostenible. En el sector alimentario, la resiliencia se ha incorporado a los sistemas de la cadena de suministros para mejorar la seguridad de la misma (Martínez-Guido y col., 2020). Además, se han abordado estudios sobre procesos de mitigación para desarrollar cultivos resilientes al clima, y se han propuesto nuevas estrategias de manejo que consideran las interacciones entre el suelo y la planta (Fahad y col., 2021b). En el sector del agua, los estudios se han centrado en la resiliencia del suministro de agua ante los desastres (Balaei y col., 2021), la gestión del agua (Behboudiand y Kerachian, 2021) y la calidad del agua (Imani y col., 2021). En estudios anteriores, la resiliencia en el sector energético se ha abordado centrándose en los fenómenos meteorológicos, que son la causa de la mayoría de las interrupciones del suministro de energía (Jasiunas y col., 2021), las condiciones geopolíticas (Wilson, 2019) y las fallas técnicas (Cadini y col., 2017). En este sentido, se han propuesto evaluaciones cuantitativas de resiliencia (Moslehi y Reddy, 2018; Abdin y col., 2019), indicadores o métricas para la planificación de sistemas energéticos (Gholami Rostam y Abbasi, 2021) y modelos de simulación (Senkel y col., 2021). Recientemente, se ha prestado especial atención al estudio de la predicción energética en construcciones (Sun y col., 2020) y la distribución de energía (Fontenot y col., 2021) teniendo en cuenta el cambio climático, proporcionando así recomendaciones para reducir el consumo de energía (Ashouri y col., 2021).

En el contexto del nexo agua-energía-alimentos, se han reportado modelos que proponen estrategias para reducir las compensaciones entre sectores y facilitar el proceso de toma de decisiones, sin embargo, algunos de ellos son limitados en el sentido de que no consideran las incertidumbres con eventos y riesgos inesperados. Por lo tanto, los métodos de resiliencia son

capaces de mejorar la toma de decisiones, mitigar los riesgos emergentes y motivar la planificación del sistema. Por ejemplo, Govindan y al-Ansari (2019) abordaron la resiliencia del WEFN mediante el desarrollo de un marco computacional basado en el aprendizaje por refuerzo para cuantificar los riesgos emergentes y determinar las recompensas o la mejor política de acción para la red y la adaptación para enfrentar los riesgos. Sin embargo, una limitación de estos marcos es que requieren información densa para inferir las probabilidades de transición y que la resiliencia depende de la recompensa otorgada en un estado particular ya que su ubicación en el sistema podría tomar una dimensión ambiental, económica y social. Para mitigar estas limitaciones y facilitar la cuantificación de la resiliencia, se han propuesto otros índices. En este contexto, Shu y col. (2021) desarrollaron índices para cuantificar la resiliencia y seguridad del WEFN en países industrializados a través de la medida de la disponibilidad y accesibilidad de los recursos. Sin embargo, aunque esta metodología no requiere muchos datos o información para calcular el indicador de resiliencia, los subindicadores deben ser ponderados en base a opiniones de expertos, y esto podría traer incertidumbre en el cálculo de la resiliencia.

Teniendo en cuenta que existe una amplia investigación sobre la resiliencia de los sistemas de agua, energía y alimentos de forma independiente, pero una investigación menor para cuantificar la resiliencia del WEFN de los sistemas que involucran eventos inciertos e inesperados, esta tesis tiene como objetivo desarrollar un enfoque sistemático para evaluar la resiliencia en la seguridad del nexo agua-energía-alimentos en diferentes periodos. Teniendo como principales contribuciones las siguientes:

- La metodología propuesta permite identificar y resolver los puntos ciegos de un sistema a través de alternativas que ayuden a mejorar el funcionamiento del mismo.
- Este enfoque tiene una amplia aplicabilidad ya que puede analizar la funcionalidad de sistemas macroscópicos y puede usarse para evaluar la resiliencia del WEFN en cualquier región.
- De acuerdo a la discretización de la metodología utilizada, es posible estimar la resiliencia del sistema en años futuros.
- Uno de los principales beneficios de este enfoque es evaluar la resiliencia e identificar perturbaciones críticas para prevenir eventos no deseados, proponer acciones correctivas y/o realizar un diseño adecuado del sistema de forma anticipada.

Por otra parte, las principales limitaciones radican en la modificación de la escala a la que se diseñó la metodología, así como la dificultad de acceder a los parámetros para hacer uso de otra medida de discretización. Esto podría modificar los resultados de las predicciones para años futuros.

1.1 Marco teórico

1.1.1 Programación matemática

La programación matemática ha mostrado ser una herramienta muy eficiente en la solución de problemas de optimización, por su gran versatilidad para modelar problemas asociados con la optimización, y porque en la actualidad, gracias a los grandes avances teóricos en el área y los impresionantes logros electrónicos, los ordenadores modernos son capaces de dar soluciones muy precisas en tiempos razonables (Belotti y col., 2013). Dentro del campo general de programación matemática existen diferentes modelos de optimización, los cuales son enlistados a continuación:

Problema Lineal: los problemas de programación lineal exigen que tanto las expresiones de las restricciones como de los objetivos se expresen de forma lineal, así como también que las variables deben ser números reales o continuas.

Problema no Lineal: cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no es lineal se tiene un problema no lineal, las variables de estos problemas, al igual que los lineales deben ser variables continuas.

Problema Mixto Entero Lineal: tanto las restricciones, como la función objetivo deben ser lineales, y existen tanto variables continuas como discretas en estos problemas.

Problema Mixto Entero no Lineal: cuando alguna de las restricciones o la función objetivo no es lineal, pero a diferencia del problema no lineal, en este caso existen variables discretas además de las continuas.

Nótese que no obstante del tipo de problema asociado a la representación de un problema, proceso químico y/o actividad estos se componen de los siguientes elementos:

- Variables, que pueden ser enteras o continuas, y pueden tener límites.
- Ecuaciones de restricción o limitaciones.
- Función(es) objetivo(s).

1.1.2 Plataforma computacional GAMS

GAMS (General Algebraic Modeling System) (Brooke y col., 2022) es un lenguaje de programación que permite el modelado, análisis y resolución de diversos problemas de optimización. Aunque inicialmente el manejo y comprensión de GAMS requiere esfuerzo, una vez

entendidas se dispone de una herramienta muy versátil capaz de resolver problemas de programación matemática (Bussieck y Vigerske, 2003).

Otros lenguajes similares a GAMS son AMPL y AIMMS. Todos ellos presentan características análogas (Castillo y col., 2002).

Entre las características más importantes de GAMS cabe destacar:

- Su capacidad para resolver problemas de gran dimensión a partir de problemas de pequeña dimensión sin variar el código sustancialmente. El manejo eficiente de sus índices permite escribir de manera compacta restricciones similares mediante una sola restricción.
- Separa el proceso de modelado del proceso de resolución del problema. Así, el usuario de GAMS debe ser capaz de conseguir una formulación consistente del problema, y una vez la expresa en notación de GAMS, este lenguaje hace uso de alguno de los optimizadores disponibles para obtener su solución.
- La forma en la que GAMS representa un problema de optimización coincide, prácticamente, con la descripción matemática de ese problema. Por tanto, el código GAMS es sencillo de comprender para aquellos lectores familiarizados con la optimización.

1.1.3 Fundamentos de la resiliencia

Específicamente, la resiliencia de un sistema se puede caracterizar por su desempeño cuando se ve estresado por perturbaciones internas o externas. El término resiliencia se refiere a la capacidad del sistema para brindar sus servicios funcionales durante y después de que alguna interrupción se presente (Moslehi y Reddy, 2018). En la **Figura 1** se ilustra el concepto de resiliencia: en cualquier momento durante el periodo de interrupción de un sistema, la diferencia entre el nivel del comportamiento deseado y el comportamiento actual se identifica como la pérdida de servicio del sistema funcional, denotada por $f_{loss}(t)$. Por lo tanto, el área sombreada en la **Figura 1** representa la pérdida total del funcionamiento del sistema debido a la interrupción, lo cual se representa mediante la **Ecuación 1**.

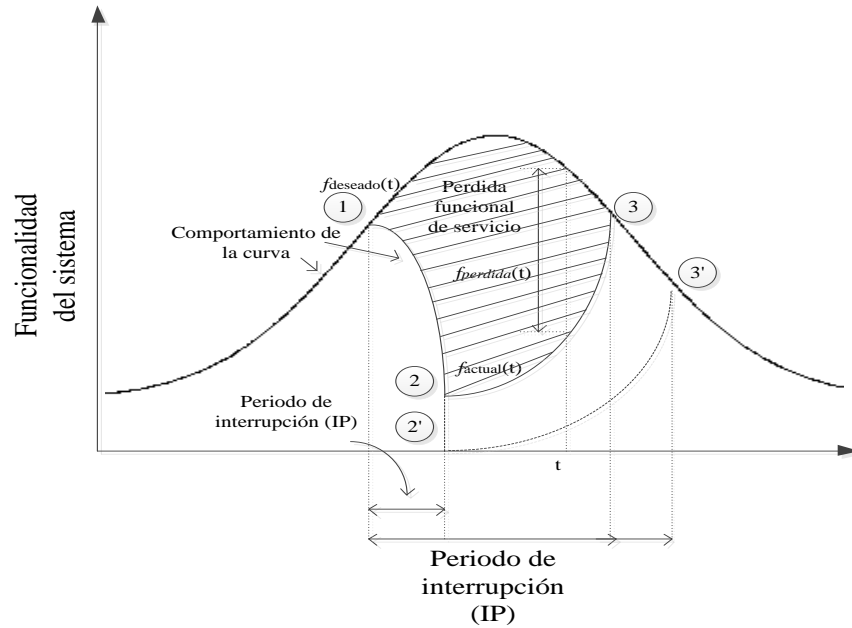


Figura 1. Esquema de la funcionalidad y las curvas de rendimiento de un sistema interrumpido con fallo parcial y completo

$$FL = \int_{t_0}^{t_0+T_{IP}} [f_{deseado}(t) - f_{actuado}(t)] dt = \int_{t_0}^{t_0+T_{IP}} f_{loss}(t) dt \quad (1)$$

Idealmente, un sistema resiliente cumpliría sus dos objetivos de rendimiento durante todo el periodo de interrupción. Dos atributos que caracterizan esto: a) una preparación antes de la interrupción y b) recuperación ágil después de la interrupción.

Un sistema resiliente debe poder minimizar las pérdidas en la prestación de sus servicios, para cualquier modo de falla posible y durante todos los periodos operacionales. Esto se puede representar como una matriz tridimensional (**Figura 2**):

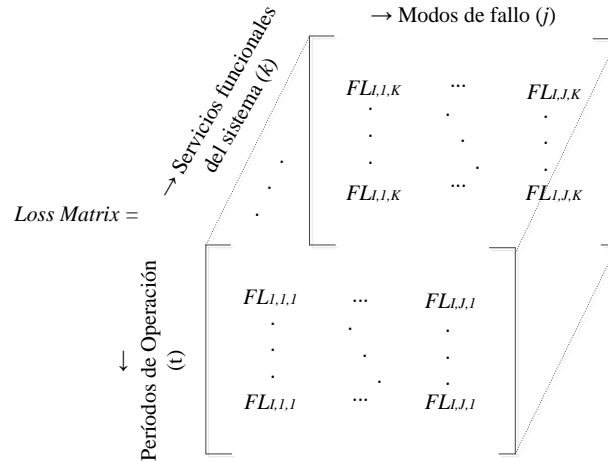


Figura 2. Representación de la matriz tri-dimensional del sistema

donde la matriz representa la pérdida de servicio, j representa varios modos de falla que corresponden a la falla de los componentes del sistema, k identifica los servicios funcionales del sistema ($1 < K$), y t muestra varios periodos de operación que afectan la resiliencia del sistema. Los periodos de operación pueden representar variaciones en la operación del sistema y están pensados para reflejar los casos extremos, como las demandas máximas en varias estaciones del año. En lo sucesivo, las combinaciones de modos de falla y periodos de operación se conocen como escenarios.

Posteriormente se sugiere asignar costos de multas monetarias a las pérdidas de servicios funcionales y, de ese modo, reducir la matriz a dos. Para hacerlo en cualquier t y j , es decir, para un escenario dado, estimamos los costos totales impuestos debido a las pérdidas del servicio funcional y las operaciones del sistema no óptimas mediante:

$$\text{ImpCost}_{j,t} = \sum_k \text{PenalizationCost}_k \text{Unit}_k \tag{2}$$

donde $\text{ImpCost}_{j,t}$ es el costo impuesto debido al modo de falla j , $\text{PenalizationCost}_k$ es el costo operativo durante el modo de falla j y el período de tiempo t , K es el número total de servicios funcionales del sistema y Unit_k representa los servicios funcionales. Además, se asume que los costos de penalización no varían según los modos de falla, pero pueden variar según el período de tiempo.

Usando la **Ecuación 2**, la matriz tridimensional se reduce a una matriz bidimensional llamada “*Consequence Matrix*” que incluye los costos monetarios impuestos asociados a diferentes escenarios.

$$Consequence\ Matrix = \begin{bmatrix} IC_{i,1} & \dots & IC_{i,j} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ IC_{i,1} & \dots & IC_{i,j} \end{bmatrix}$$

Figura 3. Representación de la matriz de bi-dimensional del sistema

La resiliencia del sistema se puede caracterizar por la Matriz de Consecuencias (**Figura 3**) que contiene los costos monetarios totales incurridos para las partes interesadas del sistema de diferentes escenarios.

Tales fallas pueden ir desde fallas aleatorias de los componentes del sistema, hasta ataques deliberados, y errores del personal. En cualquier caso, uno o varios componentes del sistema fallarían, por lo que la funcionalidad del sistema se ve comprometida si el sistema no es totalmente resiliente.

Los costos impuestos se pueden utilizar para desarrollar un índice de resiliencia cuantitativo. Dado que la resiliencia es un atributo positivo, los números más altos deben reflejar un mejor desempeño, mientras que los costos impuestos más altos deben representar una resiliencia más pobre frente a las interrupciones. Por lo tanto, en este análisis, el índice de resiliencia (**Ecuación 3**) se define pertinente a cada escenario como:

$$Re_{j,t} = \frac{ImpCost_t^{Max} - ImpCost_{j,t}}{ImpCost_t^{Max}} \tag{3}$$

donde $ImpCost_t^{Max}$ es el máximo posible costo impuesto en cada escenario. El índice de resiliencia varía entre 0 y 1, y corresponde al peor y mejor nivel de resiliencia, respetivamente. $Re = 0$, refleja la situación de que el sistema no podría entregar ninguno de sus servicios funcionales, y $Re = 1$ indica que la funcionalidad del sistema no se interrumpiría en absoluto.

La Matriz de Resiliencia (**Figura 4**) la cual incluye los índices de resiliencia para todos los escenarios se representa como:

$$Resilience\ Matrix = \begin{bmatrix} \frac{ImpCost_I^{Max} - ImpCost_{I,I}}{ImpCost_I^{Max} - ImpCost_I^{Min}} & \dots & \frac{ImpCost_I^{Max} - ImpCost_{I,J}}{ImpCost_I^{Max} - ImpCost_I^{Min}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{ImpCost_T^{Max} - ImpCost_{T,I}}{ImpCost_T^{Max} - ImpCost_T^{Min}} & \dots & \frac{ImpCost_T^{Max} - ImpCost_{T,J}}{ImpCost_T^{Max} - ImpCost_T^{Min}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Re_{I,I} & \dots & Re_{I,J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Re_{T,I} & \dots & Re_{T,J} \end{bmatrix}$$

Figura 4. Matriz de resiliencia del sistema

1.2 Antecedentes

1.2.1 Nexo agua-energía-alimentos

El estudio del nexo agua-energía-alimentos ha tomado relevancia en las últimas décadas ya que son recursos altamente indispensables en el uso cotidiano de todas las poblaciones y están íntimamente relacionados entre sí (Radmeher y col., 2021). Existen diferentes trabajos donde se ha analizado el nexo agua-energía-alimentos, buscando en primera instancia una adecuada distribución de los recursos a través de la integración de procesos (Wu y col., 2020). Se han formulado modelos matemáticos para la integración del nexo en comunidades aisladas (Sukhwani y col., 2019), en cadenas de suministro (Yavari y Zaker, 2020) y en regiones que presentan condiciones climáticas extremas (Siderius y col., 2021). Yue y Guo (2021) presentaron un novedoso modelo de optimización para el desarrollo sostenible de la agricultura. Zhang y col. (2021) formularon un modelo de programación estocástica multi-objetivo para el análisis del nexo en el sector agrícola. Deng y col. (2020) identificaron donde y como se cruzan los recursos del nexo en el sector económico desde una perspectiva de las demandas finales.

1.2.2 Historia de la resiliencia

El término resiliencia ha ido ganando relevancia en los últimos años, primero se utilizó este concepto de manera cualitativa en el área de ciencia de materiales (Chen y col., 2021), y especialmente en el área de la psicología (Mguni y Van Vliet, 2020). Recientemente se han propuesto diferentes metodologías para evaluar la resiliencia de manera cuantitativa en términos económicos en diferentes procesos de generación de energía (Bhusal y col., 2020), industriales (Hassani y Ghanbari, 2019) y de optimización (Zinetullina y col., 2021). Por ejemplo, Gong y You (2018) propusieron un enfoque general para la optimización de la resiliencia en la formulación del

diseño y operación de procesos. Assarkhaniki y col. (2020) presentaron un enfoque sistemático para la cuantificación de índices asociados a la resiliencia para ciertos desastres naturales. Liu y col. (2020) identificaron la seguridad óptima del nexo agua-energía-alimentos bajo condiciones estocásticas.

1.3 Hipótesis

Sí se realiza la cuantificación de la resiliencia mediante aspectos económicos en sistemas de optimización que se encuentren susceptibles a distintas perturbaciones, entonces se podrá identificar aquellos escenarios que puedan recuperar su pérdida de funcionalidad debido a alguna adversidad al menor costo.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Cuantificar la resiliencia en modelos matemáticos de optimización en términos económicos, para identificar escenarios que presenten una menor vulnerabilidad a disturbios que puedan afectar la funcionalidad del sistema.

1.4.2 Particulares

- Analizar el sistema de estudio, así como todas sus entradas y salidas.
- Definir los balances globales y por componentes del sistema.
- Evaluar distintos escenarios y comparar las soluciones entre ellos.
- Analizar la resiliencia del sistema de optimización.
- Optimizar la resiliencia del sistema.

1.5 Justificación

En la actualidad, el manejo eficiente de los recursos a nivel mundial representa una gran problemática; en particular, en México se tienen enormes problemas para abastecer a gran parte de la población de agua, energía y alimentos, debido al incremento de la población y al uso inadecuado de estos recursos. Por lo cual, en esta tesis se pretende encontrar un esquema óptimo de distribución de estos recursos en distintas regiones, mediante el uso eficiente de los mismos.

1.6 Alcance

En la presente tesis se plantean distintos escenarios en los cuales se puede observar que es posible encontrar soluciones resilientes en el análisis del nexo agua-energía-alimentos cuando este puede verse afectado por distintas perturbaciones. La metodología propuesta representa una herramienta importante para la toma de decisiones, debido a que nos permite identificar aquellos escenarios que pueden recuperar sus servicios funcionales en un menor tiempo, o a un menor costo y de esta manera regresar a su comportamiento habitual.

2. METODOLOGÍA

Para resolver el problema planteado se propuso la siguiente metodología, en donde se presenta un esquema general para el análisis de la resiliencia en sistemas de ingeniería de procesos:

1. **Definir los límites del sistema.** Entradas y salidas de cada unidad de operación que conforman al sistema deben ser incluidos. Puede utilizarse una superestructura donde se muestren todas las combinaciones y soluciones posibles del problema.
2. **Desarrollar una matriz tri-dimensional (Figura 2).** Fijar periodos de tiempo (días, semanas, meses, años), los servicios funcionales del sistema (recursos, ej. Agua, energía, alimentos) y los posibles modos de falla que puedan afectar al sistema (ej. Errores aleatorios, errores de personal, desastres naturales).
3. **Formular una matriz bi-dimensional (Figura 3).** Asignando costos de penalización para cada uno de los servicios funcionales en cada uno de los periodos de tiempo seleccionado (**Ecuación 2**), así como también para cada posible modo de falla; lo cual permite reducir la matriz tri-dimensional a una matriz cuadrada.
4. **Formular el modelo matemático.** En base a la superestructura propuesta formular el modelo matemático, con sus respectivas funciones objetivo y restricciones.
5. **Recolectar información.** Para un caso de estudio representativo del problema a analizar.
6. **Codificar el modelo matemático.** Utilizar un software donde sea posible obtener una solución.
7. **Incluir las ecuaciones para el análisis de la resiliencia en el modelo matemático.** Incluir costos impuestos, índices de riesgo, índices de resiliencia.
8. **Maximizar la resiliencia del sistema. (Ecuación 3)**

En torno al cálculo de los índices de riesgo en caso de errores de personal, se recomienda utilizar el cálculo de índices de salud de la ruta de proceso (PRHI), mediante la metodología propuesta por la OSHA (Occupational Safety and Health Administration). En caso de índices de riesgo por desastres se puede utilizar la metodología propuesta por CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (Jiménez y col., 2012).

Donde el índice de riesgo para una inundación se calcula a través de la **Ecuación 4**,

$$IPCT = \sum_{i=1}^7 v_i I \quad (4)$$

teniendo que la intensidad (I) está asociada a la categoría de los ciclones tropicales en la escala Saffir-Simpson (**Tabla 1**), la cual se multiplica por la tasa de incidencia (v_i).

Tabla 1. Intensidad asociada para ciclones de acuerdo a la escala Saffir-Simpson

Intensidad (I)	Categoría
1	Depresión tropical
2	Tormenta tropical
3	Huracán categoría 1
4	Huracán categoría 2
5	Huracán categoría 3
6	Huracán categoría 4
7	Huracán categoría 5

Por otra parte, para determinar el riesgo asociado a una helada (IPBT), se utiliza la **ecuación 5**, la cual involucra parámetros relacionados con los días de heladas en cierta región (H_{thel}) (**Tabla 2**) y la temperatura mínima extrema (H_{tmext}) (**Tabla 3**).

$$IPBT = H_{tmext}(0.5) + H_{thel}(0.5) \quad (5)$$

El cálculo de índices de riesgo en caso de una sequía, se realiza mediante la clasificación propuesta por Escalante-Sandoval y Reyes (2005); dicho índice se encuentra en función del promedio de déficit de lluvia (ARD) y del promedio de duración de la sequía (ADD). Esta clasificación se muestra en la **Tabla 4** y en la **Tabla 5**

Tabla 2. Asignación de valores para el número de días con heladas

Número de días con heladas	Valor	H_{hel}	Categoría
> 120	3	0.5	Alto
61 - 120	2	0.375	Medio
1 - 60	1	0.25	Bajo
cero	0	0.125	Muy bajo

Tabla 3. Construcción de intervalos de clase de temperatura mínima

Temperatura mínima extrema (°C)	Valor	Índice H_{mext}	Categoría
> 12	1	0.1	Muy bajo
6 to 12	2	0.2	Bajo
6 to 0			
0 to -6	3	0.3	Medio
-6 to -12			
-12 to -18	4	0.4	Alto
-18 to -24			
< -24	5	0.5	Muy alto

$$IPDT = f(ARD, ADD) \tag{6}$$

Tabla 4. Clasificación de sequías

Promedio déficit de lluvia(%) respecto al promedio anual de lluvia	Promedio duración de sequía D (años)		
	$1 < D < 2$	$2 < D < 3$	$3 < D < 4$
$0 < \text{déficit} (\%) < 10$	Normal	Moderada	Extraordinaria
$10 < \text{déficit} (\%) < 20$	Severa	Muy severa	Extremadamente severa
$20 < \text{déficit} (\%) < 30$	Vasta	Muy vasta	Extremadamente vasta
$30 < \text{déficit} (\%) < 40$	Crítica	Muy crítica	Catastrófica

Tabla 5. Índices de riesgo para sequías

Promedio déficit de lluvia (%) respecto al promedio anual de lluvia	Promedio duración de sequía D (años)		
	$1 < D < 2$	$2 < D < 3$	$3 < D < 4$
$0 < \text{déficit} (\%) < 10$	0.075	0.125	0.175
$10 < \text{déficit} (\%) < 20$	0.225	0.375	0.525
$20 < \text{déficit} (\%) < 30$	0.375	0.625	0.875
$30 < \text{déficit} (\%) < 40$	0.525	0.875	1.000

Por otro lado, para evaluar los índices de resiliencia para cada uno de los escenarios, puede incluirse una variable binaria asociada a la existencia de un riesgo (**Ecuación 7**) que pueda afectar la funcionalidad del sistema.

$$\left[\begin{array}{l} Y_{f,t} = 0 \\ \text{RiskIndex}_{f,t} = 0 \\ ND_{f,t} = 1 \\ \text{Obj}F_{s,t} = \text{Funct}_{s,t} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{l} Y_{f,t} = 1 \\ \text{RiskIndex}_{f,t} = \text{RiskIndex}_{f,t} \\ ND_{f,t} = 1 - \text{RiskIndex}_{f,t} \\ \text{Obj}F_{s,t} = \frac{\text{Funct}_{s,t}}{ND_{f,t}} \end{array} \right] \quad (7)$$

El factor ($ND_{f,t}$) (**Ecuación 8**) se refiere a la pérdida de funcionalidad del proceso, debido a una perturbación. Cuando un riesgo existe, el valor para la variable binaria ($Y_{f,t}$) es igual a 1, entonces el valor para el factor ($ND_{f,t}$) es igual a 1 menos el riesgo asociado a esa perturbación ($\text{RiskIndex}_{f,t}$); por otro lado cuando no existe una perturbación, la variable binaria ($Y_{f,t}$) toma un valor de 0 y el factor ($ND_{f,t}$) es igual a 1, lo cual representa que no existe una pérdida de funcionalidad del proceso asociada a alguna perturbación.

$$ND_{f,t} = [1 - (Y_{f,t} \cdot \text{RiskIndex}_{f,t})] \quad f \forall F, s \forall S, t \forall T \quad (8)$$

La metodología propuesta fue aplicada a distintos casos de estudio, en las siguientes secciones se muestra cada uno de los problemas abordados.

3. CUANTIFICACIÓN DE LA RESILIENCIA EN EL NEXO AGUA-ENERGÍA ALIMENTOS A NIVEL MACROSCÓPICO

3.1 Planteamiento del problema

Dadas las necesidades requeridas del nexo agua-energía-alimentos por sector analizado, el problema abordado (**Figura 5**) consiste en determinar un sistema resiliente para el óptimo uso y distribución del agua, energía y alimentos a nivel macroscópico, donde el sector agrícola, domestico, de energía, industrial y ganadero son considerados. Para resolver el problema se propuso la superestructura mostrada en la **Figura 6**, donde las plantas de generación de energía se utilizan para satisfacer las demandas energéticas de los sectores. Así mismo, se propone la instalación de plantas desalinizadoras para abastecer de energía y mitigar las emisiones de CO₂. Las demandas de agua para satisfacer las necesidades de los sectores, así como la generación de energía, son satisfechas por los acuíferos de una región determinada a través de un sistema de tuberías y bombeos.

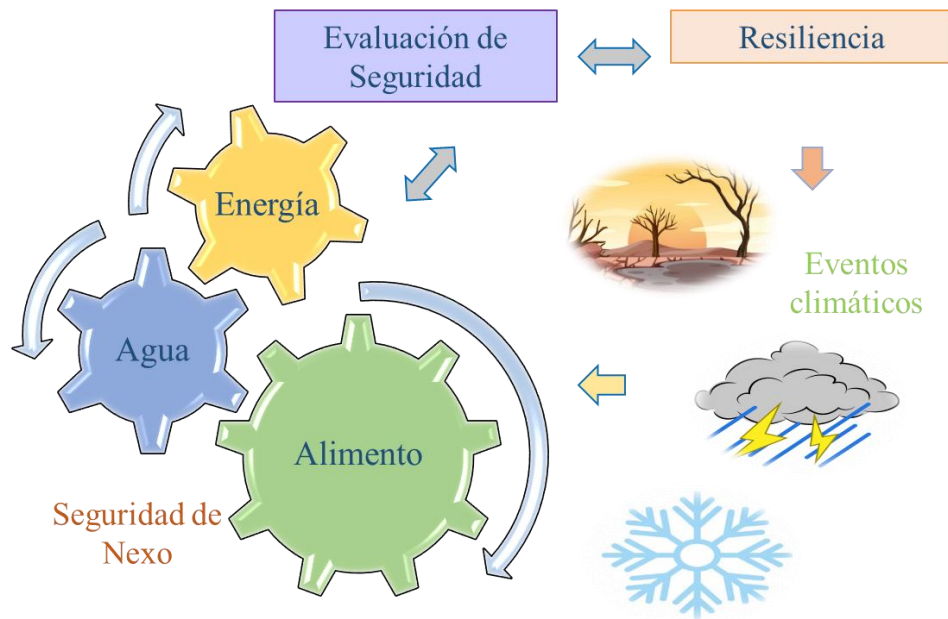


Figura 5. Representación del problema

Además, los alimentos que necesita el sector doméstico pueden ser obtenidos por medio del sector agrícola y/o ganadero, así como biocombustibles en plantas eléctricas y desalinizadoras. Así mismo, se considera la instalación de sistemas de recolección de lluvia para los sectores agrícola, ganadero y doméstico. Se puede utilizar un sistema de gasificación para tratar los residuos sólidos

orgánicos generados por los habitantes de los hogares, mientras que las unidades de tratamiento de agua se pueden utilizar para tratar las aguas grises de los sectores agrícola, doméstico e industrial, también se puede utilizar agua para recargar los acuíferos como opción extrema considerando los costos asociados. Los gases generados por las unidades de tratamiento pueden utilizarse como combustible en plantas de generación de energía. Sin embargo, existe la probabilidad de que algunos desastres naturales afecten el desempeño del problema abordado, por lo que se considera el análisis de la cuantificación de la resiliencia del sistema con el fin de prepararse para tales eventos.

3.2 Superestructura

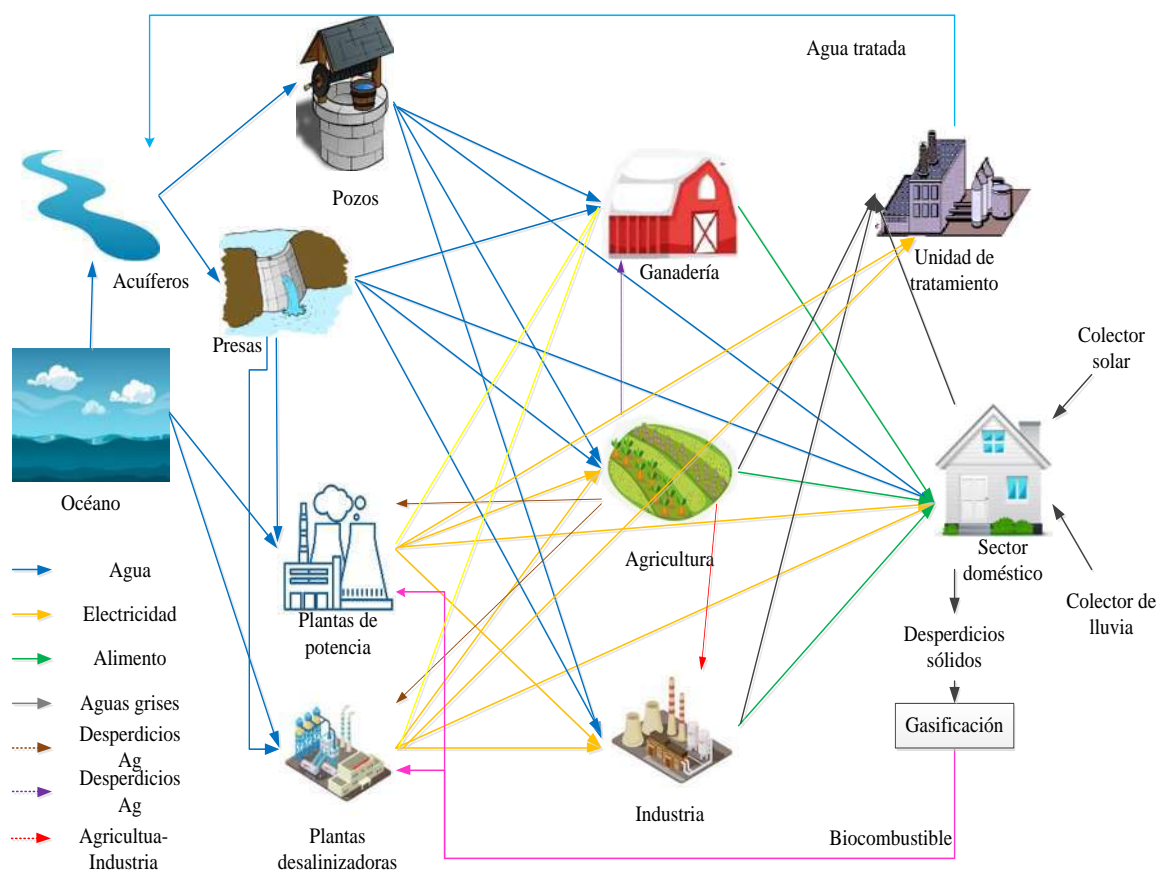


Figura 6. Superestructura propuesta

3.3 Modelo matemático

Para resolver el problema abordado, se propone una formulación de modelo matemático para el análisis sustentable del nexo agua-energía-alimentos basado en la superestructura que se muestra en la **Figura 6**. El modelo matemático es una formulación multi-objetivo, donde los objetivos son la minimización del costo total anual y la minimización de las emisiones generadas por el sistema. Los índices utilizados en el modelo se definen de la siguiente manera: q representa los acuíferos, w son los pozos profundos existentes en la región de estudio, p definen las plantas de potencia existentes, j son las plantas desalinizadoras propuestas a instalar, d representa las presas para la región del caso de estudio; i , h y a definen al sector industrial, doméstico y agrícola, respectivamente. Mientras que l es el sector ganadero y t los periodos de tiempo.

3.3.1 Funciones objetivo

En esta sección se presentan las funciones objetivo consideradas en el modelo de optimización.

3.3.1.1 Costo total anual del sistema

El costo total anual (TAC) es igual al costo de almacenamiento de las presas ($StorageCost_{d,t}^{dam}$), más el costo de almacenamiento en los pozos profundos ($StorageCost_{w,t}^{deep}$), más el costo del sistema de tuberías ($PipingCost$) y bombeo de agua ($PumpingCost$), más el costo total de agua ($WaterCost$), el costo total de energía ($EnergyCost$), el costo de fertilizante ($FertilizerCost_{a,t}$), menos la ganancia ($profit$) que se obtiene por cada uno de los sectores involucrados:

$$TAC = \sum_d \sum_t StorageCost_{d,t}^{dam} + \sum_w \sum_t StorageCost_{w,t}^{deep} + PipingCost + EnergyCost + WaterCost + \sum_a \sum_t FertilizerCost_{a,t} - Profit + Pumpingcost + TotOpCost + TotCapCost \quad (9)$$

3.3.1.2 Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ generadas en el proceso ($GHGC$), son igual a las emisiones de las plantas de desalinización ($GHGC^{des}$) y las plantas de potencia ($GHGC^{plant}$), más las emisiones de

CO₂ generadas por el sector agrícola ($GHGC^{agr}$), el sector industrial ($GHGC^{ind}$) y sector ganadero ($GHGC^{liv}$), respectivamente:

$$GHGC = GHGC^{des} + GHGC^{plant} + GHGC^{agr} + GHGC^{ind} + GHGC^{liv} \quad (10)$$

3.3.2 Restricciones de las funciones objetivo

Las restricciones para las funciones objetivo son descritas en las siguientes secciones:

3.3.2.1 Balances de agua

3.3.2.1.1 Balance de agua en los acuíferos

La cantidad de agua acumulada en un acuífero q en cierto periodo de tiempo t ($F_{q,t}^{aq}$) menos la cantidad existente en el periodo previo ($F_{q,t-1}^{aq}$) es igual a la suma de agua recibida de las plantas de potencia ($F_{p,q,t}^{plant-aq}$), más el agua proveniente de las plantas de desalinización ($F_{j,q,t}^{desalination-aq}$), más el agua obtenida del sector agrícola ($F_{a,q,t}^{agriculture-aq}$), el sector doméstico ($F_{h,q,t}^{domestic-aq}$) y el sector industrial ($F_{i,q,t}^{industrial-aq}$), más el agua de recarga natural ($F_{q,t}^{recharge}$), y la recarga artificial por parte de las presas ($F_{q,d,t}^{dam-aq}$) menos el agua que se envía a los pozos profundos ($F_{w,q,t}^{aq-deep}$).

$$\begin{aligned} F_{q,t}^{aq} - F_{q,t-1}^{aq} = & \sum_p F_{p,q,t}^{plant-aq} + \sum_j F_{j,q,t}^{des-aq} + \sum_a F_{a,q,t}^{agr-aq} + \sum_h F_{h,q,t}^{dom-aq} \\ & + \sum_i F_{i,q,t}^{ind-aq} + F_{q,t}^{recharge} + \sum_d F_{q,d,t}^{dam-aq} - \sum_w F_{w,q,t}^{aq-deep} \quad \forall q \in Q, \forall t \in T, t \neq 1 \end{aligned} \quad (11)$$

3.3.2.1.2 Balance de agua en pozos profundos

El agua en los pozos profundos ($F_{q,w,t}^{aq-deep}$) es distribuida al sector agrícola ($F_{w,a,t}^{deep-agr}$), al sector doméstico ($F_{w,h,t}^{deep-dom}$), al sector industrial ($F_{w,i,t}^{deep-ind}$), y al sector ganadero ($F_{w,c,t}^{deep-liv}$), de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \sum_q F_{q,w,t}^{aq-deep} = & \sum_a F_{w,a,t}^{deep-agr} + \sum_h F_{w,h,t}^{deep-dom} + \sum_i F_{w,i,t}^{deep-ind} \\ & + \sum_c F_{w,c,t}^{deep-liv} \quad \forall w \in W, \forall t \in T \end{aligned} \quad (12)$$

3.3.2.1.3 Balance de agua en presas

El agua de una presa en el periodo de tiempo t ($F_{d,t}^{dam}$) menos el agua en la presa en un periodo de tiempo previo ($F_{d,t-1}^{dam}$) es igual al agua recibida de las plantas de potencia ($F_{p,d,t}^{plant-dam}$) y las plantas desalinizadoras ($F_{j,d,t}^{des-dam}$), más el agua de recarga natural ($F_{d,t}^{recharge}$), menos el agua enviada para la agricultura ($F_{d,a,t}^{dam-agr}$), el sector doméstico ($F_{d,h,t}^{dam-dom}$) y el sector industrial ($F_{d,i,t}^{dam-ind}$), respectivamente, más el agua para el uso ganadero ($F_{d,c,t}^{dam-liv}$) menos el agua enviada a la acuíferos para recarga artificial ($F_{d,q,t}^{dam-aq}$).

$$F_{d,t}^{dam} - F_{d,t-1}^{dam} = \sum_p F_{p,d,t}^{plant-dam} + \sum_j F_{j,d,t}^{des-dam} + F_{d,t}^{recharge} - \sum_a F_{d,a,t}^{dam-agr} + \sum_h F_{d,h,t}^{dam-dom} - \sum_c F_{d,c,t}^{dam-liv} - \sum_i F_{d,i,t}^{dam-ind} - \sum_q F_{d,q,t}^{dam-aq} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (13)$$

3.3.2.1.4 Balance de agua para plantas de potencia y posibles plantas desalinizadoras

El agua que se extrae del mar para las plantas de potencia y las posibles plantas de desalinización [$(F_{p,t}^{plant})$, $(F_{j,t}^{des})$] es igual a la suma del agua enviada para satisfacer los requerimientos del sector agrícola [$(F_{p,a,t}^{plant-agr})$, $(F_{j,a,t}^{des-agr})$], doméstico [$(F_{p,h,t}^{plant-dom})$, $(F_{j,h,t}^{des-dom})$] e industrial [$(F_{p,i,t}^{plant-ind})$, $(F_{j,i,t}^{des-ind})$], más el agua necesaria en la ganadería [$(F_{p,c,t}^{plant-liv})$, $(F_{j,c,t}^{des-liv})$], también el agua de recarga en las presas [$(F_{p,d,t}^{plant-dam})$, $(F_{j,d,t}^{des-dam})$] y acuíferos [$(F_{p,q,t}^{plant-aq})$, $(F_{j,q,t}^{des-aq})$] son considerados, además del agua de retorno al mar como rechazo [$(F_{p,t}^{rejected})$, $(F_{j,t}^{rejected})$].

$$F_{p,t}^{plant} (1 - \alpha) = \sum_a F_{p,a,t}^{plant-agr} + \sum_h F_{p,h,t}^{plant-dom} + \sum_i F_{p,i,t}^{plant-ind} + \sum_c F_{p,c,t}^{plant-liv} + \sum_d F_{p,d,t}^{plant-dam} + \sum_q F_{p,q,t}^{plant-aq} + F_{p,t}^{rejected} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (14)$$

$$F_{j,t}^{des} (1 - \alpha) = \sum_a F_{j,a,t}^{des-agr} + \sum_h F_{j,h,t}^{des-dom} + \sum_i F_{j,i,t}^{des-ind} + \sum_c F_{j,c,t}^{des-liv} + \sum_d F_{j,d,t}^{des-dam} + \sum_q F_{j,q,t}^{des-aq} + F_{j,t}^{rejected} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (15)$$

3.3.2.1.5 Agua de rechazo

El agua de rechazo de las tecnologías de generación de energía y las posibles plantas de desalinización puede calcularse multiplicando el agua de mar por un factor de eficiencia (α) (González-Bravo y col., 2018), este factor se refiere al agua de mar que no se convierte en agua fresca y se define como el flujo de agua que es enviada al mar como rechazo. El rechazo de agua de las plantas de generación de energía se calcula de la siguiente manera:

$$F_{p,t}^{rejected} = \alpha F_{p,t}^{plant} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (16)$$

$$F_{j,t}^{rejected} = \alpha F_{j,t}^{des} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (17)$$

3.3.2.1.6 Balance de agua para los sectores agrícola, doméstico, ganadero e industrial

La necesidad de agua para el sector agrícola, doméstico, ganadero e industrial $[(F_{a,t}^{agr}), (F_{h,t}^{dom}), (F_{c,t}^{liv}), (F_{i,t}^{ind})]$ es igual al agua que proveniente de las presas $[(F_{d,a,t}^{dam-agr}), (F_{d,h,t}^{dam-dom}), (F_{d,c,t}^{dam-liv}), (F_{d,i,t}^{dam-ind})]$, más el agua de los pozos profundos $[(F_{w,a,t}^{deep-agr}), (F_{w,h,t}^{deep-dom}), (F_{w,c,t}^{deep-liv}), (F_{w,i,t}^{deep-ind})]$, y el agua de lluvia $[(F_{a,t}^{Rw-agr}), (F_{h,t}^{Rw-dom}), (F_{c,t}^{Rw-liv})]$. Para el sector industrial, el agua de lluvia no es considerada debido a que en este caso es muy costosa la instalación de este tipo de sistemas, comparado con los otros sectores.

$$F_{a,t}^{agr} = \sum_w F_{w,a,t}^{deep-agr} + \sum_d F_{d,a,t}^{dam-agr} + F_{a,t}^{Rw-Agr} \quad \forall t \in T, \forall a \in A \quad (18)$$

$$F_{h,t}^{dom} = \sum_w F_{w,h,t}^{deep-dom} + \sum_d F_{d,h,t}^{dam-dom} + F_{h,t}^{Rw-dom} \quad \forall t \in T, \forall h \in H \quad (19)$$

$$F_{c,t}^{liv} = \sum_w F_{w,c,t}^{deep-liv} + \sum_d F_{d,c,t}^{dam-liv} + F_{c,t}^{Rw-liv} \quad \forall t \in T, \forall c \in C \quad (20)$$

$$F_{i,t}^{ind} = \sum_w F_{w,i,t}^{deep-ind} + \sum_d F_{d,i,t}^{dam-ind} \quad \forall t \in T, \forall i \in I \quad (21)$$

En la irrigación de los cultivos, no toda el agua es absorbida por los cultivos, por lo cual un porcentaje del agua se filtra a través de la tierra (β) (Núñez-López y col., 2018a), lo cual se dirige hacia los acuíferos ($F_{a,q,t}^{agriculture-aq}$).

$$\sum_q F_{a,q,t}^{agr-aq} = \beta * F_{a,t}^{agr} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (22)$$

El agua residual generada en el sector doméstico es tratada en una unidad anaeróbica para poder ser enviada a los acuíferos, esta unidad de tratamiento tiene un factor de eficiencia (δ) (Núñez-López y col., 2018b), como se muestra a continuación:

$$\sum_q F_{h,q,t}^{dom-aq} = \delta * F_{h,t}^{dom} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (23)$$

3.3.2.1.7 Sistema de recolección de lluvia

Para determinar el agua recolectada en un periodo de tiempo ($F_{h,t}^{rainwater}$) en el sistema de recolección de lluvia, se multiplica el área del sistema de recolección (A_h^{RW}) por la precipitación existente en cada uno de los periodos de tiempo ($Precip_t$).

$$F_{h,t}^{Rw-dom} = A_h^{Rw-dom} . Precip_t \quad \forall h \in H, t \in T \quad (24)$$

El área del sistema de recolección de lluvia está limitada por el área disponible para su instalación.

$$A_h^{Rw-dom} \leq y_h^{RW} A_h^{RW-Max} \quad \forall h \in H \quad (25)$$

El agua residual que se produce en el sector industrial es enviada a una unidad de tratamiento para eliminar contaminantes peligrosos que puedan ser enviados a los acuíferos, esta unidad de tratamiento tiene un factor de eficiencia (λ) (Aguilar-Oropeza y col., 2019):

$$\sum_q F_{i,q,t}^{ind-aq} = \lambda * F_{i,t}^{ind} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (26)$$

3.3.2.2 Generación de energía

La energía generada ($TotalEnergy$) es igual a la suma de la energía generada por las plantas de potencia existentes ($E_{p,t}^{plant}$), más la energía que se genera en las posibles plantas de desalinización ($E_{j,t}^{des}$), donde la producción de energía es diferente en cada uno de los periodos de tiempo, porque la demanda de este recurso es diferente en cada uno de ellos.

$$TotalEnergy = \sum_p E_{p,t}^{plant} + \sum_j E_{j,t}^{des} \quad \forall t \in T \quad (27)$$

El total de energía generada ($TotalEnergy$) por las plantas de potencia y las plantas de desalinización está en función de la energía requerida por el sector agrícola ($E_{a,t}^{agr}$), el sector doméstico ($E_{h,t}^{dom}$), el sector industrial ($E_{i,t}^{ind}$) y el sector ganadero ($E_{c,t}^{liv}$); también la energía requerida para el funcionamiento de las unidades de tratamiento de los sectores agrícola ($E_{a,t}^{treat-agr}$), doméstico ($E_{d,t}^{treat-dom}$) e industrial ($E_{i,t}^{treat-ind}$) es considerada.

$$TotalEnergy = \sum_a E_{a,t}^{agr} + \sum_h E_{h,t}^{dom} + \sum_i E_{i,t}^{ind} + \sum_c E_{c,t}^{liv} + \sum_a E_{a,t}^{treat-agr} + \sum_h E_{h,t}^{treat-dom} + \sum_i E_{i,t}^{treat-ind} \quad \forall t \in T \quad (28)$$

La energía que se produce en las plantas de potencia y en las plantas de desalinización se encuentra en función del agua que se alimenta en ellas, y del combustible fósil.

$$E_{p,t}^{plant} = EPP^{water} \cdot F_{p,t}^{plant} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (29)$$

$$F_{p,t}^{plant} = EPP^{fuel} \cdot F_{p,t}^{fuel-plant} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (30)$$

$$E_{j,t}^{des} = EDP^{water} \cdot F_{j,t}^{des} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (31)$$

$$F_{j,t}^{des} = EDP^{fuel} \cdot F_{j,t}^{fuel-des} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (32)$$

Donde EPP and EDP (González-Bravo y col., 2018) son los factores de eficiencia para las plantas existentes y las nuevas plantas, respectivamente.

$$F_{p,t}^{fuel} = F_{p,t}^{ng} + \sum_a W_{p,t}^{plant} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (33)$$

$$F_{j,t}^{fuel} = F_{j,t}^{ng} + \sum_a W_{j,t}^{des} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (34)$$

3.3.2.2.1 Energía requerida por las unidades de tratamiento

La electricidad requerida para operar las unidades de tratamiento de los sectores agrícola ($E_{a,t}^{treat-agr}$), doméstico ($E_{h,t}^{treat-dom}$) e industrial ($E_{i,t}^{treat-ind}$) se encuentra en función del flujo de agua que es utilizado en cada uno de los sectores:

$$E_{a,t}^{treat-agr} = \varepsilon_1 \cdot F_{a,t}^{agr} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (35)$$

$$E_{h,t}^{treat-dom} = \varepsilon_2 \cdot F_{h,t}^{dom} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (36)$$

$$E_{i,t}^{treat-ind} = \varepsilon_3 \cdot F_{i,t}^{ind} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (37)$$

donde ε_1 , ε_3 (González-Bravo y col., 2018), y ε_2 (Núñez-López y col., 2018c) son los factores asociados a los requerimientos energéticos en las unidades de tratamiento en los sectores agrícola, industrial y doméstico, respectivamente.

La electricidad requerida para satisfacer las necesidades de los sectores doméstico e industrial son constantes para cada periodo de tiempo, mientras que la electricidad requerida por parte de los sectores agrícola y ganadero dependen del flujo de agua requerida por cada sector, como se muestra a continuación:

$$E_{a,t}^{agr} = \phi_1 \cdot F_{a,t}^{agr} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (38)$$

$$E_{c,t}^{liv} = \phi_2 \cdot F_{c,t}^{liv} \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (39)$$

donde ϕ_1 es el factor asociado a la necesidad de electricidad por el sector agrícola para transportar el agua y ϕ_2 es el factor asociado para la electricidad requerida por el sector ganadero.

3.3.2.2 Energía para el sector doméstico

La necesidad de electricidad en el sector doméstico ($E_{h,t}^{dom-demand}$) para satisfacer las necesidades de los habitantes es igual a la electricidad generada por las plantas de potencia ya existentes y las nuevas plantas desalinizadoras ($E_{h,t}^{dom}$), más la electricidad generada por el colector solar ($E_{h,t}^{solar}$).

$$E_{h,t}^{dom-demand} = E_{h,t}^{dom} + E_{h,t}^{solar} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (40)$$

La electricidad generada por el colector solar ($E_{h,t}^{solar}$) está en función de la radiación solar ($SR_{h,t}$) y del área del colector solar ($A_{h,t}^{SC}$).

$$E_{h,t}^{solar} = A_h^{SC} \cdot SR_{h,t} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (41)$$

La dimensión del colector solar se encuentra limitada por el área disponible para la instalación del mismo:

$$A_h^{SC} \leq y_h^{Solar} A_h^{SC-Max} \quad \forall h \in H \quad (42)$$

3.3.2.3 Balance para alimentos

Para evaluar el nexo agua-energía-alimentos, la producción de productos animal y vegetal son considerados, estos son producidos en los sectores agrícola y ganadero, respectivamente, para satisfacer las demandas domésticas de la región, o para su venta a una región externa y obtener una ganancia. De igual manera, se considera el alimento procesado por parte del sector industrial. Estos balances son descritos en las secciones siguientes.

3.3.2.3.1 Alimento vegetal por el sector agrícola

Los vegetales en el sector agrícola ($Veg_{v,a,t}^{agr}$) se producen en función de un parámetro de rendimiento ($Ag_{v,a,t}^{fert}$), del fertilizante que se absorbe en los cultivos ($F_{v,a,t}^{fertabs}$), y del agua absorbida por los mismos ($F_{v,a,t}^{AgVeg}$) (Núñez-López y col., 2018a).

$$Veg_{v,a,t}^{agr} = Ag_{v,a,t}^{fert} F_{v,a,t}^{fertabs} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (43)$$

$$F_{v,a,t}^{fertabs} = Ef_{v,a,t}^{cabs} F_{v,a,t}^{fertot} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (44)$$

$$F_{v,a,t}^{fertot} = Ag_{v,a,t}^{water} F_{v,a,t}^{AgVeg} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (45)$$

$$\sum_v F_{v,a,t}^{fertot} = F_{a,t}^{FertBo} + \sum_i F_{i,a,t}^{FertInd} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (46)$$

El fertilizante absorbido está en función del fertilizante total ($F_{v,a,t}^{fertot}$), el coeficiente de absorción del fertilizante ($Ef_{v,a,t}^{cabs}$), y el coeficiente de agua que absorbe el cultivo ($Ag_{v,a,t}^{water}$) (Núñez-López y col., 2018a). El fertilizante total es calculado por la suma del fertilizante que se compra a un vendedor externo ($F_{a,t}^{FertBo}$) más el fertilizante producido en el sector industrial de la región de estudio ($F_{i,a,t}^{FertInd}$).

Los vegetales que se producen en el sector agrícola ($Veg_{v,a,t}^{agr}$) pueden ser enviados al sector doméstico ($Veg_{a,h,t}^{agr-dom}$) o pueden venderse a una región externa ($Veg_{a,t}^{agr-ext}$).

$$Veg_{v,a,t}^{agr} = Veg_{v,a,t}^{agr-dom} + Veg_{v,a,t}^{agr-ext} \quad \forall a \in A, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (47)$$

Aquí es importante mencionar que los parámetros de rendimiento dependen de cada cultivo y de cada región. Así como también del área de cultivo disponible.

Así también, existe una demanda mínima de alimento ($Veg_{v,a,t}^{min}$) que debe satisfacerse para el sector doméstico. Esto debido a que debe satisfacerse los requerimientos de nutrición humana.

$$Veg_{v,a,t}^{agr-dom} \geq Veg_{v,a,t}^{min} \quad \forall a \in A, \forall v \in V, \forall t \in T \quad (48)$$

En la agricultura, se generan desechos de los cultivos (W_c^{agr}), estos desechos pueden usarse para alimentar animales de ganadería o como combustible en las plantas de potencia o plantas desalinizadoras, esto es modelado con el el siguiente factor ($AgWastes_a$) como se muestra:

$$W_{a,t}^{agr} = AgWastes_a \cdot Veg_{v,a,t}^{agr} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (49)$$

$$W_{a,t}^{agr} = \sum_a W_{c,t}^{liv} + \sum_a W_{p,t}^{plant} + \sum_j W_{j,t}^{des} \quad (50)$$

3.3.2.3.2 Alimento animal en el sector ganadero

El alimento para animales que se produce en el sector ganadero ($Ani_{c,m,t}^{liv}$) está en función de los requerimientos de agua ($F_{c,t}^{liv}$) y energía ($E_{c,t}^{liv}$) requeridos por este sector, de igual manera se consideran los desechos generados en el sector agrícola ($W_{c,t}^{liv}$).

$$\sum_m Ani_{c,m,t}^{liv} = C_1 F_{c,t}^{liv} + C_2 E_{c,t}^{liv} + C_3 \sum_a W_{c,t}^{liv} \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (51)$$

donde C_1 , C_2 , y C_3 son los parámetros de requerimientos para cada una de las necesidades de estos recursos necesarios para producir el alimento animal.

En ese sentido, el alimento animal que se produce en la ganadería ($Ani_{c,m,t}^{liv}$) puede ser enviada para satisfacer las necesidades del sector doméstico ($Ani_{c,h,t}^{liv-dom}$), o puede enviarse para su venta a un comercio externo ($Ani_{c,t}^{liv-ext}$).

$$\sum_m Ani_{c,m,t}^{liv} = \sum_h Ani_{c,h,t}^{liv-dom} + Ani_{c,t}^{liv-ext} \quad \forall c \in C, \forall t \in T \quad (52)$$

De la misma forma que el alimento vegetal, existe una demanda mínima que debe satisfacerse para el alimento animal ($Ani_{c,h,t}^{min-dom}$). Por lo cual se necesita de la siguiente restricción:

$$Ani_{c,h,t}^{liv-dom} \geq Ani_{c,h,t}^{min-dom} \quad \forall c \in C, \forall h \in H, \forall t \in T \quad (53)$$

3.3.2.3.3 Alimento para el sector doméstico

El alimento requerido por el sector doméstico ($Food_{h,t}^{dom}$) depende del número de habitantes de cada uno de los sectores, así como también de la edad y el género de las personas, porque cada persona tiene requerimientos diferentes.

En torno a lo anterior, el alimento total requerido por el sector doméstico es igual al alimento vegetal que se produce en el sector agrícola, más el alimento animal producido en el sector ganadero, más el alimento que se produce en la industria.

$$Food_{h,t}^{dom} = \sum_v \sum_a Veg_{v,a,t}^{agr-dom} + \sum_c Ani_{c,h,t}^{liv-dom} + \sum_i ProdInd_{i,h,t}^{Dom} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (54)$$

3.3.2.3.4 Alimento industrial y producción de fertilizante

En el sector industrial se produce tanto alimento como fertilizante ($ProdInd_{i,t}$) esto está en función del alimento vegetal que se recibe del sector agrícola, de la electricidad ($E_{i,t}^{Ind}$) y del agua ($F_{i,t}^{Ind}$) requerida por este sector, para i igual a 1 y 2, las industrias producen fertilizantes, mientras que para i igual a 3 a 11 se produce alimento.

$$ProdInd_{i,t} = I_i \sum_v \sum_a Veg_{v,a,t}^{Ext} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (55)$$

$$E_{i,t}^{Ind} = Ag_i^{IndE} \sum_v \sum_a Veg_{v,a,t}^{Ext} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (56)$$

$$F_{i,t}^{Ind} = Ag_i^{IndW} \sum_v \sum_a Veg_{v,a,t}^{Ext} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (57)$$

$$ProdInd_{i,t} = \sum_h ProdInd_{i,h,t}^{Dom} + ProdInd_{i,t}^{Ext} + \sum_a F_{i,a,t}^{FertInd} + F_{i,t}^{FertExt} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (58)$$

Ag_i^{IndE} y Ag_i^{IndW} son los parámetros de eficiencia para el agua y la electricidad que se requiere en el sector industrial, $ProdInd_{i,h,t}^{Dom}$ son los productos utilizados por el sector doméstico, $ProdInd_{i,t}^{Ext}$ es el alimento que se envía a un comprador externo, y $F_{i,t}^{FertExt}$ es el fertilizante que se vende externamente.

3.3.2.4 Sistema de gasificación

El sistema de gasificación se utiliza para incinerar los residuos sólidos orgánicos que se generan en el sector doméstico. La generación de estos residuos está en función del número de habitantes

en este sector. El gas de pirolisis que se produce en este sistema (G_t^{gas}) es igual al factor de eficiencia de este sistema (κ) (Núñez-López y col., 2018c) por la cantidad de desechos sólidos que entran en el ($F_t^{solidwaste}$):

$$G_{h,t}^{gas} = \kappa \cdot F_{h,t}^{solidwaste} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (59)$$

3.3.2.5 Costo de capital total

El costo de capital total ($TotCapCost$) se calcula con la suma del costo de capital de las plantas de desalinización ($CapCost_j^{des}$), más el costo de capital de las unidades de tratamiento del sector agrícola ($CapCost_a^{treat}$), del sector doméstico ($CapCost_h^{treat}$) y del sector industrial ($CapCost_i^{treat}$), más el costo del sistema de recolección de lluvia de los sectores agrícola ($CapCost_a^{rw}$) y doméstico ($CapCost_h^{rw}$), más el costo de capital del colector solar ($CapCost_h^{solar}$), y del sistema de gasificación ($CapCost_h^{gas}$).

$$\begin{aligned} TotCapCost = & \sum_j CapCost_j^{des} + \sum_a CapCost_a^{treat} + \sum_h CapCost_h^{treat} \\ & + \sum_i CapCost_i^{treat} + \sum_a CapCost_a^{rw} + \sum_h CapCost_h^{rw} \\ & + \sum_h CapCost_h^{solar} + \sum_h CapCost_h^{gas} \end{aligned} \quad (60)$$

3.3.2.5.1 Existencia de nuevas plantas de desalinización

La existencia de las nuevas plantas desalinizadoras, así como su localización son modeladas a través de variables binarias (y_j^{des}), sí la variable binaria es igual a 1, entonces la planta desalinizadora es necesaria, sí la variable binaria es igual a 0, entonces la planta de desalinización no se necesita, también se debe tener en cuenta una capacidad máxima para esta planta ($Cap_j^{des-max}$), la cual debe ser mayor a la capacidad de la planta instalada (Cap_j^{des}).

$$Cap_j^{des} \leq y_j^{des} \cdot Cap_j^{des-max} \quad (61)$$

El costo de capital para la nueva planta de desalinización ($CapCost_j^{des}$) está en función del costo fijo (Z_j^{des}), del costo variable (U_j^{des}), y de la capacidad de agua requerida (Cap_j^{des}), y de un factor para anualizar la inversión (K_F).

$$CapCost_j^{des} = K_F [y_j^{des} Z_j^{des} + U_j^{des} Cap_j^{des}] \quad \forall j \in J \quad (62)$$

donde $Cap_j^{des-max}$ es mayor que el flujo de agua existente en la nueva planta de desalinización ($F_{j,t}^{des}$) en cualquier periodo de tiempo t .

$$F_{j,t}^{des} \leq Cap_j^{des} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (63)$$

3.3.2.5.2 Existencia de las unidades de tratamiento de agua

La existencia de las unidades de tratamiento de agua para el sector agrícola, doméstico e industrial son modeladas a través de variables binarias, estas variables pueden tomar valor de 0 y 1, si el valor es 1, entonces la unidad es necesaria, por otro si la variable es igual a 0, la unidad no se necesita.

Unidad de tratamiento de agua para el sector agrícola

Se utilizaron las siguientes expresiones para la existencia de la unidad de tratamiento de agua para el sector agrícola:

$$Cap_a^{treat} \leq y_{a,q}^{ag-aq} \cdot Cap_a^{treat-max} \quad (64)$$

$$CapCost_a^{treat} = K_F [y_{a,q}^{ag-aq} Z_a^{treat} + U_a^{treat} Cap_a^{treat}] \quad \forall a \in A \quad (65)$$

$$F_{a,q,t}^{agr-aq} \leq Cap_a^{treat} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (66)$$

donde $Cap_a^{treat-max}$ es la capacidad máxima, Cap_a^{treat} es la capacidad de la unidad de tratamiento de agua $y_{a,q}^{ag-aq}$ es la variable binaria asociada a la unidad de tratamiento, además Z_a^{treat} y U_a^{treat} son los costos fijo y variable, respectivamente.

Unidad de tratamiento de agua para el sector doméstico

Se implementaron las siguientes ecuaciones para modelar la existencia de la unidad de tratamiento en el sector doméstico:

$$Cap_h^{treat} \leq y_{h,q}^{dom-aq} \cdot Cap_h^{treat-max} \quad (67)$$

$$CapCost_h^{treat} = K_F \left[y_{h,q}^{dom-aq} Z_h^{treat} + U_h^{treat} Cap_h^{treat} \right] \quad \forall h \in H \quad (68)$$

$$F_{h,q,t}^{dom-aq} \leq Cap_h^{treat} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (69)$$

donde Cap_h^{treat} y $Cap_h^{treat-max}$ son la capacidad y la capacidad máxima para la unidad de tratamiento del sector doméstico, respectivamente, $y_{h,q}^{dom-aq}$ es la variable binaria utilizada para la existencia de la unidad de tratamiento; mientras que Z_h^{treat} y U_h^{treat} representan los costos fijo y variable.

Unidad de tratamiento de agua para el sector industrial

La existencia de la unidad del tratamiento de agua para el sector industrial se modela de la siguiente manera:

$$Cap_i^{treat} \leq y_{i,q}^{ind-aq} \cdot Cap_i^{treat-max} \quad (70)$$

$$CapCost_i^{treat} = K_F \left[y_{i,q}^{ind-aq} Z_i^{treat} + U_i^{treat} Cap_i^{treat} \right] \quad \forall i \in I \quad (71)$$

$$F_{i,q,t}^{ind-aq} \leq Cap_i^{treat} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (72)$$

donde Cap_i^{treat} y $Cap_i^{treat-max}$ representan la capacidad y la capacidad máxima para la unidad de tratamiento de agua, respectivamente, $y_{i,q}^{ind-aq}$ es la variable binaria asociada a la existencia de la unidad, y Z_i^{treat} y U_i^{treat} son los costos fijo y variable.

3.3.2.5.3 Existencia de los sistemas de recolección de agua

Sector agrícola

La existencia o no del sistema de recolección de agua en el sector agrícola, se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$Cap_a^{rw} \leq y_a^{RW} \cdot Cap_a^{rw-max} \quad (73)$$

$$CapCost_a^{rw} = K_F \left[y_a^{RW} Z_a^{rw} + U_a^{rw} Cap_a^{rw} \right] \quad \forall a \in A \quad (74)$$

$$F_{a,t}^{Rw-agr} \leq Cap_a^{rw} \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (75)$$

donde Cap_a^{rw} representa la capacidad del sistema y Cap_a^{rw-max} representa la capacidad máxima, y_a^{RW} es la variable asociada a la existencia del sistema, y Z_a^{rw} y U_a^{rw} son los costos fijo y variable, respectivamente.

Sector doméstico

Para modelar la existencia del sistema de recolección de agua para el sistema doméstico, se utilizaron las siguientes expresiones:

$$Cap_h^{rw} \leq y_h^{RW} \cdot Cap_h^{rw-max} \quad (76)$$

$$CapCost_h^{rw} = K_F \left[y_h^{RW} Z_h^{rw} + U_h^{rw} Cap_h^{rw} \right] \quad \forall h \in H \quad (77)$$

$$F_{h,t}^{Rw-dom} \leq Cap_h^{rw} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (78)$$

donde Cap_h^{rw} representa la capacidad del sistema y Cap_h^{rw-max} es la máxima capacidad, y_h^{RW} es la variable binaria asociada a la existencia del sistema de recolección de agua, y Z_h^{rw} y U_h^{rw} son los costos fijos y variables, respectivamente.

3.3.2.5.4 Existencia del colector solar

La existencia o no del colector solar se representa con las siguientes relaciones:

$$Cap_h^{solar} \leq y_h^{solar} \cdot Cap_h^{solar-max} \quad (79)$$

$$CapCost_h^{solar} = K_F \left[y_h^{solar} Z_h^{solar} + U_h^{solar} Cap_h^{solar} \right] \quad \forall a \in A \quad (80)$$

$$E_{h,t}^{solar} \leq Cap_h^{solar} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (81)$$

y_h^{solar} es la variable binaria para modelar la existencia del colector solar, Cap_h^{solar} y $Cap_h^{solar-max}$ son la capacidad y capacidad máxima permitida del colector, Z_h^{solar} y U_h^{solar} son los costos fijos y variable, respectivamente.

3.3.2.5.5 Existencia del sistema de gasificación

En las expresiones siguientes se modela la posibilidad de existencia del sistema de gasificación para el tratamiento de desechos sólidos generados en el sector doméstico:

$$Cap_h^{gas} \leq y_h^{gas} \cdot Cap_h^{gas-max} \quad (82)$$

$$CapCost_h^{gas} = K_F \left[y_h^{gas} Z_h^{gas} + U_h^{gas} Cap_h^{gas} \right] \quad \forall h \in H \quad (83)$$

$$S_{h,t}^{solidwaste} \leq Cap_h^{gas} \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (84)$$

y_h^{gas} representa la variable binaria para la existencia del sistema de gasificación, Cap_h^{gas} y $Cap_h^{gas-max}$ son la capacidad y capacidad máxima del sistema, Z_h^{gas} y U_h^{gas} son los costos fijos y variable, respectivamente.

3.3.2.6 Sistema de almacenamiento

El costo de almacenamiento en presas y pozos profundos se calcula de la siguiente manera:

$$StorageCost^{dam} = \sum_t [Z_t^{dam} \sum_d (F_{d,t}^{dam} - F_{d,t-1}^{dam})] \quad (85)$$

$$StorageCost^{deep} = \sum_t [Z_t^{deep} \sum_w (F_{q,w,t}^{aq-deep})] \quad (86)$$

3.3.2.7 Costo de tubería

El costo de tubería se calcula con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 \text{PipingCost} = K_F & \left[\begin{aligned}
 & \sum_p PSP_p \cdot y_p^{sea-plant} + \sum_j PSD_j \cdot y_j^{sea-des} + \sum_q \sum_w PQW_{q,w} \cdot y_{q,w}^{aq-deep} \\
 & + \sum_p \sum_d PPD_{p,d} \cdot y_{p,d}^{plant-dam} + \sum_j \sum_d PJD_{j,d} \cdot y_{j,d}^{des-dam} + \sum_d \sum_a PDA_{d,a} \cdot y_{d,a}^{dam-agr} \\
 & + \sum_d \sum_h PDH_{d,h} \cdot y_{d,h}^{dam-dom} + \sum_d \sum_i PDI_{d,i} \cdot y_{d,i}^{dam-ind} + \sum_d \sum_c PDC_{d,c} \cdot y_{d,c}^{dam-liv} \\
 & + \sum_w \sum_a PWA_{w,a} \cdot y_{w,a}^{deep-agr} + \sum_w \sum_h PWH_{w,h} \cdot y_{w,h}^{deep-dom} + \sum_w \sum_i PWI_{w,i} \cdot y_{w,i}^{deep-ind} \\
 & + \sum_w \sum_c PWC_{w,c} \cdot y_{w,c}^{deep-liv} + \sum_h PHT_h \cdot y_h^{dom-treat} + \sum_a PAT_a \cdot y_a^{agr-treat} \\
 & + \sum_i PIT_i \cdot y_i^{ind-treat} + \sum_a \sum_q PTQ_{a,q} \cdot y_{a,q}^{agr-aq} + \sum_i \sum_q PTQ_{i,q} \cdot y_{i,q}^{ind-aq} \\
 & + \sum_h \sum_q PTQ_{h,q} \cdot y_{h,q}^{dom-aq} + \sum_d \sum_q PDQ_{d,q} \cdot y_{d,q}^{dam-aq} + \sum_p \sum_q PPQ_{p,q} \cdot y_{p,q}^{plant-aq} \\
 & + \sum_p \sum_a PPA_{p,a} \cdot y_{p,a}^{plant-agr} + \sum_p \sum_h PPH_{p,h} \cdot y_{p,h}^{plant-dom} + \sum_p \sum_i PPI_{p,i} \cdot y_{p,i}^{plant-ind} \\
 & + \sum_p \sum_c PPC_{p,c} \cdot y_{p,c}^{plant-liv} + \sum_j \sum_a PJA_{j,a} \cdot y_{j,a}^{des-agr} + \sum_j \sum_h PJH_{j,h} \cdot y_{j,h}^{des-dom} \\
 & + \sum_j \sum_i PJI_{j,i} \cdot y_{j,i}^{des-ind} + \sum_j \sum_c PJC_{j,c} \cdot y_{j,c}^{des-liv}
 \end{aligned} \right] \quad (87)
 \end{aligned}$$

Los parámetros para el cálculo de costo de tubería se calculan con la expresión $k_m LD^p$, donde L es la longitud de la tubería, D^p es el diámetro de la tubería, k_m es un parámetro de costo de tubería que depende del material del cual está fabricado. (González-Bravo y col., 2018).

Los valores para determinar los costos de tubería se calculan de la siguiente manera: se utiliza una variable binaria para determinar la existencia de la tubería y también se utiliza para activar los costos de tubería para las capacidades máximas usadas en todos los periodos de tiempo. Por ejemplo, para determinar la tubería desde el océano hacia las plantas de potencia:

$$F_{p,t}^{plant} \leq F^{plant-max} \cdot y_p^{sea-plant} \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (88)$$

Todos los términos de la **Ecuación (87)** se calculan de la misma manera que la **Ecuación (88)**.

3.3.2.8 Costo de agua

El costo de agua (*WaterCost*) es igual a la suma del flujo de agua de cada uno de los sectores involucrados por el costo unitario del agua en cada uno de los sectores.

$$WaterCost = \sum_t \left[\begin{aligned} &WA_t \sum_a F_{a,t}^{agr} + WD_t \sum_h F_{h,t}^{dom} \\ &+ WI_t \sum_i F_{i,t}^{ind} + WC_t \sum_c F_{c,t}^{liv} \end{aligned} \right] \quad (89)$$

3.3.2.9 Costo de energía

El costo de energía (*EnergyCost*) es igual que la suma del flujo de energía utilizado en cada uno de los sectores por el precio unitario de energía en cada uno de los sectores.

El costo de la energía total se calcula de la siguiente manera:

$$EnergyCost = \sum_t \left[\begin{aligned} &EA_t \sum_a E_{a,t}^{agr} + ED_t \sum_h E_{h,t}^{dom} \\ &+ EI_t \sum_i E_{i,t}^{ind} + EC_t \sum_c E_{c,t}^{liv} \end{aligned} \right] \quad (90)$$

3.3.2.10 Costo de bombeo

Los parámetros necesarios para el costo de bombeo se calculan con la expresión de Darcy-

Weisbach: $PumpingCostFactor = \frac{1}{0.0000576} f \frac{L \text{ (hours)} (\$/kWh)}{D^5 \eta}$, donde f es el factor de

fricción, L es la longitud de tubería, D es el diámetro interno de la tubería y η es la eficiencia combinada de motor y bombeo.

El costo de bombeo puede calcularse con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 PumpingCost = H_y & \left[\sum_p \sum_t PuSP_{p,t} \cdot F_{p,t}^{plant} + \sum_j \sum_t PuSD_{j,t} \cdot F_{j,t}^{des} + \sum_q \sum_w \sum_t PuQW_{q,w,t} \cdot F_{q,w,t}^{aq-deep} \right. \\
 & + \sum_p \sum_d \sum_t PuPD_{p,d,t} \cdot F_{p,d,t}^{plant-dam} + \sum_j \sum_d \sum_t PuJD_{j,d,t} \cdot F_{j,d,t}^{des-dam} + \sum_d \sum_a \sum_t PuDA_{d,a,t} \cdot F_{d,a,t}^{dam-agr} \\
 & + \sum_d \sum_h \sum_t PuDH_{d,h,t} \cdot F_{d,h,t}^{dam-dom} + \sum_d \sum_i \sum_t PuDI_{d,i,t} \cdot F_{d,i,t}^{dam-ind} + \sum_d \sum_c \sum_t PuDC_{d,c,t} \cdot F_{d,c,t}^{dam-liv} \\
 & + \sum_w \sum_a \sum_t PuWA_{w,a,t} \cdot F_{w,a,t}^{deep-agr} + \sum_w \sum_h \sum_t PuWH_{w,h,t} \cdot F_{w,h,t}^{deep-dom} + \sum_w \sum_i \sum_t PuWI_{w,i,t} \cdot F_{w,i,t}^{deep-ind} \\
 & + \sum_w \sum_c \sum_t PuWC_{w,c,t} \cdot F_{w,c,t}^{deep-liv} + \sum_h \sum_t PuHT_{h,t} \cdot F_{h,t}^{dom} + \sum_a \sum_t PuAT_{a,t} \cdot F_{a,t}^{agr} \\
 & + \sum_i \sum_t PuIT_{i,t} \cdot F_{i,t}^{ind} + \sum_a \sum_q \sum_t PuTQ_{a,q,t} \cdot F_{a,q,t}^{agr-aq} + \sum_i \sum_q \sum_t PuTQ_{i,q,t} \cdot F_{i,q,t}^{ind-aq} \\
 & + \sum_h \sum_q \sum_t PuTQ_{h,q,t} \cdot F_{h,q,t}^{dom-aq} + \sum_d \sum_q \sum_t PuDQ_{d,q,t} \cdot F_{d,q,t}^{dam-aq} + \sum_p \sum_i \sum_t PuPQ_{p,i,t} \cdot F_{p,i,t}^{plant-aq} \\
 & + \sum_p \sum_a \sum_t PuPA_{p,a,t} \cdot F_{p,a,t}^{plant-agr} + \sum_p \sum_h \sum_t PuPH_{p,h,t} \cdot F_{p,h,t}^{plant-dom} + \sum_p \sum_i \sum_t PuPI_{p,i,t} \cdot F_{p,i,t}^{plant-ind} \\
 & + \sum_p \sum_c \sum_t PuPC_{p,c,t} \cdot F_{p,c,t}^{plant-liv} + \sum_j \sum_a \sum_t PuJA_{j,a,t} \cdot F_{j,a,t}^{des-agr} + \sum_j \sum_h \sum_t PuJH_{j,h,t} \cdot F_{j,h,t}^{des-dom} \\
 & \left. + \sum_j \sum_i \sum_t PuJI_{j,i,t} \cdot F_{j,i,t}^{des-ind} + \sum_j \sum_c \sum_t PuJC_{j,c,t} \cdot F_{j,c,t}^{des-liv} \right] \quad (91)
 \end{aligned}$$

3.3.2.11 Costo total de operación

El costo total de operación ($TotOpCost$) es igual al costo de operación de las nuevas plantas de desalinización ($OpCost_{j,t}^{des}$), más el costo de operación de las plantas existentes ($OpCost_{p,t}^{plant}$), más el costo de operación de las unidades de tratamiento de los sectores agrícola ($OpCost_{a,t}^{treat}$), industrial ($OpCost_{i,t}^{treat}$) y doméstico ($OpCost_{h,t}^{treat}$), más el costo de operación del sistema de recolección de lluvia del sector agrícola ($OpCost_{a,t}^{rw}$) y del sector doméstico ($OpCost_{h,t}^{rw}$), más el costo de operación del colector solar ($OpCost_{h,t}^{solar}$) y del sistema de gasificación ($OpCost_{h,t}^{gas}$).

$$\begin{aligned}
 TotOpCost = & OpCost_{j,t}^{des} + OpCost_{p,t}^{plant} + OpCost_{a,t}^{treat} + \\
 & OpCost_{i,t}^{treat} + OpCost_{h,t}^{treat} + OpCost_{a,t}^{rw} + \\
 & OpCost_{h,t}^{rw} + OpCost_{h,t}^{solar} + OpCost_{h,t}^{gas} \quad (92)
 \end{aligned}$$

3.3.2.11.1 Costo de operación de las plantas de desalinización

El costo de operación de las plantas desalinizadoras ($OpCost_{j,t}^{des}$) está en función del costo unitario de operación (Z_j^{des-o}), la cantidad de agua que se extrae del océano ($F_{j,t}^{des}$), el factor de recuperación ($1-\alpha$), y las horas de operación en el año (H_Y).

$$OpCost_{j,t}^{des} = H_Y [Z_j^{des-o} (1-\alpha) F_{j,t}^{des}] \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (93)$$

3.3.2.11.2 Costo de operación de plantas existentes

El costo de operación de las plantas existentes ($OpCost_{p,t}^{plant}$) está en función del agua total extraída desde el océano por cada planta existente ($F_{p,t}^{plant}$), el factor de recuperación del agua ($1-\alpha$) y del costo unitario de operación ($Z_{p,t}^{plant-o}$).

$$OpCost_{p,t}^{plant} = H_Y [Z_{p,t}^{plant-o} (1-\alpha) F_{p,t}^{plant}] \quad \forall p \in P, \forall t \in T \quad (94)$$

3.3.2.11.3 Costo de operación para la unidad de tratamiento de agua del sector agrícola

El costo de operación para la unidad de tratamiento ($OpCost_{a,t}^{treat}$) está en función del costo unitario de operación ($Z_{a,t}^{treat-o}$) por el flujo de agua que es enviado desde el sector agrícola hasta los acuíferos ($F_{a,q,t}^{agr-aq}$).

$$OpCost_{a,t}^{treat} = H_Y [Z_{a,t}^{treat-o} F_{a,q,t}^{agr-aq}] \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (95)$$

3.3.2.11.4 Costo de operación para la unidad de tratamiento industrial

El costo de operación de esta unidad ($OpCost_{i,t}^{treat}$) es igual al costo unitario de operación de esta unidad ($Z_{i,t}^{treat-o}$) por el flujo de agua que es enviado desde las industrias al acuífero ($F_{i,q,t}^{ind-aq}$).

$$OpCost_{i,t}^{treat} = H_Y [Z_{i,t}^{treat-o} F_{i,q,t}^{ind-aq}] \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (96)$$

3.3.2.11.5 Costo de operación de la unidad de tratamiento doméstica

El costo de operación de la unidad de tratamiento ($OpCost_{h,t}^{treat}$) se calcula con la siguiente expresión:

$$OpCost_{h,t}^{treat} = H_Y \left[Z_{h,t}^{treat-o} F_{h,q,t}^{dom-aq} \right] \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (97)$$

donde $Z_{h,t}^{treat-o}$ es el costo unitario de tratamiento y $F_{h,q,t}^{dom-aq}$ es la cantidad de agua que es enviada desde el sector doméstico hacia los acuíferos.

3.3.2.11.6 Costo de operación del sistema de recolección de agua en la agricultura

Para el sistema de recolección de agua para el sector agrícola, el costo de operación ($OpCost_{a,t}^{rw-agr}$) se determina con la siguiente ecuación:

$$OpCost_{a,t}^{rw-agr} = H_Y \left[Z_{a,t}^{rw-o} F_{a,t}^{rw-agr} \right] \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (98)$$

$Z_{a,t}^{rw-o}$ es el costo unitario de recolección y $F_{a,t}^{rw-agr}$ es el agua recolectada por el sistema.

3.3.2.11.7 Costo de operación del sistema de recolección de agua para uso doméstico

El costo de operación del sistema de recolección de agua ($OpCost_{h,t}^{rw-dom}$) es determinado mediante la siguiente expresión:

$$OpCost_{h,t}^{rw-dom} = H_Y \left[Z_{h,t}^{rw-o} F_{h,t}^{rw-dom} \right] \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (99)$$

$Z_{h,t}^{rw-o}$ es el costo unitario de recolección y $F_{h,t}^{rw-dom}$ es el agua recolectada por el sistema.

3.3.2.11.8 Costo de operación del colector solar

El costo de operación del colector solar ($OpCost_{h,t}^{solar}$) está en función del costo unitario del sistema solar por la energía captada por el sistema.

$$OpCost_{h,t}^{solar} = H_Y \left[Z_{h,t}^{solar-o} E_{h,t}^{solar} \right] \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (100)$$

$Z_{h,t}^{solar-o}$ es el costo unitario de la energía recolectada y $E_{h,t}^{solar}$ es la energía captada por el sistema.

3.3.2.11.9 Costo de operación del sistema de gasificación

El costo de operación del sistema de gasificación ($OpCost_{h,t}^{gas}$) es igual al costo unitario de tratamiento de sólidos ($Z_{h,t}^{gas-o}$) por la cantidad de sólidos que entra al sistema ($F_{h,t}^{solidwaste}$).

$$OpCost_{h,t}^{gas} = H_Y \left[Z_{h,t}^{gas-o} F_{h,t}^{solidwaste} \right] \quad \forall h \in H, \forall t \in T \quad (101)$$

3.3.2.12 Costo de fertilizante

El costo total del fertilizante ($FertilizerCost$) está en función del total de fertilizante utilizando en los cultivos ($F_{a,t}^{fertilizer}$) por el costo unitario del fertilizante ($Z_t^{fertilizer}$).

$$FertilizerCost = \sum_t \left[Z_t^{fertilizer} \sum_a F_{a,t}^{fertilizer} \right] \quad (102)$$

3.3.2.13 Ganancia

La ganancia se calcula con la suma de los ingresos de los sectores agrícola, ganadero e industrial:

$$Profit = Profit^{agr} + Profit^{liv} + Profit^{ind} \quad (103)$$

$$Profit^{agr} = H_Y \sum_t \left[\sum_v CD_{v,t} \sum_v \sum_a Veg_{v,a,t}^{agr-dom} + \sum_v CE_{v,t} \sum_v \sum_a Veg_{v,a,t}^{agr-ext} \right] \quad (104)$$

$$Profit^{liv} = H_Y \sum_t \left[AD_{m,t} \sum_c Ani_{c,m,t}^{liv-dom} + AE_{m,t} \sum_c Ani_{c,t}^{liv-ext} \right] \quad (105)$$

$$Profit^{ind} = \sum_t \left[FI_t \sum_a F_{i,a,t}^{fertind} + FE_t \sum_h F_{i,t}^{fertext} + PD_t \sum_i ProdInd_{i,h,t}^{dom} + PE_t \sum_c ProdInd_{i,t}^{ext} \right] \quad (106)$$

3.3.2.14 Emisiones

Las emisiones de CO₂ generadas en el sistema ($GHGC$) son igual a las emisiones que se producen en las plantas de desalinización ($GHGC^{des}$) y plantas existentes ($GHGC^{plant}$), más las emisiones de los sectores agrícola ($GHGC^{agr}$), industrial ($GHGC^{ind}$) y ganadero ($GHGC^{liv}$). Donde, cada término se calcula de la siguiente manera:

$$GHGC^{des} = \frac{CO_2^{des} \cdot \sum_j \sum_t F_{j,t}^{des}}{DY_j} \quad (107)$$

$$GHGC^{plant} = \frac{CO_2^{plant} \cdot \sum_p \sum_t F_{p,t}^{plant}}{PY_p} \quad (108)$$

$$GHGC^{agr} = \frac{CO_2^{agr} \cdot \sum_v \sum_a \sum_t F_{v,a,t}^{ferttot}}{AY_a} \quad (109)$$

$$GHGC^{ind} = \frac{CO_2^{ind} \cdot \sum_i \sum_t F_{i,t}^{ind}}{IY_i} \quad (110)$$

$$GHGC^{liv} = \frac{CO_2^{liv} \cdot \sum_c \sum_m \sum_t Ani_{c,m,t}^{liv}}{CY_{c,m}} \quad (111)$$

CO_2 es un factor de emisión para cada sector. Mientras que, PY_p , AY_a , IY_i , y $CY_{c,m}$ representan la contribución de emisión por parte de cada uno de los sectores.

3.4 Caso de estudio

Para demostrar la aplicabilidad del modelo matemático se propuso un caso de estudio de la zona noroeste de México. Específicamente, se consideró la región hidrológica número 10, la cual cubre aproximadamente el 85% del estado de Sinaloa. En esta región, existen 4 plantas de generación de energía disponibles, una en el municipio de Mazatlán, y las otras 3 en el puerto de Topolobampo. Además, para satisfacer las demandas de agua de los sectores agrícola, doméstico, ganadero e industrial de la región, se tomaron en cuenta, 8 acuíferos, 11 presas y 27 pozos profundos. Para el análisis del caso de estudio se consideraron las 3 principales ciudades del estado: Culiacán, Mazatlán y Los Mochis, las cuales cuentan con [858,638], [438,434] y [231,977] habitantes, respectivamente. Para el sector industrial se consideraron los principales 11 parques industriales de la región (**Tabla 6**). Los sectores agrícolas tomados en cuenta fueron los municipios de Ahome, Guasave, Navolato, Culiacán y Sinaloa de Leyva; mientras que las zonas ganaderas están localizadas en Choix, El fuerte, Sinaloa de Leyva, Mocorito, Culiacán, Escuinapa, Elota, Concordia

y Mazatlán. De igual manera se consideró la instalación de tres posibles plantas desalinizadoras en El Coloradito, Altata y Las Arenitas.

Tabla 6. Parques industriales de la región

Sector Industrial	Localización
Parque Industrial El Trébol	Culiacán
Parque Industrial Alfredo V. Bonfil	Mazatlán
Parque Industrial Canacintra	Culiacán
Parque Industrial Canacintra II	Culiacán
Parque Industrial La Primavera	Culiacán
Parque Industrial Ecológico de Los Mochis	Los Mochis
Parque Industrial Pesquero y Portuario de Topolobampo	Topolobampo
Parque Industrial Mazatlán	Mazatlán
Parque Industrial Costa Rica	Costa Rica
Parque Industrial Guasave	Guasave
Parque Tecnológico de Sinaloa	Culiacán

3.5 Resultados

Se codificó y resolvió el modelo matemático para el nexa agua-energía-alimentos en el *software* GAM (Brooke y col., 2022), utilizando los datos de un caso de estudio de la zona agrícola más importante del país en una computadora de 32 GB de RAM con un tiempo de cómputo aproximadamente de 20 segundos por escenario. Es un modelo entero mixto-lineal que consta de 24,413 ecuaciones, 29,815 variables continuas y 1,331 variables binarias. La finalidad es minimizar ambos objetivos, ambos sujetos a ciertas restricciones.

Se construyó la Curva Pareto (**Figura 7**) mediante el método de Epsilon Constraint (Laumanns y col., 2006) donde en primera instancia se minimizó el costo total anual obteniendo el escenario A, posteriormente se minimizaron las emisiones de CO₂ (escenario G). Se fijaron 5 puntos intermedios de emisiones de CO₂ entre estos dos escenarios y se minimizó el costo total anual en cada uno de estos puntos para generar los escenarios B, C, D, E y F respectivamente.

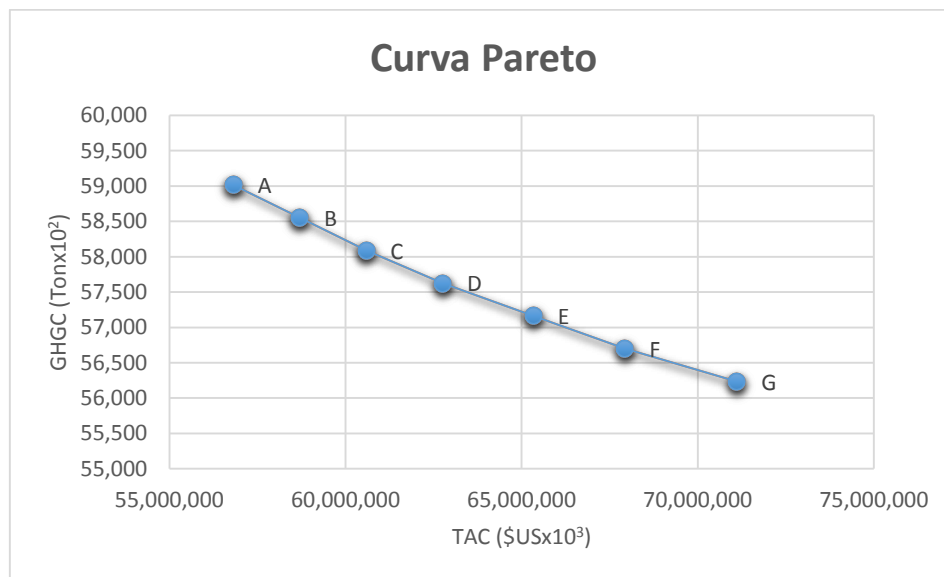


Figura 7. Curva Pareto para el caso de estudio

En la **Tabla 7** se muestra el costo total anual de cada uno de los escenarios, así como también los ingresos y costos de tubería y bombeo. En la **Tabla 8** puede observarse las emisiones de CO₂ generadas y el porcentaje emitido por los sectores: agrícola, ganadero, industrial y para la generación de energía (tanto de plantas de potencia existentes, como de las plantas de desalinización propuestas).

En base a los resultados, se seleccionaron los **escenarios A, C y G** para evaluar la resiliencia de dichos escenarios, debido a que son aquellos que presentan mayor diferencia en sus configuraciones, es decir en el **escenario A** no es necesario la instalación de ninguna planta de desalinización, mientras que en el **escenario G** se considera la instalación de dos nuevas plantas para disminuir las emisiones de CO₂ y en el **escenario C** solo una nueva planta de desalinización es propuesta.

Tabla 7. Valores económicos para los escenarios del caso de estudio

Escenario	TAC (\$USx10 ³)	Ingresos (\$USx10 ³)	Costo de Tubería (\$US)	Costo de Bombeo (\$USx10 ²)
A	56,820,828	28,890,500	27,024	1,386,332
B	58,705,121	28,890,500	40,776	1,450,581
C	60,591,014	28,890,500	38,726	1,531,378
D	62,769,708	28,890,500	39,394	1,606,018
E	65,338,914	28,890,500	38,999	1,666,535
F	67,939,389	28,890,500	38,698	1,726,159
G	71,119,354	28,890,500	37,949	1,791,693

Tabla 8. Valores ambientales para los escenarios del caso de estudio

Escenario	GHGE (Ton)	Agricultura (Ton)	Ganadería (Ton)	Industria (Ton)	Plantas Desalinizadoras (Ton)	Plantas Existentes (Ton)
A	5,901,331	15.9656	0.0305	0.0572	0.0000	83.9468
B	5,855,002	16.0919	0.0307	0.0576	11.9040	71.9157
C	5,808,674	16.2202	0.0310	0.0581	23.9986	59.6921
D	5,762,345	16.3506	0.0312	0.0586	36.2856	47.2740
E	5,716,016	16.4832	0.0315	0.0590	48.7735	34.6528
F	5,669,688	16.6178	0.0317	0.0595	61.4655	21.8254
G	5,623,359	16.7548	0.0320	0.0602	74.3666	8.7865

En tanto, en la **Tabla 9** se muestran los servicios funcionales totales generados por los distintos sectores analizados.

Tabla 9. Servicios funcionales de cada uno de los sectores analizados

Escenario	Agricultura (Ton)	Ganadería (Ton)	Industria (Ton)	Energía Desalinizadoras (kWh)	Energía Plantas (kWh)	Energía Solar (kWh)
A	3,666,102	432	139,188	0	24,062,100	2,434,128
C	3,666,102	432	139,188	7,220,640	15,941,490	2,434,128
G	3,666,102	432	139,188	21,662,100	2,400,033	2,434,128

Se consideraron 3 fenómenos naturales característicos de la región del caso de estudio analizado: Heladas, sequías e inundaciones. La ocurrencia de estos fenómenos genera ciertas probabilidades de falla para las plantas de potencia y de desalinización, así como también las pérdidas de cultivos y animales debido a las condiciones climáticas no adecuadas para la generación de los mismos. Multiplicando los costos de penalización por las probabilidades de ocurrencia de algún fenómeno natural se obtuvieron los siguientes gráficos:

En caso del **escenario A**, se puede observar en la **Figura 8** correspondiente a la incidencia de una helada que los periodos de tiempo de enero y diciembre son aquellos en los que se tendría un mayor costo de penalización si llegaran a afectarse los servicios funcionales con \$US 17,461,000 y \$US 19,549,000, respectivamente. Si llegase a darse alguna sequía (**Figura 9**), debido a las probabilidades se obtiene que los mayores costos de penalización se tendrían en los meses de abril y mayo con \$US 11,798,000 y \$US 17,426,000, respectivamente. Mientras que en caso de que ocurra una inundación (**Figura 10**), los costos más grandes son previstos para los tiempos de agosto con \$US 18,410,000 y para septiembre con \$US 21,786,000. En las figuras mostradas, PP hace referencia a planta de potencia y PD a planta desalinizadora; el número que acompañan dicha nomenclatura se refiere a la cantidad de plantas de este tipo que presentan una perturbación en cada uno de los periodos de tiempo.

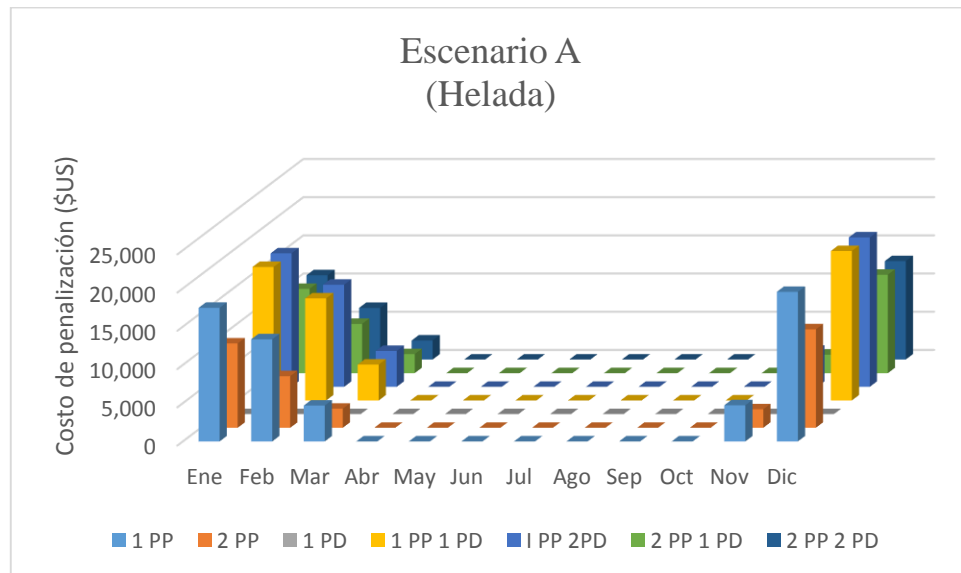


Figura 8. Costos de penalización para el escenario A en caso de una helada

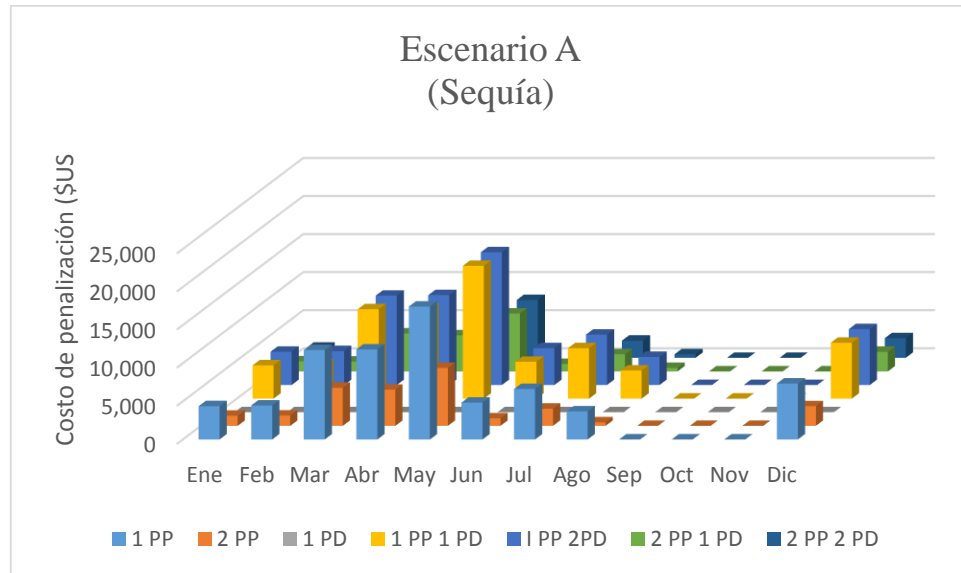


Figura 9. Costos de penalización para el escenario A en caso de una sequía

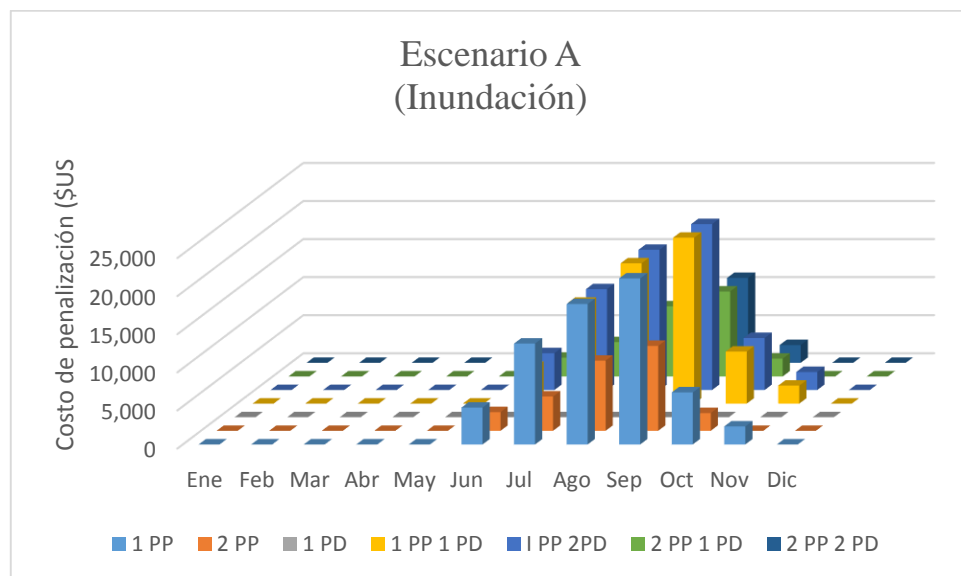


Figura 10. Costos de penalización para el escenario A en caso de una inundación

Para el **escenario C**, la **Figura 11** nos muestra el caso de que ocurra alguna helada observándose de igual manera que en el **escenario A** un costo de penalización mayor en los meses de enero y diciembre con un valor de \$US 73,410,000 y \$US 150,482,000, respectivamente. La **Figura 12** representa el caso en que ocurre una sequía, abril y mayo presentan un costo de penalización de \$US 159,114,000 y \$US 195,934,000, respectivamente. Por otro lado, la **Figura 13** se refiere al caso de que exista alguna inundación, el periodo de

tiempo de agosto es donde se presenta el más grande costo de penalización con un valor de \$US 377,288,000, seguido por julio con un valor de \$US 259,961,000.

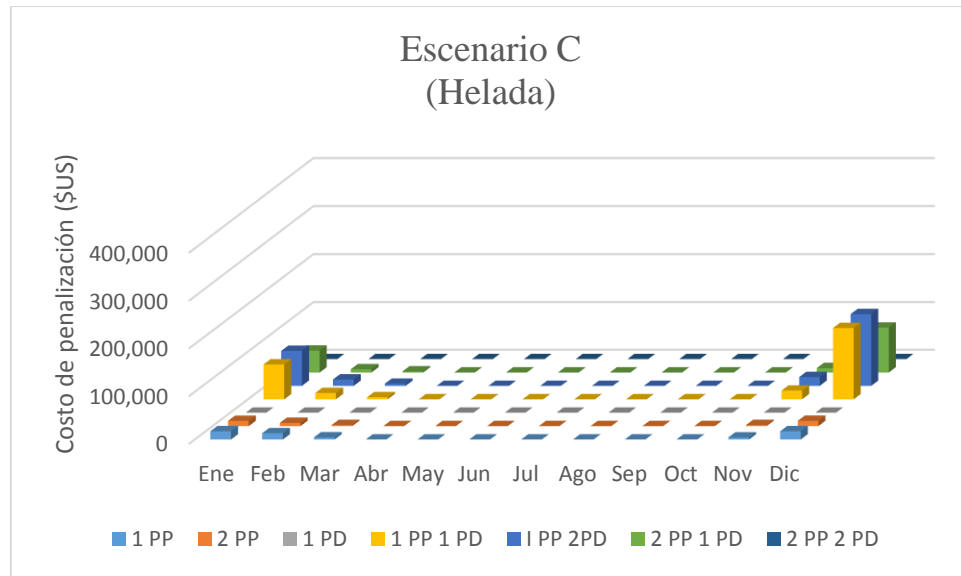


Figura 11. Costos de penalización para el escenario C en caso de una helada

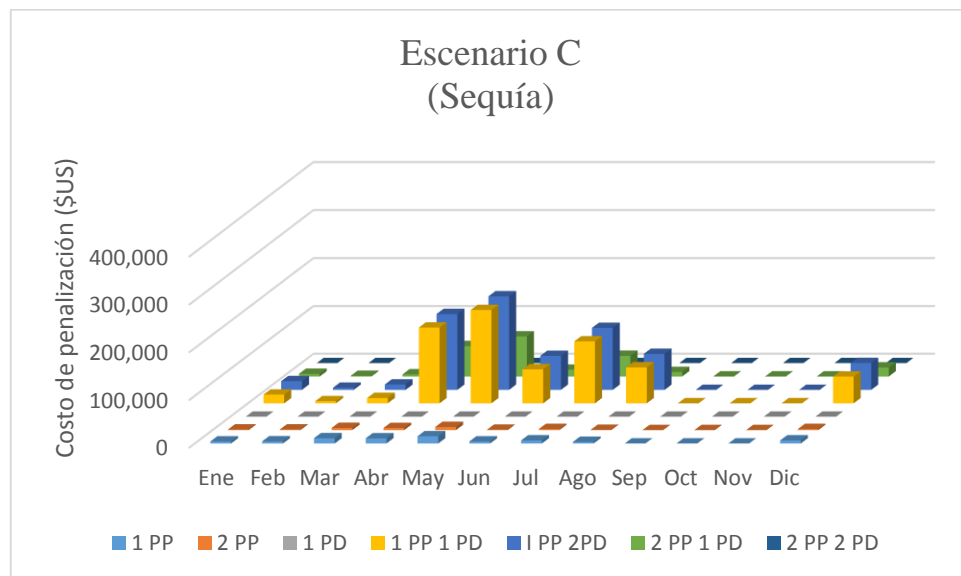


Figura 12. Costos de penalización para el escenario C en caso de una sequía

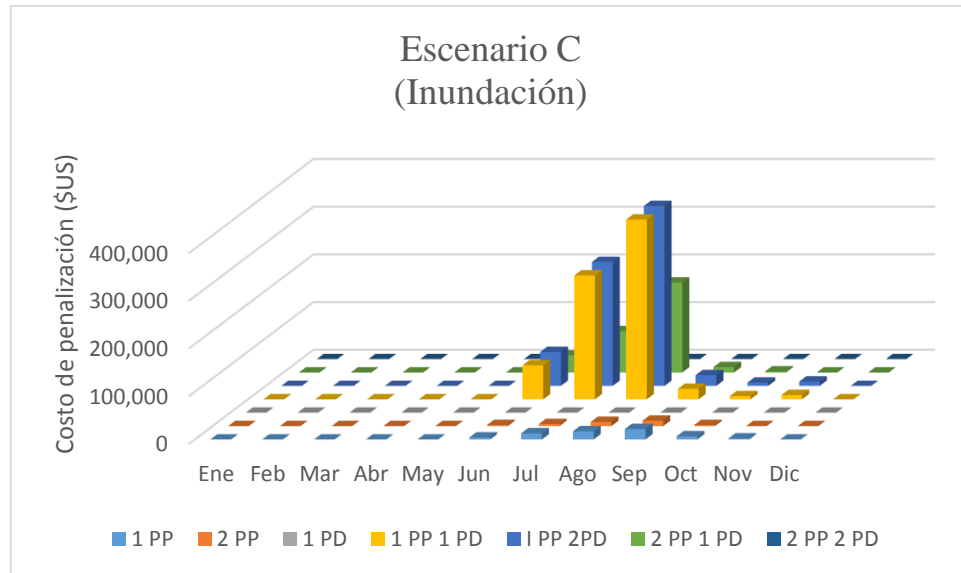


Figura 13. Costos de penalización para el escenario C en caso de una inundación

Por otro lado, para el **escenario G**, las **Figuras 14, 15 y 16** representan el caso de ocurrencia de igual manera de una helada, sequía e inundación, respectivamente. En la **Figura 14**, los mayores costos de penalización se presentan en enero con \$US 873,760,000 y en diciembre con \$US 883,734,000. Para la **Figura 15**, el valor más grande es en mayo con \$US 861,967,000, mientras que en el caso de la **Figura 16** el costo de penalización más alto se presenta en el mes de septiembre con \$US 1,079,736,000.

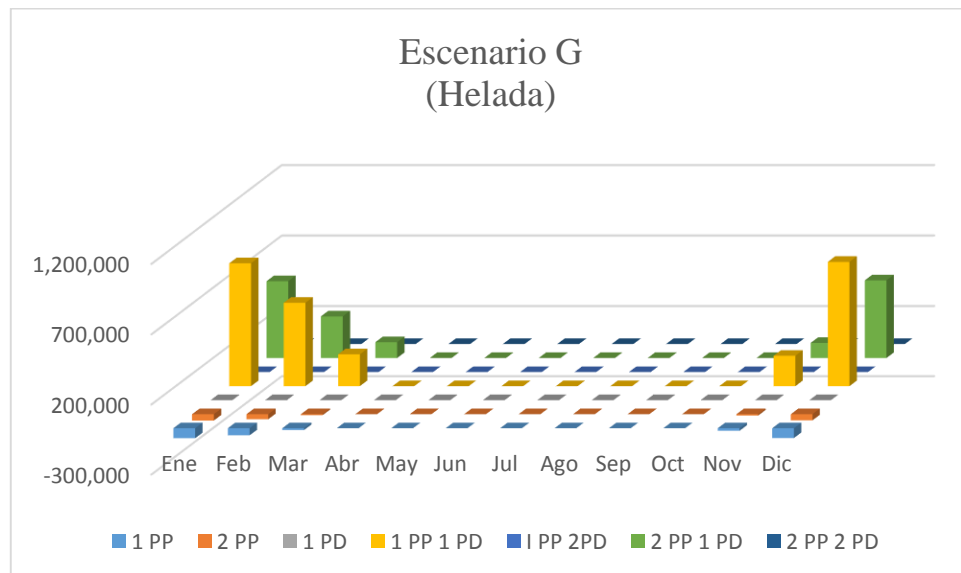


Figura 14. Costos de penalización para el escenario G en caso de una helada

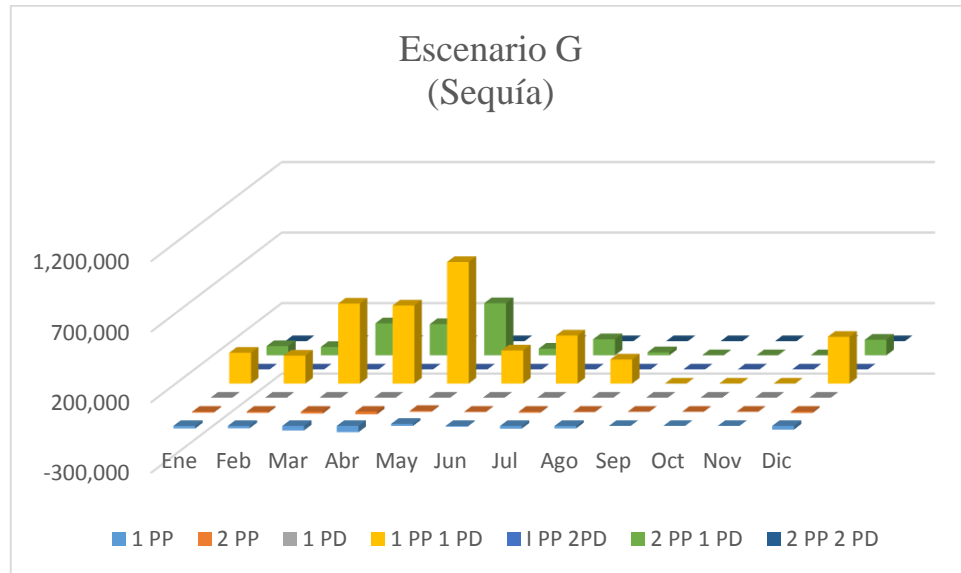


Figura 15. Costos de penalización para el escenario G en caso de una sequía

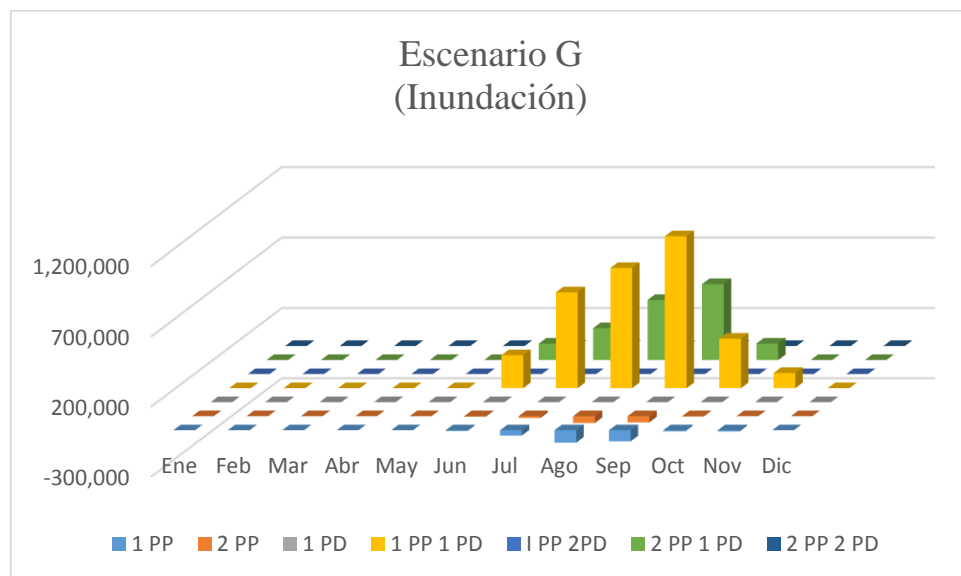


Figura 16. Costos de penalización para el escenario G en caso de una inundación

Nótese que en las últimas tres figuras mencionadas existen valores negativos, estos se deben a la relajación de algunas restricciones al momento de tomar en cuentas las fallas de operación de algunas de las unidades de proceso. De igual manera pueden observarse algunos valores de 0, en estos casos son escenarios en que debido a las fallas de los componentes no se puede satisfacer por completo las demandas de los sectores analizados en este problema, por lo cual un estudio

importante sería la toma de decisión sobre a qué sector sería más importante darle los recursos disponibles.

Aunado a lo anterior, se calcularon los índices de resiliencia mediante el costo total de cierto periodo respecto al costo total mayor para cada uno de los escenarios, obteniéndose los mínimos valores mostrados en la **Tabla 10**.

Tabla 10. Valores mínimos de índices de resiliencia para los casos de estudio

Escenario	Índice de Resiliencia		
	Helada	Sequía	Inundación
A	0.9959	0.9963	0.9954
C	0.9702	0.9612	0.9250
G	0.8510	0.8550	0.8180

3.6 Conclusiones

Se formuló un modelo matemático para optimizar el nexo agua-energía-alimento a nivel macroscópico. Se analizó e implementó una metodología para cuantificar la resiliencia de los procesos para mejorar la funcionalidad de los mismos y satisfacer las necesidades de la mejor manera posible. Se presentó un caso de estudio. Cuyos resultados muestran que en caso del mejor escenario económico (escenario A) se utilizan las 4 plantas de potencia existentes, en caso de que una o dos unidades fallen, el sistema aún podría satisfacer las demandas correspondientes a cada uno de los sectores; sin embargo, la instalación de una planta nueva en El Coloradito pudiera aumentar la eficiencia del sistema. Para el escenario C, las 4 plantas de potencia existentes son requeridas, además de la instalación de una planta de desalinización; de igual manera se podría mejorar el índice de resiliencia de este escenario instalando dos plantas desalinizadoras en lugar de una, o un sistema de red de interconexión de tubería más compleja. Por otro lado, el escenario que representa la mejor solución ambiental (escenario G), se necesita de las 4 plantas de potencia, además de la instalación de las 3 plantas desalinizadoras propuestas; sin embargo, en caso de que dos unidades energéticas fallen simultáneamente, el sistema no sería capaz de cumplir con las restricciones ambientales a las cuales se encuentra sujeto.

4. OPTIMIZACIÓN DE LA RESILIENCIA EN EL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS

4.1 Planteamiento del problema

En la **Figura 17** se muestra una representación esquemática del problema planteado, el cual consiste en determinar la mejor configuración de un sistema nexo agua-energía-alimentos, donde se busca satisfacer las necesidades de estos recursos en una región determinada. El uso y el manejo del agua son a través de los acuíferos existentes en la región y mediante un sistema de tuberías y bombeo; mientras que la energía se satisface a través de plantas termoeléctricas localizadas en esta misma región. De igual manera se considera la posibilidad de instalar nuevas plantas desalinizadoras para la generación de energía. Para cubrir las necesidades de alimentos, se consideran los sectores agrícola, ganadero e industrial, donde se requiere de agua y energía para la producción de los mismos. En los sectores agrícola y ganadero se generan desechos orgánicos, los cuales pueden utilizarse como combustibles en las tecnologías de generación de energía. Por otro lado, se toman en cuenta unidades de tratamiento de agua, las cuales se utilizan para eliminar contaminantes que inflijan las normas ambientales de vertederos de desperdicios a los acuíferos, y utilizar estos flujos de agua como recarga artificial de los acuíferos en casos extremos donde estos llegan a un nivel crítico. Para resolver el problema planteado se propuso la superestructura de la **Figura 18**.

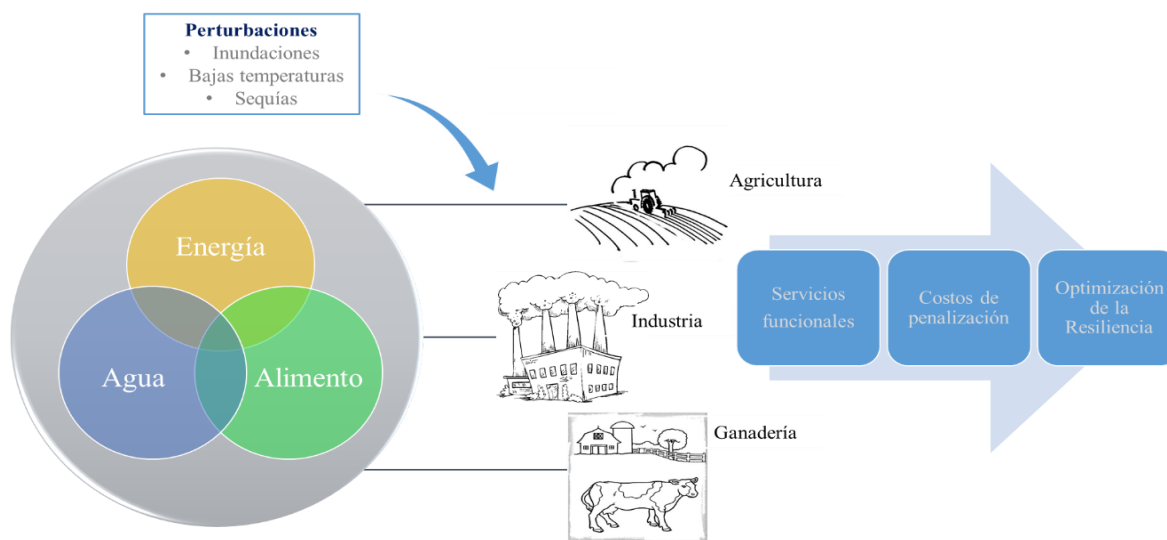


Figura 17. Planteamiento del problema

4.2 Superestructura

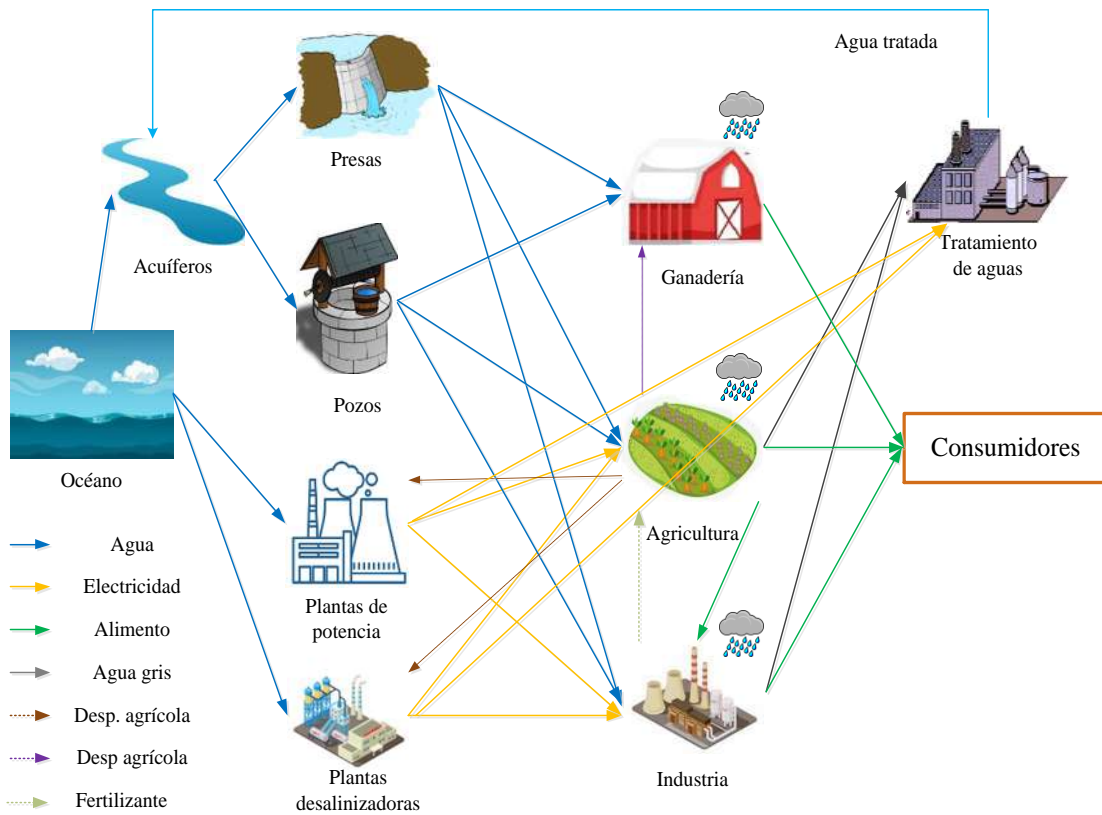


Figura 18. Superestructura modificada

Se realizaron algunas modificaciones a la superestructura propuesta (**Figura 6**) en la sección 3.2 en donde el sector doméstico ya no es considerado. En este planteamiento, los objetivos son maximizar la ganancia por la venta de productos de los sectores agrícola, industrial y ganadero, y minimizar las emisiones de CO₂ del sistema.

4.3 Modelo matemático

Basándose en la superestructura de la **Figura 18**, se desarrolló un modelo mixto-entero no lineal, el cual consiste en 18,757 ecuaciones, 21,755 variables continuas, 1,225 variables binarias y 163 términos no lineales. Es un modelo multi-objetivo donde se busca maximizar la ganancia total del sistema (**Ecuación 112**) y minimizar las emisiones de CO₂ (**Ecuación 113**). De igual manera se maximizó la resiliencia del sistema.

$$\text{Max Profit} = \text{ProfitAg} + \text{ProfitInd} + \text{ProfitLiv} - \text{TAC} \quad (112)$$

$$\text{Min GHGC} = \text{GHGC}^{\text{Ag}} + \text{GHGC}^{\text{Ind}} + \text{GHGC}^{\text{Liv}} + \text{GHGC}^{\text{Plant}} + \text{GHGC}^{\text{Des}} \quad (113)$$

Los términos del lado derecho se pueden terminar con las **ecuaciones 104-111**, las cuales se muestran las secciones 3.3.2.13 y 3.3.2.14.

Para considerar el impacto que tienen los desastres naturales en el rendimiento de los sectores involucrados, se agregaron al modelo matemático variables binarias ($Y_{f,t}$) para modelar la existencia de estos fenómenos en cada uno de los periodos de tiempo (**Ecuaciones 114-118**). Se utilizaron los índices f para el caso de las posibles fallas y s para los sectores involucrados.

La disyunción en la **Ecuación 114** muestra los valores de producción para cada sector en cada periodo de tiempo, cuando se presenta un desastre natural y cuando no se presenta.

$$\left[\begin{array}{l} Y_{f,t} = 0 \\ \text{RiskIndex}_{f,t} = 0 \\ ND_{f,t} = 1 \\ Pro_{s,t} = \text{Yield}_{s,t} \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{l} Y_{f,t} = 1 \\ \text{RiskIndex}_{f,t} = \text{RiskIndex}_{f,t} \\ ND_{f,t} = 1 - \text{RiskIndex}_{f,t} \\ Pro_{s,t} = \text{Yield}_{s,t} / ND_{f,t} \end{array} \right] \quad (114)$$

En la **Ecuación 115**, se muestra un parámetro ($ND_{f,t}$), el cual hace referencia al decremento en el rendimiento de la producción de los sectores debido a la ocurrencia de un desastre natural. Cuando existe la presencia de un desastre natural, el valor para la variable binaria agregada es igual a 1, entonces el valor para el parámetro es a 1 menos el riesgo asociado a ese fenómeno ($\text{RiskIndex}_{f,t}$), por otro lado cuando no hay presencia de un desastre natural, la variable binaria es igual a 0 y $ND_{f,t}$ es igual a 1, lo que representa que la producción por parte de los sectores no se ve afectada por ningún desastre natural.

$$ND_{f,t} = [1 - (Y_{f,t} \cdot \text{RiskIndex}_{f,t})] \quad f \forall F, s \forall S, t \forall T \quad (115)$$

En las ecuaciones 116 a 118, se muestran las expresiones utilizadas para calcular la producción de los sectores agrícola, industrial y ganadero, respectivamente. La producción del sector agrícola

($YieldAg_t$) es igual a la suma del producto de cada uno de los cultivos en cada uno de los distritos agrícolas considerados en todos los periodos de tiempo.

$$YieldAg_t = \sum_a \sum_c Pcs_{c,a,t} \quad f \forall F, s \forall S, t \forall T \quad (116)$$

En caso del sector industrial ($YieldInd_t$), existe la posibilidad de producir alimento ($ProIndFood_{r,i,t}$), así como también fertilizantes ($F^{FertilizerInd}_{i,a,t}$), los cuales son utilizados en el sector agrícola.

$$YieldInd_t = \sum_r \sum_i ProIndFood_{r,i,t} + \sum_i \sum_a F^{FertilizerInd}_{i,a,t} \quad f \forall F, s \forall S, t \forall T \quad (117)$$

La producción en el sector ganadero ($YieldLiv_t$) es igual a la suma de las clases de alimento animal por cada uno de los sectores ganaderos tomados en cuenta en cada uno de los periodos de tiempo.

$$YieldLiv_t = \sum_l \sum_m AniLiv_{l,m,t} \quad f \forall F, s \forall S, t \forall T \quad (118)$$

En lo particular, para maximizar la resiliencia del sistema, se utiliza la expresión mostrada (**Ecuación 119**), donde se utiliza la ganancia de cada escenario correspondiente, y el valor máximo y mínimo que esta variable puede tomar.

$$Max \quad Re = \frac{Profit - Profit^{Min}}{Profit^{Max} - Profit^{Min}} \quad (119)$$

Las restricciones del modelo de optimización son las mismas del modelo presentado en la sección 3.3, exceptuando las ecuaciones relacionadas con el sector doméstico.

4.4 Caso de estudio

Se seleccionó un caso de estudio del estado de Sinaloa en México (**Figura 19**) para mostrar la aplicabilidad del modelo matemático propuesto. Nótese que Sinaloa se encuentra en la parte noroeste del país, es el estado agrícola más importante en la región, por lo cual es de suma importancia evaluar el nexo agua-energía-alimentos en esta área.



Figura 19. Caso de estudio

Es de relevancia saber que la agricultura en Sinaloa, constituye el 11% del producto interno bruto (PIB) del estado. El estado es el primer productor orientado a la exportación de productos como tomate, pepino, mango y pepinillo. Este sector emplea el 23% de la población económicamente activa de Sinaloa. Este estado está ubicado en la región irrigada de México, un sistema agropecuario que cubre grandes extensiones de tierras áridas en toda la región norte y central del país. La presencia de infraestructura de riego permite un grado relativamente alto de intensificación de la producción. Entre los productos agrícolas más importantes en Sinaloa se encuentran: maíz, garbanzo, tomate, frijol, trigo y pepino. Por otro lado, debido a la intensificación de esta actividad, aproximadamente el 80% de las emisiones de efecto invernadero generadas en el estado, son por parte de este sector, debido al uso de los fertilizantes. La razón principal para el análisis de esta región es porque Sinaloa es un pilar fundamental para la economía del país.

Los eventos extremos que afectan la agricultura en Sinaloa son sequías, granizo, heladas y fluctuaciones inusuales de temperatura. Se espera que estos eventos aumenten en severidad y frecuencia. La agricultura de Sinaloa es muy vulnerable a eventos extremos ya que muchos agricultores lo están experimentando por primera vez. Las proyecciones climáticas señalan que para el año 2030 las temperaturas en Sinaloa aumentaran hasta en 1.7 °C y la precipitación disminuirá hasta en 71 mm. Dado que la agricultura de Sinaloa le suministra al resto de México cultivos de primera necesidad, los impactos de las condiciones climáticas extremas en el sector

agrícola van más allá de las fronteras estatales hasta afectar la seguridad alimentaria de la población nacional.

4.5 Resultados

En este caso, los valores de los servicios funcionales (agua, energía y alimentos) son variables de optimización. Los costos de penalización asociados a cada uno de los servicios funcionales se muestran en la **Tabla 11** (Núñez-López y col. 2021). Para calcular las ganancias para cada uno de los sectores de acuerdo a la metodología propuesta, la producción individual de cada uno de ellos se multiplicó por un costo unitario específico. Subsecuentemente, se resolvieron distintos escenarios, primero se maximizó la ganancia total del sistema, así como también las ganancias individuales de cada uno de los sectores, posteriormente se minimizaron las emisiones de CO₂, los resultados tanto para la parte económica como la ambiental se muestran en la **Tabla 12**:

De igual manera, se evaluó la resiliencia de los escenarios que se muestran en la **Tabla 12**, en la tabla puede observarse que los escenarios donde se maximiza la ganancia total y la ganancia individual del sector agrícola son exactamente iguales; ambos tienen un índice de resiliencia igual a 1, lo cual indica que son escenarios que pueden recuperar la funcionalidad total de su sistema a un bajo costo. Por otro lado, se observa en el escenario donde se minimizan las emisiones de efecto invernadero que tiene un índice de resiliencia de 0, esto debido a que la cuantificación de la resiliencia se enfoca solamente en la parte económica del sistema.

Tabla 11. Costos de penalización para servicios funcionales

Cultivo	Período de tiempo (t)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Agricultura												
Maíz	111	114	120	121	131	126	112	115	110	116	122	127
Frijol	975	919	844	806	675	619	619	675	675	694	619	694
Trigo	137	134	134	148	157	167	155	167	152	154	155	160
Sorgo	127	131	127	123	131	123	105	117	116	115	120	124
Papa	413	413	413	413	413	413	413	413	413	413	413	413
Cártamo	568	563	560	551	589	590	556	540	524	517	536	531
Soja	304	306	319	319	319	334	281	277	255	259	272	291
Algodón	1,481	1,488	1,492	1,444	1,369	1,350	1,358	1,369	1,350	1,350	1,350	1,350
Tomate	615	615	615	615	615	615	615	615	615	615	615	615
Sandía	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
Melón	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450

	Garbanzo	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
Energía	Sector	Período de tiempo (t)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Agricultura	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	Ganadería	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
	Industrial	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	
Producto industrial	Industrial	Período de tiempo (t)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	1	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560
	2	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560
	3	137	134	134	148	157	167	155	167	152	154	155	160
	4	127	131	127	123	131	123	105	117	116	115	120	124
	5	413	413	413	413	413	413	413	413	413	413	413	413
	6	568	563	560	551	589	590	556	540	524	517	536	531
	7	304	306	319	319	319	334	281	277	255	259	272	291
	8	1,481	1,488	1,492	1,444	1,369	1,350	1,358	1,369	1,350	1,350	1,350	1,350
	9	615	615	615	615	615	615	615	615	615	615	615	615
	10	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300
11	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	
Ganadería	Ganado	Período de tiempo (t)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Bovino	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192	1,192
	Porcino	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014	1,014
	Aves	932	932	932	932	932	932	932	932	932	932	932	932
Otros	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	
Agua	Sector	Período de tiempo (t)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Agricultura	0.72	0.72	0.72	0.72	0.81	0.81	0.89	0.89	0.81	0.81	0.72	0.72
	Ganadería	0.76	0.76	0.76	0.76	0.87	0.87	0.97	0.97	0.87	0.87	0.76	0.76
Industrial	1.37	1.37	1.37	1.37	1.58	1.58	1.63	1.63	1.58	1.58	1.37	1.37	

Tabla 12. Valores para la ganancia y emisiones de CO₂ para el caso modificado

	Escenarios					
	Max Profit	Max Profit ^{Ag}	Max Profit ^{Ind}	Max Profit ^{Liv}	Min Profit	Min GHGC
Profit (\$USx10 ³)	770,726	770,726	441,918	1,000	1,000	1,000
Profit ^{Ag} (\$USx10 ³)	271,288	271,288	265,995	82,079	191,733	58,195
Profit ^{Ind} (\$USx10 ³)	458,205	458,205	459,098	115,060	333,097	132,492
Profit ^{Liv} (\$USx10 ³)	882,479	882,479	334,446	1,069,740	280,437	205,214
TAC (\$US)	841,246	841,246	617,621	1,265,879	804,267	394,901
Re	1.000	1.000	0.573	0.000	0.000	0.000
GHGC (Ton x10 ³)	8,418	8,418	3,641	10,303	2,741	1,888
GHGC ^{Ag} (Ton x10 ³)	217	217	217	83	159	67
GHGC ^{Ind} (Ton x10 ³)	34	34	34	9	25	10
GHGC ^{Liv} (Ton x10 ³)	6,319	6,319	2,488	8,100	1,889	1,381
GHGC ^{Plant} (Ton x10 ³)	1,848	1,848	902	2,111	668	430
GHGC ^{Des} (Ton x10 ³)	0	0	0	0	0	0

Como es conocido, los desastres naturales representan el mayor problema al cual se enfrentan los sectores mencionados anteriormente, debido a esto se evaluó la resiliencia del sistema para cada uno de los escenarios generados en la primera parte de la formulación del modelo matemático. Posteriormente a las modificaciones, se consideró la resiliencia del sistema como función objetivo compuesta de la ganancia total del sistema (**Ecuación 119**).

Al considerar como función objetivo la resiliencia del sistema, algunas variables binarias para la posible ocurrencia de desastres naturales (helada, inundación y sequía) fueron implementadas, dichas variables influyen en la producción de los sectores considerados. Matemáticamente algunos

términos bilineales fueron generados, haciendo que el modelo matemático se convierta en un modelo mixto entero-no lineal.

Respecto a lo anterior, en la **Tabla 13** se muestran los resultados para los objetivos en caso de la ocurrencia de alguno de los desastres naturales:

Tabla 13. Ganancias en caso de la ocurrencia de algún fenómeno natural

	Escenarios		
	Helada	Sequía	Inundación
Profit (\$USx10 ³)	741,180	732,138	732,138
ProfitAg (\$USx10 ³)	271,288	271,288	271,288
ProfitInd (\$USX10 ³)	448,434	448,433	448,434
ProfitLiv (\$USx10 ³)	803,497	771,622	771,621
TAC (\$US)	782,039	759,205	759,205
Re	0.962	0.950	0.950
GHGC (Ton x10 ³)	7,693	7,426	7,427
GHGC ^{Ag} (Ton x10 ³)	217	217	217
GHGC ^{Ind} (Ton x10 ³)	36	35	36
GHGC ^{Liv} (Ton x10 ³)	5,736	5,523	5,523
GHGC ^{Plant} (Ton x10 ³)	1,704	1,651	1,651
GHGC ^{Des} (Ton x10 ³)	0	0	0

En tanto, en la **Tabla 14** se muestra la producción individual por cada uno de los distritos de los diferentes sectores analizados. Donde puede observarse como las configuraciones para los escenarios donde puede ocurrir una inundación o una sequía son prácticamente iguales, con una

ligera variación en el rendimiento del sector ganadero. Aunado a eso, en caso de que ocurra alguna baja temperatura, la producción del sector ganadero es mayor en todos los distritos, respecto al caso de que ocurran los otros fenómenos naturales mencionados anteriormente. Este escenario presenta un índice de resiliencia mayor, lo cual soporta el rendimiento mayor que se muestra en la tabla mencionada.

Tabla 14. Producción por cada distrito de cada sector en tonelada/año

Industrial	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Inundación	360,818	97,530	352,402	111,463	55,732	83,598	118,430	139,329	83,598
Sequía	360,192	97,704	351,791	111,661	55,831	83,746	118,640	139,577	83,746
Baja temp.	360,818	97,530	352,402	111,463	55,732	83,598	118,430	139,329	83,598
Ganadero	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Inundación	145,479	139,083	154,634	149,739	166,080	139,070	139,070	150,240	142,150
Sequía	142,768	139,083	154,634	149,739	166,080	139,070	139,070	150,240	142,150
Baja temp.	147,040	156,519	159,131	149,358	166,490	148,900	156,890	150,240	142,150
Agrícola	1	2	3	4	5				
Inundación	3,052	1,212	4,632	528,000	796				
Sequía	3,052	1,212	4,632	528,000	796				
Baja temp.	3,052	1,212	4,632	528,000	796				

Industrial: 1.El trébol, 2.Alfredo V. Bonfill, 3.Canacintra, 4.Canacintra II, 5.Ecológico Los Mochis 6.La primavera, 7. Topolobampo, 8.Mazatlán, 9.Costa Rica, 10.Guasave, 11.Tec. Sinaloa

Ganadero: 1. Choix, 2. Concordia, 3. Culiacán, 4. El Fuerte, 5. Elota, 6. Escuinapa, 7. Mazatlán, 8.Mocorito, 9. Sinaloa

Agrícola: 1. Ahome, 2. Culiacán, 3. Guasave, 4. Navolato, 5. Sinaloa

Nótese como el sistema puede considerarse altamente resiliente debido a que, en presencia de los desastres naturales considerados, la producción por parte de los sectores no se ve tan afectada, logrando acercarse al escenario que presenta la mayor ganancia económica. En el escenario donde existe una inundación, puede observarse una disminución del 4% en la ganancia total, respecto a la ganancia total en el caso donde ningún fenómeno natural se presenta; mientras que en caso de que exista alguna baja temperatura o una sequía, se tiene un 5% de reducción de la ganancia total.

De igual manera puede observarse en las **Tablas 12 y 13** como en ninguno de los escenarios se selecciona alguna de las plantas de desalinización propuesta para su instalación, esto es debido a que la necesidad de electricidad de estos sectores no es tan grande como lo era en caso del sector

doméstico, por lo cual no existe una relación de coste-beneficio entre el costo de instalación de las plantas y la reducción de emisiones que pueda obtenerse por medio de ellos. En las **Figuras 20 y 21** se muestra la producción de cada uno de los sectores de los escenarios presentados, cuando existe un desastre natural, así como cuando no existe, respectivamente; y en las **Figuras 22 y 23**, se muestra el consumo de agua de cada uno de los sectores para cada uno de los escenarios presentados.

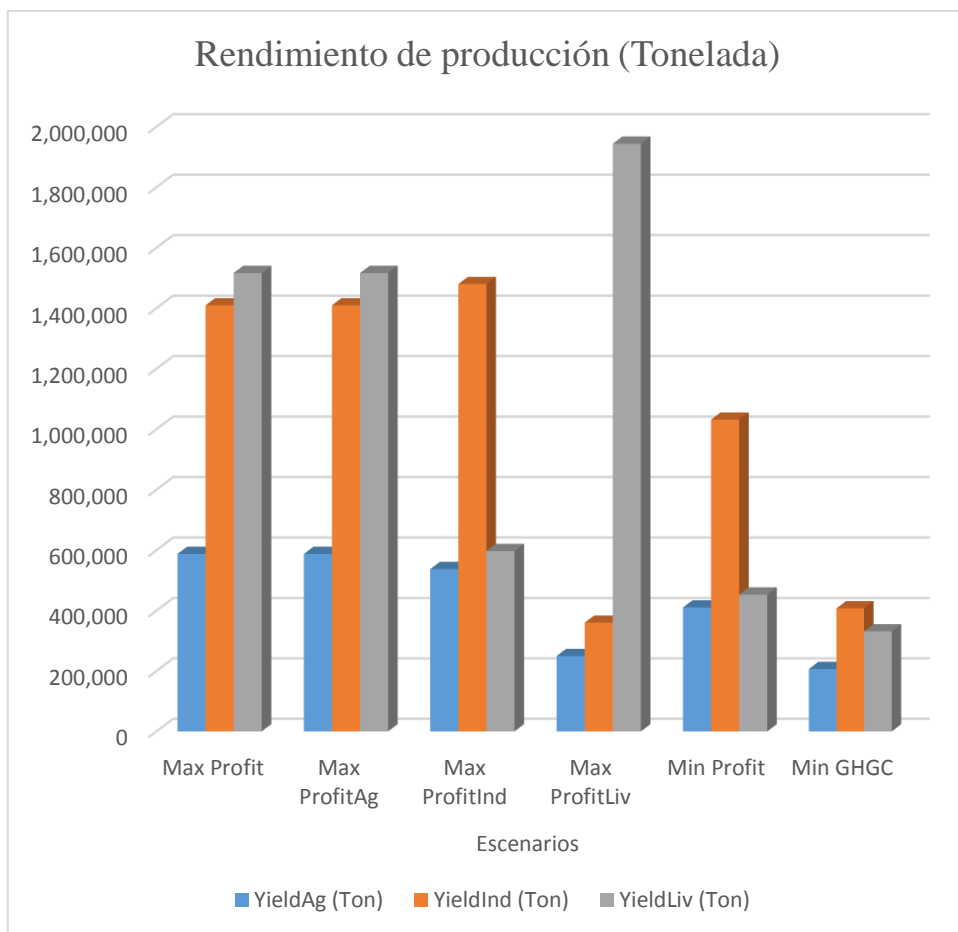


Figura 20. Producción de sectores

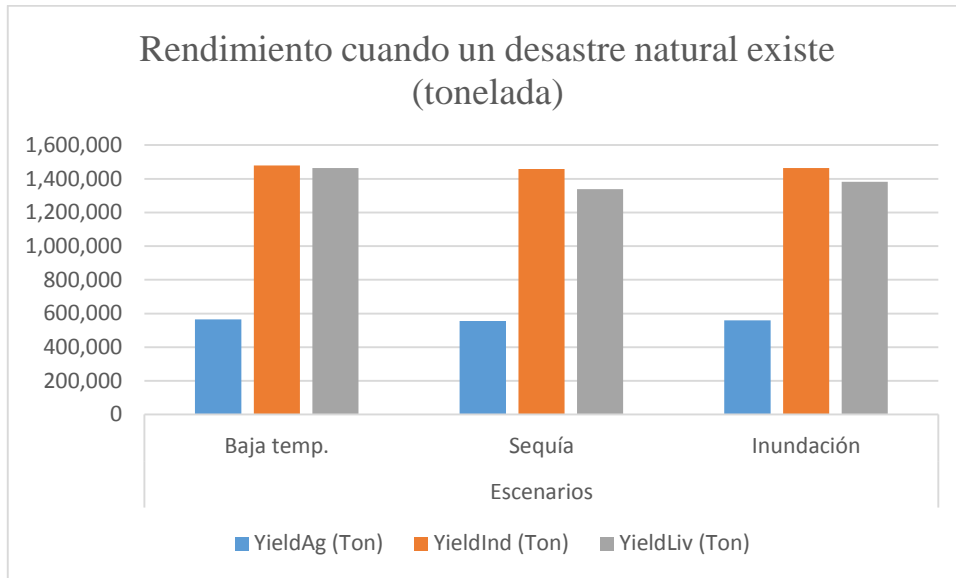


Figura 21. Producción de sectores cuando ocurre un desastre natural

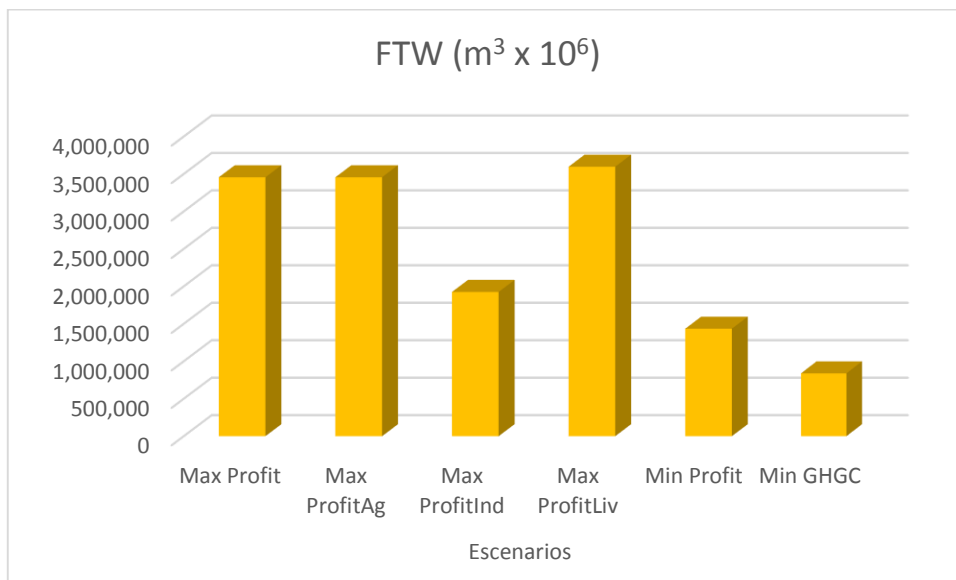


Figura 22. Consumo de agua total en el sistema

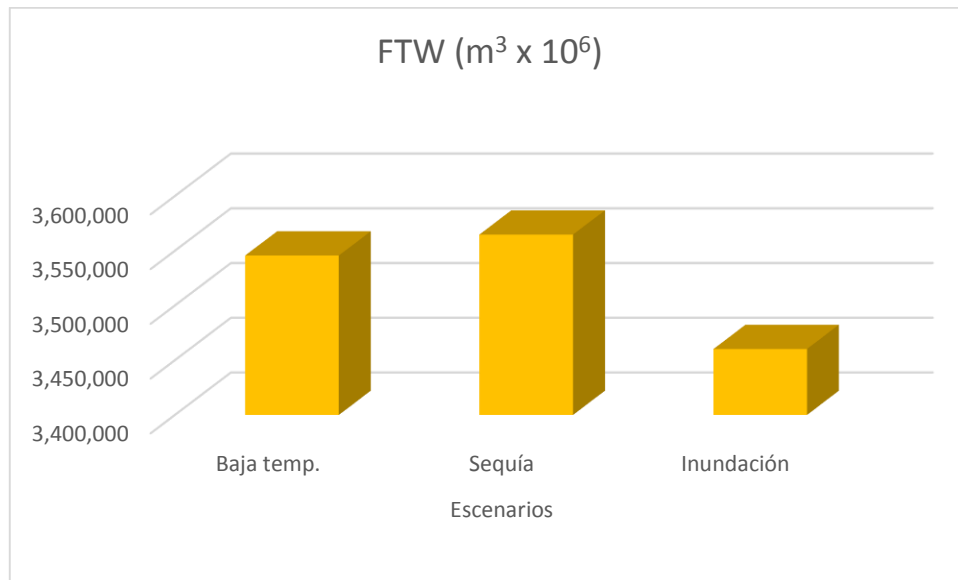


Figura 23. Consumo de agua total en el sistema cuando ocurre un desastre natural

En los casos de los sectores agrícola y ganadero, puede observarse un decremento en sus rendimientos cuando se presenta alguno de los fenómenos naturales; de igual manera, existe un aumento en el consumo de agua fresca, aun cuando la producción es menor. En el sector agrícola se tiene un decremento del 5.35% de la producción, mientras que el sector ganadero disminuye en un 11.77%. Por otro lado, el sector industrial presenta una disminución en su producción cuando se presenta un desastre natural tomando en cuenta la solución donde se maximiza la ganancia de este sector, sin embargo, existe un aumento en su producción respecto al escenario donde se maximiza la ganancia total del sistema. De igual manera en los gráficos puede observarse un aumento aproximadamente del 3% en el consumo total de agua en todos los escenarios planteados.

4.6 Conclusiones

Se propuso una metodología general para optimizar la resiliencia en el contexto del nexo agua-energía-alimentos de una región en particular donde se presentan condiciones climáticas extremas. Esta metodología permite diseñar escenarios donde la funcionalidad del sistema puede recuperarse al menor costo posible. De igual forma, es posible identificar fallas críticas que afectan la productividad en sistemas ya existentes y de alguna manera implementar metodologías para solucionarlas.

Se propuso un caso de estudio para mostrar la aplicabilidad de la metodología planteada en la zona noroeste de México. Se formuló y codificó un modelo multi-objetivo mixto-entero no lineal. Resolviéndose distintos escenarios, donde se maximizó la ganancia total del sistema, así como las ganancias individuales de los sectores considerados; también se minimizaron las emisiones de gas de efecto invernadero.

De igual manera, la metodología propuesta para el análisis de la resiliencia en sistemas de optimización fue aplicada a través de dos modelos matemáticos más. En el primero de ellos, se busca minimizar el costo total anual de una cadena de suministros donde se consideran los municipios con menor índice de desarrollo humano en el estado de Michoacán; mientras que en el segundo modelo se busca evaluar la condición actual de la seguridad en el nexo agua-energía-alimento en regiones con un gran desarrollo económico, pero que sus recursos naturales presentan adversidades debido a las condiciones climáticas. Las ciudades de Hermosillo y Monterrey fueron las regiones analizadas. En esta parte, se encontró que optimizar la resiliencia de un sistema permite identificar la pérdida de funcionalidad de un sistema cuando esté se enfrenta a alguna perturbación. En este caso en particular se observó que disminuyó la producción de todos los sectores, respecto a la mejor solución económico de cada uno de ellos (5.35% sector agrícola, 1.45% sector industrial, 31.16% sector ganadero), aun cuando se necesitó de una mayor cantidad de recursos, como el agua.

5. ANÁLISIS DE LA RESILIENCIA EN LA SEGURIDAD DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTO EN REGIONES DE CLIMA ÁRIDO Y SEMI-ÁRIDO.

5.1 Planteamiento del problema

Existen muchas regiones las cuales enfrentan distintas situaciones para satisfacer sus necesidades de agua, debido a las condiciones climáticas desfavorables que se presentan. En los últimos años ha aumentado la incidencia de estas situaciones de una manera extrema, lo cual ha provocado distintos trastornos en la gestión del agua, la energía y los alimentos. La mayoría de estas regiones no se encuentran preparadas para superar los daños ocasionados por distintos desastres naturales. Además, no son capaces de hacer frente al crecimiento de la demanda asociado a la movilización de residentes con aspiraciones de mejorar su estilo de vida económico y social. El análisis de la resiliencia es una herramienta eficiente la cual ayuda a estimar las condiciones futuras o posibles fallas que puedan afectar la seguridad del nexo del nexo agua-energía-alimentos. Por lo tanto, el problema consiste en determinar la resiliencia en la seguridad del nexo agua-energía-alimentos en regiones áridas y semiáridas que se encuentran expuestas a distintos fenómenos naturales (**Figura 24**). Abordándose este problema, mediante la metodología mostrada en el capítulo 2, para la evaluar la resiliencia y los riesgos asociados del sistema en condiciones actuales y proyecciones futuras. Una de las ventajas de cuantificar la resiliencia en ingeniería de procesos es que permite estimar costos de reparación de los componentes del sistema en caso de que alguna falla se presente, así como los costos asociados a la pérdida de servicios funcionales. La identificación de ciertos riesgos permite sobreestimar el sistema a desarrollar y, en base a ello, adaptarlo para evitar una pérdida funcional total o parcial de alguno de los servicios.

5.2 Caso de estudio

Para mostrar la aplicabilidad del enfoque propuesto, se seleccionaron dos casos de estudio, los cuales corresponden a las ciudades de Monterrey, Nuevo León y de Hermosillo, Sonora, ambas ubicadas en México. La selección de las ciudades para analizar los casos de estudio se realizó en base a las condiciones limitadas de recursos que enfrentan estas ciudades, consecuencia del impacto del cambio climático que ha puesto en riesgo la seguridad del agua, la energía y los alimentos.

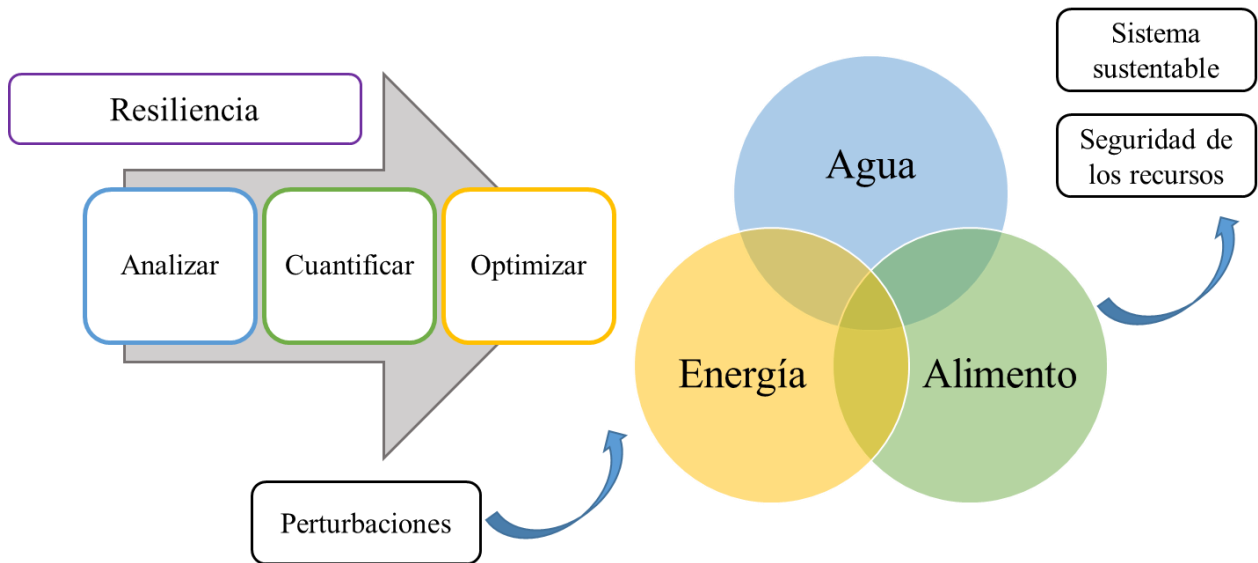


Figura 24. Planteamiento del problema

5.2.1 Monterrey

Se seleccionó el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) como caso de estudio debido a la importancia económica que representa para el producto interno nacional. Su principal actividad es la industria manufacturera, lo que permite tener una fuerte relación económica con Estados Unidos de América. Tal región se ubica en la región Noreste de México, en el estado de Nuevo León. La AMM tiene el segundo índice de desarrollo más alto de todo el país, después de la Ciudad de México. Alrededor del 88% de la población total del estado se concentra en la AMM debido a las actividades económicas que ahí se desarrollan, convirtiéndola en un punto de migración para la población de los estados vecinos. Sin embargo, la situación actual que sufren los recursos naturales pone en riesgo la capacidad de enfrentar un crecimiento acelerado y alcanzar un desarrollo sostenible. Además, existen severas condiciones climáticas en la ciudad, las cuales llegan a ser secas y muy extremas (SET-NL, 2019). El agua se abastece por fuentes superficiales y subterráneas, las cuales dependen totalmente de las precipitaciones registradas en la zona. El sector agropecuario es explotado en menor medida debido a las condiciones climáticas. Los principales

cultivos que se cosechan son pastos y sorgos forrajeros y algunas hortalizas en menor medida. La actividad ganadera consiste en la producción de carne, leche y huevos. Por otra parte el sector energético se abastece principalmente de fuentes no renovables, como centrales de ciclo combinado; en menor medida, se genera energía por fuentes renovables, como la eólica y la solar. De acuerdo con el clima histórico registrado (CONAGUA 2021a), existen grandes probabilidades de tener periodos largos de sequía y en algunas ocasiones fuertes precipitaciones que generen inundaciones.

5.2.2 Hermosillo

Hermosillo, es la capital del estado de Sonora, es la ciudad con mayor problema para abastecerse de agua en el país, esto se debe principalmente a su ubicación geográfica. Sonora está casi cubierta por el desierto más caluroso del país. Dado que Hermosillo es la ciudad con el mayor índice económico del estado, en los últimos años ha sido un problema desafiante satisfacer las demandas de agua, de energía y de alimentos. Los desastres naturales han causado grandes pérdidas económicas por daños a la infraestructura hidráulica y a los sectores agrícola, pecuario, pesquero y energético. Los fenómenos naturales que se presentan en el estado de Sonora son generalmente de origen hidrometeorológico, los cuales son generados por lluvias y tormentas tropicales. Si bien la ciudad se encuentra ubicada en una región árida con bajos niveles de precipitación, la presencia de lluvias torrenciales y de corta duración provoca grandes inundaciones, las cuales tienen consecuencias sociales, económicas y ambientales. Así mismo, otro fenómeno meteorológico que causa daños a la población son las bajas temperaturas, la presencia de ellas es escasa, abarcando los meses de diciembre a febrero, con una incidencia de 0 a 20 días por año. Además de los problemas causados por el exceso de precipitaciones y las bajas temperaturas, las sequías tienen un impacto directo en todos los sectores, produciendo grandes pérdidas. Una de las principales consecuencias de las sequías es que la capacidad de las presas ubicadas en Hermosillo se encuentra

en sus niveles mínimos (CONAGUA, 2021b); de esta manera, se requiere que se transporte agua desde otras regiones. Sin embargo, estas regiones son las zonas de mayor producción agrícola del estado y por ellos los usuarios agrícolas exigen que se respeten sus derechos de riego.

Las ciudades de Monterrey y Hermosillo se han visto afectadas por el impacto del cambio climático y estos eventos inesperados que han aumentado en las últimas décadas, por lo que requieren de estrategias que mejoren el manejo de los recursos para tener una seguridad acerca del nexo agua-energía-alimentos.

5.3 Resultados

Se implementó la metodología propuesta para evaluar la resiliencia del nexo agua-energía-alimentos. En las **Figuras 25 y 26** se muestran las matrices tridimensionales para Hermosillo y Monterrey, respectivamente. Los servicios funcionales hacen referencia a la cantidad de agua (m^3), energía (MW), y alimentos (Ton) requeridos por las ciudades mostradas en los casos de estudio, los cuales son presentados en las matrices tri-dimensionales. Cinco diferentes años fueron seleccionados, correspondientes a años previos y a proyecciones futuras. Debido al aumento en la frecuencia de desastres naturales en los casos propuestos, se consideraron como posibles modos de falla: huracanes, bajas temperaturas y sequías. Nótese que existe una variación en los servicios funcionales a través de cada año de estudio. Sin embargo, el valor del servicio funcional para cada modo de falla es el mismo, ya que se toma en consideración el valor máximo de servicio funcional que se encuentra en riesgo en cada periodo de tiempo.

Alimento	654,410	694,140	769,809	887,214	958,927	
	654,410	694,140	769,809	887,214	958,927	
	654,410	694,140	769,809	887,214	958,927	
Energía	63,512	71,924	89,054	93,507	98,183	
	63,512	71,924	89,054	93,507	98,183	
	63,512	71,924	89,054	93,507	98,183	
Agua	6,612,000	7,027,000	7,478,760	7,990,843	8,232,990	Huracán Baja Temp. Sequía
	6,612,000	7,027,000	7,478,760	7,990,843	8,232,990	
	6,612,000	7,027,000	7,478,760	7,990,843	8,232,990	
	2013	2015	2019	2025	2030	

Período de Tiempo

Figura 25. Matriz tri-dimensional para el caso de estudio de Hermosillo

Alimento	1,195,117	1,275,160	1,406,085	1,579,804	1,760,536	
	1,195,117	1,275,160	1,406,085	1,579,804	1,760,536	
	1,195,117	1,275,160	1,406,085	1,579,804	1,760,536	
Energía	139,615	145,594	159,552	165,886	171,997	
	139,615	145,594	159,552	165,886	171,997	
	139,615	145,594	159,552	165,886	171,997	
Agua	2,067,300	2,069,000	2,149,000	2,236,688	2,366,724	Huracán Baja Temp. Sequía
	2,067,300	2,069,000	2,149,000	2,236,688	2,366,724	
	2,067,300	2,069,000	2,149,000	2,236,688	2,366,724	
	2013	2015	2019	2025	2030	

Período de Tiempo

Figura 26. Matriz tri-dimensional para el caso de estudio de Monterrey

Posteriormente, cada uno de los servicios funcionales se multiplicó por su respectivo costo de penalización (**Tabla 15**) para construir las matrices bi-dimensionales para ambos casos (**Tablas 16** y **17**). Los valores de estos parámetros fueron reportados por diferentes organizaciones gubernamentales en México (FAO, 2021; CONAGUA 2021c; CFE 2021). En ambos casos puede observarse como los servicios funcionales varían a través de los años seleccionados, sin embargo, son los mismos para cada modo de falla. Debido a esto, se utilizó el índice de riesgo asociado a

cada uno de los modos de falla. Los índices se calcularon en base a las metodologías establecidas por la CENEPRED (Jiménez y col., 2012). De acuerdo a las **Tablas 16 y 17**, se observa un incremento en la proyección a los costos impuestos del 41.52% y del 43.10%, para las ciudades de Hermosillo y Monterrey, respectivamente, del año 2019 al 2030. A pesar de que se espera un decremento en el costo energético en los próximos años, a consecuencia de que cada vez se utilizan más energías renovables (38.28% para ambas ciudades), la tendencia muestra un aumento en los costos del agua y de los alimentos, así como también en los requerimientos de los servicios funcionales por el incremento de la población. Se observa un aumento del 22.33% en el costo de agua para la ciudad de Hermosillo, y del 20.40% para Monterrey, mientras que para el costo de los alimentos se espera un incremento del 15% para ambas ciudades.

Tabla 15. Costos de penalización para el nexo agua-energía-alimento en diferentes años

Año	Ciudad	Costo (\$US/unidad)		
		Agua (m ³)	Energía (MW)	Alimento (Ton)
2013	Hermosillo	1.378	47.0	289.0
	Monterrey	0.643	47.0	278.0
2015	Hermosillo	1.464	48.8	312.0
	Monterrey	0.724	48.8	289.5
2019	Hermosillo	1.836	47.8	340.5
	Monterrey	0.809	47.8	335.0
2025	Hermosillo	2.017	34.1	365.3
	Monterrey	0.891	34.1	357.8
2030	Hermosillo	2.246	29.5	391.1
	Monterrey	0.974	29.5	386.3

Tabla 16. Matriz bi-dimensional para Hermosillo

2013	2015	2019	2025	2030	
201,220,890	230,369,099	280,107,749	343,405,393	396,424,044	Sequía
201,220,890	230,369,099	280,107,749	343,405,393	396,424,044	Baja temp.
201,220,890	230,369,099	280,107,749	343,405,393	396,424,044	Huracán

Tabla 17. Matriz bi-dimensional para Monterrey

2013	2015	2019	2025	2030	
340,133,705	377,761,763	480,403,602	572,902,791	687,474,157	Sequía
340,133,705	377,761,763	480,403,602	572,902,791	687,474,157	Baja temp.
340,133,705	377,761,763	480,403,602	572,902,791	687,474,157	Huracán

De acuerdo a la metodología con la que fueron calculados los índices, los niveles de riesgo no varían significativamente a través de los años, así como tampoco en las proyecciones a años futuros. Por lo tanto, el índice de riesgo para cada uno de los casos de estudio para cada posible falla es el mismo en todos los períodos de tiempo. Estos índices se muestran en las **Figuras 27 y 28**, dónde MB es un riesgo muy bajo, B es un riesgo bajo, M es un riesgo medio, A es un riesgo alto y MA es un riesgo muy alto. Nótese que, aunque los índices de riesgo no varían a través de los años, es algo muy significativo porque este índice representa la probabilidad de ocurrencia de que algún modo de falla se presente en cada uno de los periodos de tiempo.

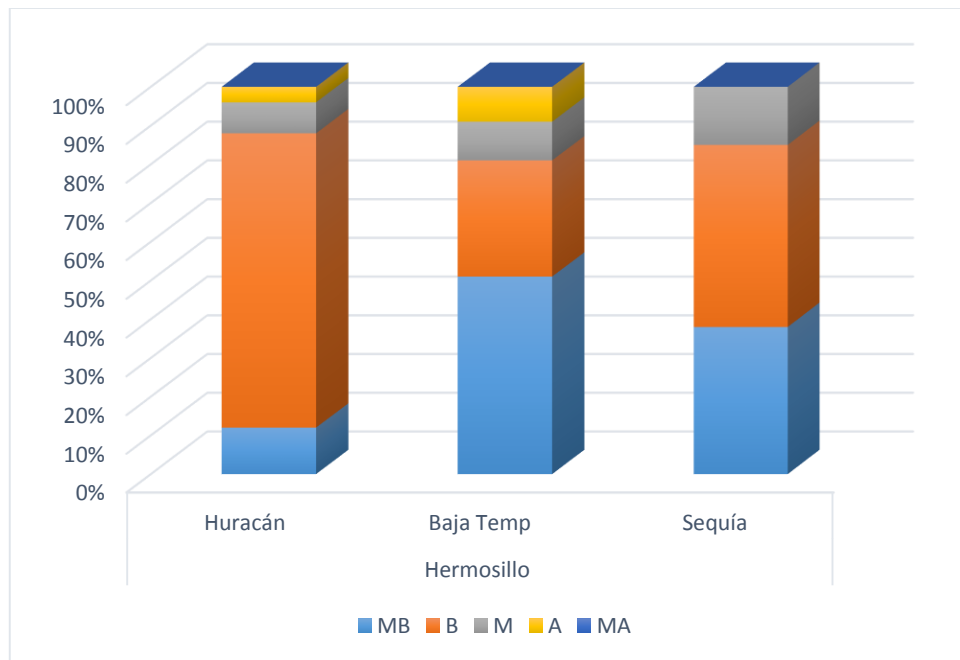


Figura 27. Índices de riesgo para Hermosillo

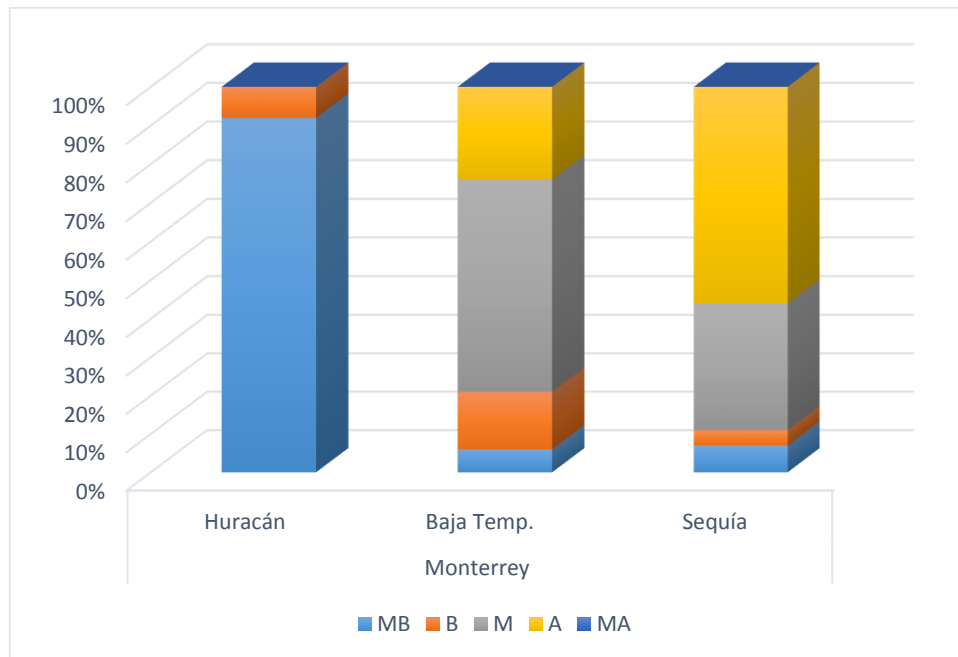


Figura 28. Índices de riesgo para Monterrey

Aunado a eso, los índices de resiliencia fueron calculados para cada caso de estudio. Como los índices de riesgo no varían a través de los años seleccionados, solo una matriz para cada caso fue calculada. Para ambos casos solo riesgo medio a muy alto fue considerado. En la **Tabla 18** podemos observar muchos valores de 1 para los índices de resiliencia del caso de Hermosillo, lo cual representa un escenario que puede reponerse completamente en caso de la ocurrencia de cualquier posible falla. Sin embargo, en caso de una sequía, existe un valor de 0.85 para un índice de resiliencia de riesgo medio (con una probabilidad del 15% de acuerdo a la **Figura 19**), lo cual nos indica que este fenómeno natural podría presentar importantes consecuencias en relación al nexo agua-energía-alimentos. Esto implica un costo impuesto de \$42,016,162 dólares para el año 2019 y un costo impuesto de 59,463,607 dólares para el año 2030, para poder satisfacer las necesidades de los recursos del nexo para la población. Similarmente, puedes observarse valores bajos en modos de falla para índices de riesgo bajo y muy bajo, debido a que son riesgos muy bajos, estos no han sido considerados.

Tabla 18. Índices de resiliencia para Hermosillo

	MB	B	M	A	MA
Huracán	0.88	0.24	0.92	0.96	1.00
Baja temp.	0.49	0.70	0.90	0.91	1.00
Sequía	0.62	0.53	0.85	1.00	1.00

La **Tabla 19** muestra altos valores de resiliencia en caso de un huracán, lo cual nos dice que en esta ciudad no se presentaría ningún problema en caso de la ocurrencia de uno (probabilidad del 92% para un riesgo bajo). Sin embargo, en ambos en caso de que llegará a presentarse alguna baja temperatura o alguna sequía, existen valores debajo de 0.50, lo cual nos indica que estos fenómenos pueden alterar drásticamente la producción de energía o alimento, así como también la disponibilidad de agua en esta área. Además, Monterrey presenta una probabilidad del 55% para un riesgo medio en caso de escenarios con baja temperatura, y una probabilidad del 56% en riesgo alto en escenarios de sequía (**Figura 20**). El costo impuesto para Monterrey en 2019 en caso de que se presente una baja temperatura es de \$264,221,981 dólares y, en caso de que exista una sequía de \$269,026,017 dólares. Mientras que la proyección para el año 2030 es de \$378,110,787 dólares en caso de baja temperatura y de \$384,985,528 dólares en casa de una sequía.

Tabla 19. Índices de resiliencia para Monterrey

	MB	B	M	A	MA
Huracán	0.08	0.92	1.00	1.00	1.00
Baja temp.	0.94	0.85	0.45	0.76	1.00
Sequía	0.93	0.96	0.67	0.44	1.00

5.4 Conclusiones

En este trabajo, se presentó un enfoque sistematizado para analizar la resiliencia en la seguridad del nexo agua-energía, alimentos en áreas que presentan variaciones climáticas significativas a lo largo del año. Ambos casos de estudio presentan condiciones similares en cuanto al clima y la escasez de recursos, en ambas ciudades el problema principal se encuentra relacionado con la disponibilidad del agua. Por lo tanto, el factor más amenazante para la seguridad del nexo agua-

energía alimentos es la intensificación de las sequías, producto de los cambios climáticos. Las ciudades analizadas son de gran importancia nacional; sin embargo, sus actuales sistemas de gestión y distribución de los recursos básico no son muy resilientes a las perturbaciones que puedan presentarse, ni al crecimiento que demanda la sociedad.

El índice de resiliencia indica que en años futuros el nexo será vulnerable a eventos extremos, si las condiciones no cambian; entonces, es esencial la implementación de acciones para mejorar la integración de los recursos. Además, la optimización de la gestión del agua en el sector agrícola es clave fundamental para disminuir el consumo de agua. En este sentido, diferentes tipos de riego podrían ayudar significativamente. Asimismo, se debe encontrar un equilibrio en la producción y el consumo de los alimentos para reducir sus desperdicios. Por otro lado, las energías renovables deben incluirse en el sector energético, para mejorar la seguridad y resiliencia del nexo.

6. CONCLUSIONES

Se analizó la interrupción de servicios funcionales como son el agua, la energía y los alimentos debido a las condiciones climáticas (sequías, inundaciones y bajas temperaturas), donde los costos de penalización se encuentran asociados a fallas totales o parciales en los sistemas. Se han presentado dos casos de estudio de ciudades de México, las cuales tienen condiciones climáticas severas. A través de los resultados de los índices de resiliencia, es posible identificar que dentro de los modos de falla que se consideran, las sequías son el fenómeno que pone en mayor riesgo la seguridad del nexo agua-energía-alimentos.

La evaluación de la resiliencia en los sistemas integrados, tiene como ventaja identificar puntos vulnerables con los cuales se diseña un sistema. Por lo tanto, aún con las variaciones que presentan las necesidades de los recursos en los diferentes periodos de tiempo, sí se tiene un sistema resiliente es posible satisfacer estas necesidades si se crea un diseño sobrestimado. Cabe señalar que sobrestimar el diseño y la operación de cierto sistema, conlleva un aumento en el costo total del sistema; sin embargo, también se obtiene una mayor eficiencia. Con el marco presentado es posible realizar predicciones acerca de la tendencia en la disponibilidad de recursos como son el agua, la energía y los alimentos y buscar de esta manera alternativas para mejorar su sostenibilidad. Además, la metodología propuesta, ofrece la posibilidad de estimar pérdidas económicas asociadas a la existencia de determinados desastres naturales, consecuencia del impacto del cambio climático, lo cual la convierte en una herramienta eficaz para la toma de decisiones. La interrupción de cada servicio funcional se puede reducir en mayor medida con la ayuda de políticas de seguridad mediante la construcción óptima de la resiliencia. Este tipo de estudio permite diseñar estrategias para hacer frente de manera anticipado a los eventos que puedan presentarse y determinar costos por reparación de daños, sobrestimando el sistema que se desea. De esta forma el enfoque que se propone, permite maximizar la seguridad de los recursos que componen el nexo agua-energía, alimentos.

7. REFERENCIAS

- Abdin, IF., Fang, YP., Zio, E. 2019**, A modeling and optimization framework for power systems design with operational flexibility and resilience against extreme heat waves and drought events. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 112, 706-719. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.006>
- Aguilar-Oropeza, G., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M. 2019**, Involving acceptability in the optimal synthesis of water networks in eco-industrial parks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(6), 2268-2279. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b04419>
- Ahmadi, S., Saboohi, Y., Vakili, A. 2021**, Frameworks, quantitative indicators, characters, and modeling approaches to analysis of energy system resilience: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 144, 110988. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110988>
- Ashouri, M., Fung, B.C.M., Haghghat, F., Yoshino, H. 2020**, Systematic approach to provide building occupants with feedback to reduce energy consumption. *Energy* 194, 116813. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116813>
- Assarkhaniki, Z., Rajabifard, A., Sabri, S. 2020**, The conceptualisation of resilience dimensions and comprehensive quantification of the associated indicators: a systematic approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101840. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101840>
- Balaei, B., Noy, I., Wilkinson, S., Potangaroa, R. 2021**, Economic factors affecting water supply resilience to disasters. *Socioecon. Plann. Sci.* 76, 100961. <https://doi.org/10.1016/J.SEPS.2020.100961>

- Behboudian, M., Kerachian, R. 2021**, Evaluating the resilience of water resources management scenarios using the evidential reasoning approach: The Zarrinehrud river basin experience. *J. Environ. Manage.* 284, 112025. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112025>
- Belotti, P., Kirches, C., Leyffer, S., Linderoth, J., Luedtke, J., Mahajan, A., 2013**, “Mixed-integer nonlinear optimization”. *Acta Numerica*, 22, 1-131.
- Bhusal, N., Abdelmalak, M., Kamruzzaman, M., Benidris, M. 2020**, Power system resilience: Current practices, challenges, and future directions. *IEEE Access*, 8, 18064-18086. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968586>
- Botzen, W.W., Deschenes, O., Sanders, M. 2019**, The economic impacts of natural disasters: A review of models and empirical studies. *Rev. Environ. Econ. Policy* 13(2), 167-188. <https://doi.org/10.1093/reep/rez004>
- Brooke, A., Kendrick, D., Meeraus, A., Raman, R., 2022**, GAMS, A user’s guide. GAMS Development Corporation, Washington DC, USA.
- Bruce, A., Brown, C., Avello, P., Beane, G., Bristow, J., Ellis, L., Fisher, S., St. George Freeman, S., Jiménez, A., Leten, J., Matthews, N., Romano, O., Ruiz-Apilanez, I., Saikia, P., Shouler, M., Simkins, P. 2020**, Human dimensions of urban water resilience: Perspectives from Cape Town, Kingston upon Hull, Mexico City and *Miami*. *Water Secur.* 9, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100060>
- Bussieck, M.R., Pruessner, A., 2003**, “Mixed-integer nonlinear programming”. *SIAG/OPT Newsletter: Views News*,14(1), 19-22.
- Cadini, F., Agliardi, G.L., Zio, E. 2017**, A modeling and simulation framework for the reliability/availability assessment of a power transmission grid subject to cascading failures

- under extreme weather conditions. *Appl. Energy* 185, 267–279.
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.10.086>
- Castillo, E., Conejo, A.J., Pedregal, P., García, R., Alguacil, N. 2002**, “Formulación y Resolución de Modelos de Programación Matemática en Ingeniería y Ciencia”.
- CFE. 2021**, Historical collection rate. *Federal Energy Commission (CFE)*.
https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_casa.asp. (Accessed Mar 2, 2021)
- CONAGUA. 2021a**, Climatological Normal by State. National Meteorological System, *National Water Commission (CONAGUA)*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=nl>. (Accessed Feb17, 2021)
- CONAGUA. 2021b**, National Water Commission. Agricultural Statistics of the Irrigation Units National Water Commission, *National Water Commission (CONAGUA)*
<https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-unidades-de-riego>
 (Accessed March 2, 2021)
- CONAGUA. 2021c**, Fees for drinking water and sanitation for residential type domestic use. *National Water Commission (CONAGUA)*.
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=tarifas>. (Accessed Mar 2, 2021)
- Chen, H., Koh, J.J., Long, C., Liu, S., Shi, H., Min, J., ... He, C. 2021**, Speed-induced extensibility elastomers with good resilience and high toughness. *Macromolecules*, 54(7), 3358-3365. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.1c00175>
- Deng, H.M., Wang, C., Cai, W.J., Liu, Y., Zhang, L.X. 2020**, Managing the water-energy-food nexus in China by adjusting critical final demands and supply chains: An input-output

- analysis. *Science of the Total Environment*, 720, 137635.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137635>
- Escalante-Sandoval, C., Reyes, L. 2005**, Análisis de Sequías. Facultad de Ingeniería. UNAM. Ciudad de México, México.
- Fahad, S., Sönmez, O., Saud, S., Wang, D., Wu, C., Adnan, M., Turan, V. 2021a**, Plant Growth Regulators for Climate-Smart Agriculture (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003109013>
- Fahad, S., Sönmez, O., Saud, S., Wang, D., Wu, C., Adnan, M., Turan, V. 2021b**, Sustainable Soil and Land Management and Climate Change (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003108894>
- FAO. 2021**, FAO Food Price Index. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. <https://www.fao.org/worldfoodsituation/foodpricesindex/es/> (Accessed Mar 2, 2021)
- Fontenot, H., Ayyagari, K.S., Dong, B., Gatsis, N., Taha, A. 2021**, Buildings-to-distribution-network integration for coordinated voltage regulation and building energy management via distributed resource flexibility. *Sustain. Cities Soc.* 69, 102832.
<https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.102832>
- Gholami Rostam, M., Abbasi, A. 2021**, A framework for identifying the appropriate quantitative indicators to objectively optimize the building energy consumption considering sustainability and resilience aspects. *J. Build. Eng.* 44, 102974.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.102974>

- Gong, J., You, F. 2018**, Resilient design and operations of process systems: Nonlinear adaptive robust optimization model and algorithm for resilience analysis and enhancement. *Computers and Chemical Engineering*, 116, 231-252. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.11.002>
- González-Bravo, R., Saucedo-Valenzuela, M., Mahlkecht, J., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M., 2018**, Optimization of water grids at macroscopic level analyzing water–energy–food nexus. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(9), 12140-12152. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b02484>
- Govindan, R., Al-Ansari, T. 2019**, Computational decision framework for enhancing resilience of the energy, water and food nexus in risky environments. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 112, 653–668. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.06.015>
- Hassani, L., Ghanbari, R. 2019**, The optimization of resilience and sustainability using mathematical programming models and metaheuristic algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 228, 1062-1072. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.324>
- Imani, M., Hasan, M.M., Bittencourt, L.F., McClymont, K., Kapelan, Z. 2021**, A novel machine learning application: Water quality resilience prediction Model. *Sci. Total Environ.* 768, 144459. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144459>
- Jasiūnas, J., Lund, P.D., Mikkola, J. 2021**, Energy system resilience – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 150, 111476. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111476>
- Jiménez, M., Baeza, C., Matías, L., Eslava, H. 2012**, Maps of risk indices at the municipal level due to hydro-meteorological phenomena. *National Civil Protection System*. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/descargas/Metodologias/Hidrometeorologico.pdf> (Accessed Feb 17, 2021)

- Laumanns, M., Thiele, L., Zitzler, E., 2006**, An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method. *European Journal of Operational Research*, 169(3), 932-942. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.08.029>
- Liu, J., Li, Y., Li, X. 2020**, Identifying optimal security management policy for water–energy–food nexus system under stochastic and fuzzy conditions. *Water*, 12(11), 3268. <https://doi.org/10.3390/w12113268>
- Martínez-Guido, S.I., Núñez-López, J.M., Ponce-Ortega, J.M. 2020**, Involving resilience in synthesizing food networks in low-income communities. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 5(1), 139-157. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00126-7>
- Mguni, P., van Vliet, B.J. 2020**, Rethinking the urban nexus-resilience and vulnerability at the urban nexus of water, energy and food (WEF). An introduction to the special issue. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 17:2, <https://doi.org/10.1080/1943815X.2020.1866617>
- Moslehi, S., Reddy, T.A., 2018**, Sustainability of integrated energy systems: A performance-based resilience assessment methodology. *Applied Energy*, 228, 487-498. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.075>
- Nezamoddini, N., Mousavian, S., Erol-Kantarci, M. 2017**, A risk optimization model for enhanced power grid resilience against physical attacks. *Elec. Pow. Sys. Res.* 143, 329-338. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.08.046>
- Núñez-López, J.M., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M. 2021**, Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. *Proc. Saf. Environ. Protec.* 147, 259-273. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.037>

- Núñez-López, J.M., Hernández-Calderón, O.M., Ponce-Ortega, J.M., Cervantes-Gaxiola, M.E., Rubio-Castro, E., 2018a**, Optimal design of sustainable agricultural water networks. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 440-457. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03901>
- Núñez-López, J.M., Villicaña-García, E., Cansino-Loeza, B., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M., 2018b**, Involving acceptability in the optimal design of total integrated residential complexes involving the water-energy-waste nexus. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(6), 7390-7402. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04854>
- Núñez-López, J.M., Rubio-Castro, E., El-Halwagi, M.M., Ponce-Ortega, J.M., 2018c**, Optimal design of total integrated residential complexes involving water-energy-waste nexus. *Clean Technologies & Environmental Policy*, 20(5), 1061-1085. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1537-z>
- Pawar, B., Park, S., Hu, P., Wang, Q. 2021**, Applications of resilience engineering principles in different fields with a focus on industrial systems: A literature review. *J. Loss Prev. Proc. Ind.* 69, 104366. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104366>
- Radmehr, R., Ghorbani, M., Ziaei, A.N. 2021**, Quantifying and managing the water-energy-food nexus in dry regions food insecurity: New methods and evidence. *Agricultural Water Management*, 245, 106588. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106588>
- Ribeiro, P.J.G., Pena Jardim Gonçalves, L.A. 2019**, Urban resilience: A conceptual framework. *Sustain. Cities Soc.* 50, 101625. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101625>
- Senkel, A., Bode, C., Schmitz, G. 2021**, Quantification of the resilience of integrated energy systems using dynamic simulation. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 209, 107447. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2021.107447>

- SET-NL 2019**, Nuevo León in figures. Economic and labor secretary of Nuevo León.
<https://datos.nl.gob.mx/>. (Accessed Apr 2021)
- Shu, Q., Scott, M., Todman, L., McGrane, S.J., 2021**, Development of a prototype composite index for resilience and security of water-energy-food (WEF) systems in industrialised nations. *Environ. Sustain. Indic.* 11, 100124. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2021.100124>
- Siderius, C., Kolusu, S.R., Todd, M.C., Bhave, A., Dougill, A.J., Reason, C.J., ... Conway, D. 2021**, Climate variability affects water-energy-food infrastructure performance in East Africa. *One Earth*, 4(3), 397-410. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.02.009>
- Sönmez, O., Saud, S., Wang, D., Wu, C., Adnan, M., Turan, V. 2021**, Climate Change and Plants: Biodiversity, Growth and Interactions (S. Fahad, Ed.) (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781003108931>
- Sukhwani, V., Shaw, R., Mitra, B.K., Yan, W. 2019**, Optimizing food-energy-water (FEW) nexus to foster collective resilience in urban-rural systems. *Progress in Disaster Science*, 1, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2019.100005>
- Sun, Y., Haghghat, F., Fung, B.C.M. 2020**, A review of the-state-of-the-art in data-driven approaches for building energy prediction. *Energy Build.* 221, 110022.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110022>
- Wilson, J.D. 2019**, A securitisation approach to international energy politics. *Energy Res. Soc. Sci.* 49, 114–125. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2018.10.024>
- Wu, N., Xu, Y., Liu, X., Wang, H., Herrera-Viedma, E. 2020**, Water–energy–food nexus evaluation with a social network group decision making approach based on hesitant fuzzy

- preference relations. *Applied Soft Computing*, 93, 106363.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106363>
- Yadav, K., Geli, H.M., Cibils, A.F., Hayes, M., Fernald, A., Peach, J., Gedefaw, M.G. 2021,** An Integrated Food, Energy, and Water Nexus, Human Well-Being, and Resilience (FEW-WISE) Framework: New Mexico. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.667018>
- Yalew, S.G., van Vliet, M.T.H., Gernaat, D.E.H.J. 2020,** Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios. *Nat Energy* 5, 794–802.
<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0664-z>
- Yavari, M., Zaker, H. 2020,** Designing a resilient-green closed loop supply chain network for perishable products by considering disruption in both supply chain and power networks. *Computers and Chemical Engineering*, 134, 106680.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106680>
- Yue, Q., Guo, P. 2021,** Managing agricultural water-energy-food-environment nexus considering water footprint and carbon footprint under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 252, 106899. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106899>
- Zhang, F., Cai, Y., Tan, Q., Engel, B.A., Wang, X. 2021,** An optimal modeling approach for reducing carbon footprint in agricultural water-energy-food nexus system. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128325>
- Zinetullina, A., Yang, M., Khakzad, N., Golman, B., Li, X. 2021,** Quantitative resilience assessment of chemical process systems using functional resonance analysis method and Dynamic Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*, 205, 107232.
<https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107232>