



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

“OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL AGUA A NIVEL
MACROSCÓPICO A TRAVÉS DE MÚLTIPLES PARTES
INTERESADAS QUE ANALIZAN EL NEXO AGUA-ENERGÍA-
ALIMENTOS”

TESIS presentada por:

MAYRA SAUCEDA VALENZUELA

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

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

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

Co-Asesor: **Dr. Eusiel Rubio Castro**

ABSTRACT

Optimization of Use Water at Macroscopic Level through Multi-stakeholders
analyzing the Water-Energy-Food Nexus

By

Ch. E. Mayra Saucedo Valenzuela

February 2018

Master in Chemical Engineering Sciences

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

This work proposes an optimization model for the design of a water distribution network accounting simultaneously economic, environmental and social objectives. The economic objective is specified with the maximization of annual gross profit, the environmental objective establishes the minimization of global greenhouse gas emissions, while the social objective is stated as the maximization of the number of created jobs. In this work, since the objectives are conflicting, it is proposed an analysis of multi-stakeholders with the intention of reaching a compromise solution that allows them to be compensated, and quantifying the relationship of the water-energy-food nexus to yield synergies that allow strategic planning. A case study located in a city of Sonora, Mexico is solved for a set of scenarios with the purpose of illustrating the capabilities of the proposed optimization approach.

Keywords. Optimization, Water distribution, Water-Energy-Food Nexus, Multi-stakeholders.

RESUMEN

Optimización del Uso del Agua a Nivel Macroscópico a través de Múltiples Partes
Interesadas que Analizan el Nexo Agua-Energía-Alimentos

Por

Ing. Quim. Mayra Saucedá Valenzuela

Febrero del 2018

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

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

Este trabajo propone un modelo de optimización para el diseño de una red de distribución de agua sujeta simultáneamente a objetivos económicos, ambientales y sociales. El objetivo económico se especifica con la maximización del beneficio bruto anual, el objetivo ambiental establece la minimización de las emisiones globales de gases de efecto invernadero a nivel mundial, mientras que el objetivo social se refleja en la maximización del número de empleos nuevos. En este trabajo, dado que los objetivos son contradictorios, se propone un análisis de múltiples partes interesadas con la intención de alcanzar una solución de compromiso que les permita ser compensados, y cuantificar la relación del nexo agua-energía-alimento para construir sinergias que permitan una planificación estratégica. Un caso de estudio ubicado en una ciudad de Sonora, México es resuelto para un conjunto de escenarios con el propósito de ilustrar las capacidades del enfoque de optimización propuesto.

Palabras Claves: Optimización, distribución de agua, nexo agua-energía-alimentos, múltiple partes interesadas, red de intercambio.

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis padres y hermana, por todo su apoyo cuando más abatida me sentía, inyectándome ánimo para continuar lo que había empezado.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a todas aquellas personas quienes en su manera muy particular y especial hicieron posible este proyecto, pues entiendo que soy la suma de todas ellas.

Quiero en especial darles las gracias a mis directores de tesis, al Dr. José María Ponce Ortega y al Dr. Eusiel Rubio Castro, por su aportación académica en la realización de este trabajo, por el apoyo, la comprensión, los consejos, y sobretodo su gran paciencia para esperar a que este trabajo pudiera llegar a su fin.

A mis sinodales, al Dr. Fabricio Nápoles Rivera, al Dr. Agustín Castro Montoya y al Dr. Oscar Hernández Calderón, por las valiosas contribuciones que hicieron al trabajo final y por el tiempo que dedicaron para revisarlo, aún a pesar de tantas actividades que los ocupan.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo esta institución de enorme calidad, por permitirme ser una estudiante más, aprender en sus instalaciones y que me brindo todo el apoyo durante mi estancia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto.

ÍNDICE

ABSTRACT	ii
RESUMEN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
NOMENCLATURA.....	x
1. INTRODUCCIÓN	20
1.1 Marco Teórico.....	22
1.1.1 Agua y redes de intercambio	22
1.1.2 Nexo Agua-Energía-Alimentos	23
1.1.3 Programación matemática	23
1.1.4 GAMS.....	25
1.2 Antecedentes.....	26
1.2.1 Redes de distribución de agua	26
1.2.2 Concepto del nexo agua-energía-alimentos.....	27
1.3 Hipótesis	27
1.4 Objetivos.....	28
1.4.1 Objetivo General.....	28
1.4.2 Objetivos Particulares.....	28
1.5 Justificación	28
1.6 Alcance	29

2. METODOLOGÍA	30
2.1 Planteamiento del problema.....	31
2.2 Superestructura	32
2.3 Modelo matemático	33
2.3.1 Modelo para distribución de agua	33
2.3.2 Modelo para la producción de energía	38
2.3.3 Existencia de los nuevos tanque de almacenamiento.....	39
2.3.4 Existencia de las nuevas plantas energéticas de desalinización.....	40
2.3.5 Existencia del colector solar.....	42
2.3.6 Costo de tuberías y bombeo	43
2.3.7 Costos de la producción de alimentos	45
2.3.8 Reducción del crédito fiscal	46
2.3.9 Funciones objetivo	47
2.3.10 Método de optimización.....	49
3. RESULTADOS	50
3.1 Caso de estudio	50
3.2 Análisis del caso de estudio	51
4. CONCLUSIONES	60
5. REFERENCIAS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Esquema general de una red de intercambio de agua.	22
2	Esquema representativo del nexo agua-energía-alimentos	23
3	Tipos de modelos en función de sus variables	24
4	Metodología propuesta	30
5	Localización del caso de estudio (Distritos de riego del organismo de cuenca: Noroeste). (CONAGUA, 2014).	31
6	Superestructura propuesta	34
7	Solución compromiso (<i>CS</i>) respecto a las funciones objetivo.	54
8	Variación de la demanda de agua para cada zona agrícola.	55
9	Producción de alimentos para cada zona agrícola.	55
10	Red óptima para el uso de agua a nivel macroscópico.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Factores de producción de cultivos.	46
2	Resultados de los límites superiores e inferiores (matriz de pagos) para cada función objetivo	49
3	Punto utópico y punto nadir para nuestro caso de estudio.	52
4	Resultados de la solución compromiso (CS) respecto a las funciones objetivo.	53
5	Energía utilizada para entregar agua a los usuarios.	56
6	Producción agrícola anual por cultivo para cada zona de irrigación.	57
7	Resultados económicos para los escenarios analizados.	58

NOMENCLATURA

Subíndices

<i>b</i>	Biocombustibles
<i>f</i>	Combustibles fósiles
<i>g</i>	Localización de los usuarios agrícolas
<i>i</i>	Acuíferos existentes
<i>j</i>	Pozos profundos
<i>n</i>	Localización de las plantas de desalinización existentes
<i>o</i>	Localización de los usuarios industriales
<i>p</i>	Localización de los tanques de almacenamiento de agua existentes
<i>q</i>	Posible localización de nuevos tanques de almacenamiento de agua
<i>r</i>	Localización de los usuarios domésticos
<i>t</i>	Distribución del tiempo en meses
<i>u</i>	Posible localización de nuevas plantas energéticas de desalinización
<i>x</i>	Presa existente como recursos naturales
<i>c</i>	Cultivo

Variable positivas

$a_{i,j,t}^{dw}$	Agua enviada a los pozos profundos desde los acuíferos, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$agr_{dem}_{g,t}$	Agua requerida por los usuarios agrícolas, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
<i>Annual Profit</i>	Ganancias anual por las venta de agua, $\$ \times 10^6$
$AREA_u^{solar,max}$	Área máxima efectiva del colector solar, m^2
$A_{u,t}^{solar}$	Área efectiva del colector solar, m^2

$b_{n,t}^{E,rej}$	El agua rechazada al mar de las plantas de desalinización existentes, m ³ x10 ⁶ /año
$b_{u,t}^{N,rej}$	El agua rechazada al mar de las nuevas plantas de desalinización, m ³ x10 ⁶ /año
$B_{n,i,t}^{E,des}$	Agua recibida de las plantas de desalinización existentes, m ³ x10 ⁶ /año
$B_{u,i,t}^{N,des}$	Agua recibida de las nuevas plantas de desalinización, m ³ x10 ⁶ /año
$c_{c,g,t}^{food}$	Agua total usada por los usuarios agrícolas por cada cultivo, m ³ x10 ⁶ /ton
$d_{r,j,t}^{dom}$	Distribución de agua en las estaciones centrales de los pozos profundos (doméstico), m ³ x10 ⁶ /año
$d_{g,j,t}^{agr}$	Distribución de agua en las estaciones centrales de los pozos profundos (agrícola), m ³ x10 ⁶ /año
$d_{o,j,t}^{ind}$	Distribución de agua en las estaciones centrales de los pozos profundos (industrial), m ³ x10 ⁶ /año
$D_{n,p,t}^{E,Esto}$	Agua recibida en los tanques de almacenamiento de plantas de desalinización existentes, m ³ x10 ⁶ /año
$D_{u,p,t}^{N,Esto}$	Agua recibida en tanques de almacenamiento de nuevas plantas energéticas de desalinización, m ³ x10 ⁶ /año
<i>DistributionCost</i>	Costo de distribución, \$x10 ⁶
$E_{r,t}^{dom}$	Demanda de energía por los usuarios domésticos, kW x10 ⁶
$E_{g,t}^{agr}$	Demanda de energía por los usuarios agrícolas, kW x10 ⁶
$E_{o,t}^{ind}$	Demanda de energía por los usuarios industriales, kW x10 ⁶
<i>EnergySales</i>	Venta de energía de las plantas energéticas de desalinización, \$ x10 ⁶

$E_{n,t}^{production^E}$	Producción de energía de las plantas energéticas de desalinización, kW x10 ⁶
$TEPD_{opcost}$	Costo total de operación de las plantas energéticas de desalinización existentes, \$ x10 ⁶
$E_{u,t}^{production^N}$	Energía producida en nuevas plantas energéticas de desalinización, kW x10 ⁶
$F_{i,t}^{agr}$	Recarga del acuífero de usuarios agrícolas, m ³ x10 ⁶ /año
F_{co_2}	Cantidad de GHGE emitida en la planta de energía de doble propósito, ton de CO ₂ eq.
$FertilizersCost$	Costo de fertilizantes, \$x10 ⁶
FN_{profit}	Ganancia de la red alimentaria, \$x10 ⁶
$FoodSales$	Venta de alimentos, \$x10 ⁶
$G_{n,x,t}^{E,rel}$	Agua recibida en las presas de plantas de desalinización existentes, m ³ x10 ⁶ /año
$G_{u,x,t}^{N,rel}$	Agua recibida en las presas de nuevas plantas de desalinización, m ³ x10 ⁶ /año
$h_{r,t}^{dom}$	Agua en la estación central doméstica, m ³ x10 ⁶ /año
$h_{g,t}^{agr}$	Agua en la estación central agrícola, m ³ x10 ⁶ /año
$h_{o,t}^{ind}$	Agua en la estación central industrial, m ³ x10 ⁶ /año
H_y	Horas de funcionamiento de la planta por año, h/año
$InstCost_q^{sto}$	Costo de instalación de almacenamiento, \$ x10 ⁶
$InstCost_u^{pdes}$	Costo de instalación (nuevas plantas energéticas de desalinización), \$ x10 ⁶
K_F	Factor utilizado para anualizar la inversión, año ⁻¹
$Land_{c,g}^{food}$	Tierra requerida por cada cultivo, ha
$M_{x,t}$	Agua en la presa, m ³ x10 ⁶ /año

$NP_{Dinst}cost$	Costo de instalación de las nuevas plantas energéticas de desalinización, \$ $\times 10^6$
$NP_{Dop}cost$	Costo de operación de las nuevas plantas energéticas de desalinización, \$ $\times 10^6$
$OpCost_{u,t}^{pdes}$	Costo de operación (plantas energéticas de desalinización), \$ $\times 10^6$
$TOpCost_{n,t}^{E,des}$	Costo total de operación (plantas energéticas de desalinización existentes), \$ $\times 10^6$
$OpCost_{Land}$	Costo de operación de la tierra, \$ $\times 10^6$
pca	Porcentaje de agua que se filtra en el suelo
$PipingCost$	Costo de tubería, \$ $\times 10^6$
$PumpingCost$	Costo de bombeo, \$ $\times 10^6$
$P_{c,g,t}^{food}$	Producción de cultivos, ton
Q	Potencia, $\text{kJ} \times 10^6/\text{año}$
$R_{i,t}^{aq}$	Recarga natural de agua, $\text{m}^3 \times 10^6/\text{año}$
$SolarCost$	Costo total del colector solar, \$ $\times 10^6$
$SCCost_u^{solar}$	Costo capital del colector solar, \$ $\times 10^6$
$SOCost_{u,t}^{solar}$	Costo de operación del colector solar, \$ $\times 10^6$
$S_{p,i,t}^{E,aq}$	Agua recibida de los tanques de almacenamiento existentes, $\text{m}^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{q,i,t}^{N,aq}$	Agua recibida de los nuevos tanques de almacenamiento existentes, m^3 $\times 10^6/\text{año}$
$S_{p,r,t}^{E,dom}$	Agua recibida desde los tanques de almacenamiento existentes (doméstico), $\text{m}^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{q,r,t}^{N,dom}$	Agua recibida desde los nuevos tanques de almacenamiento (doméstico), m^3 $\times 10^6/\text{año}$

$S_{g,p,t}^{E,agr}$	Agua recibida desde los tanques de almacenamiento existentes (agrícola), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{g,q,t}^{N,agr}$	Agua recibida desde los nuevos tanques de almacenamiento (agrícola), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{o,p,t}^{E,ind}$	Agua recibida desde los tanques de almacenamiento existentes (industrial), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{o,q,t}^{N,ind}$	Agua recibida desde los nuevos tanques de almacenamiento (industrial), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{p,t}^E$	Agua en tanques de almacenamiento existentes, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$S_{q,t}^N$	Agua en nuevos tanques de almacenamiento, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
S_q^{max}	Valor máximo de almacenamiento, $m^3 \times 10^6$
<i>StorageCost</i>	Costo de almacenamiento, $\$ \times 10^6$
SW_u^{max}	Consumo máximo de agua de mar, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$SW_{n,t}^{in,E}$	Agua total extraída del mar para las plantas de desalinización existentes, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$SW_{u,t}^{in,N}$	Agua total extraída del mar para nuevas plantas energéticas de desalinización, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
<i>TAC</i>	Costo total anual, $\$ \times 10^6$
<i>TEC^N</i>	Costo total de energía, $\$ \times 10^6$
<i>TEnergy_t</i>	Energía total producida, $kW \times 10^6$
<i>TER_{u,t}</i>	Energía total requerida, $kJ \times 10^6$
<i>TRC</i>	Reducción del crédito fiscal, $\$ \times 10^6$

$V_{r,n,t}^{E,dom}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las plantas de desalinización existentes (doméstico), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$V_{g,n,t}^{E,agr}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las plantas de desalinización existentes (agrícola), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$V_{o,n,t}^{E,ind}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las plantas de desalinización existentes (industrial), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$V_{r,u,t}^{N,dom}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las nuevas plantas de desalinización (doméstico), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$V_{g,u,t}^{N,agr}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las nuevas plantas de desalinización (agrícola), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$V_{o,u,t}^{N,ind}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las nuevas plantas de desalinización (industrial), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
<i>Water Sales</i>	Venta de agua de plantas energéticas de desalinización, $\$ \times 10^6$
$W_{i,t}^{aq}$	Agua en el acuífero, $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$W_{r,x,t}^{dom}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las presas (doméstico), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$W_{g,x,t}^{agr}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las presas (agrícola), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
$W_{o,x,t}^{ind}$	Agua recibida en las estaciones centrales de las presas (industrial), $m^3 \times 10^6/\text{año}$
<i>Parámetros</i>	
AEC_t	Costo de energía agrícola, $\$ \times 10^6/\text{kW} \times 10^6$
APC	Costo de la tubería agrícola, $\$ \times 10^6/\text{m}^3 \times 10^6$
AQP	Costo de la tubería de pozo profundo, $\$ \times 10^6/ \times 10^6 \text{ m}^3$

$ATot^{min}$	Área mínima disponible de colector solar, m^2
$ATot^{max}$	Área máxima disponible de colector solar, m^2
AVF^{max}	Cantidad máxima disponible para combustibles fósiles, $kg \times 10^6/mes$
AVB^{max}	Cantidad máxima disponible para biocombustibles, $kg \times 10^6/mes$
BPC	Costo de la tubería de recarga del acuífero, $\$ \times 10^6/ \times 10^6m^3$
BFC	Costo de biocombustible, $\$ \times 10^6/ kJ \times 10^6$
DEC_t	Costo unitario de energía doméstica, $\$ \times 10^6/kW \times 10^6$
DPC	Costo unitario de la tubería doméstica, $\$ \times 10^6/m^3 \times 10^6$
$domdem_{r,t}$	Necesidades de agua de los usuarios domésticos, $m^3/año$
EPC	Costo de la tubería de recarga de almacenamiento (planta desalinizadora existente), $\$ \times 10^6/ \times 10^6m^3$
FCF	Factor de consumo de combustible, $kJ \times 10^6/m^3 \times 10^6$
FFC	Costo del combustible fósil, $\$ \times 10^6/ kJ \times 10^6$
$FCV_{c,g,t}$	Valor de los alimentos, $\$ \times 10^6/ ton$
GEP	Factor de generación de energía, $kW \times 10^6/m^3 \times 10^6$
GPC	Costo unitario de tubería de recarga de la presa, $\$ \times 10^6/ \times 10^6m^3$
HPF_f	Potencia de calentamiento para combustibles fósiles, $kJ \times 10^6/kg \times 10^6$
HPB_b	Potencia de calentamiento para biocombustibles, $kJ \times 10^6/kg \times 10^6$
IEC_t	Costo unitario de energía industrial, $\$ \times 10^6/kW \times 10^6$
IPC	Costo unitario de la tubería industrial, $\$ \times 10^6/ \times 10^6m^3$
$inddem_{o,t}$	Necesidades de agua de los usuarios industrial, $m^3/año$
NPC	Costo unitario de la tubería de recarga de almacenamiento (nueva planta energética de desalinización), $\$ \times 10^6/ \times 10^6m^3$

PPA	Costo unitario de bombeo agrícola, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PAQ	Costo unitario de bombeo de pozos profundos, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPC	Costo unitario de bombeo de recarga de acuífero, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPD	Costo unitario de bombeo doméstico, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPE	Costo unitario de bombeo de recarga de almacenamiento (planta de desalinización existente), \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPG	Costo unitario de bombeo de recarga de la presa, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPI	Costo unitario de bombeo industrial, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPN	Costo unitario de bombeo de recarga de almacenamiento (nueva planta energética de desalinización), \$ $x10^6/m^3 x10^6$
PPS	Costo unitario de bombeo de almacenamiento, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
R_{tax}	Crédito fiscal para CO ₂ , \$ $x10^6/ton$ de CO ₂ eq.
SPC	Costo unitario de la tubería de almacenamiento, \$ $x10^6/ x10^6m^3$
$SW_{u,t}^{N,max}$	Valor máximo del agua de mar extraída del mar, $m^3 x10^6/año$
$TF_{CO_2}^{REF}$	Emisiones globales de gases de efecto invernadero total cuando solo se usan combustibles fósiles, ton de CO ₂ eq.
$UCE_{u,t}^{solar}$	Energía recolectada útil, $kJ x10^6/m^2$ mes
UCF_c	Costo unitario de fertilizantes, \$ $x10^6/ton$ fertilizante
VCL_c	Costo unitario de operación, \$ $x10^6/ha$
$UTC_{c,g}^{food}$	Costo unitario d transporte, \$ $x10^6/ton$
WAC_t	Costo unitario del agua para uso agrícola, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
WDC_t	Costo unitario del agua para uso doméstico, \$ $x10^6/m^3 x10^6$
WIC_t	Costo unitario del agua para uso industrial, \$ $x10^6/m^3 x10^6$

Z_1	Costo fijo unitario del tanque, \$ x10 ⁶
Z_2	Costo fijo unitario del tanque, \$ x10 ⁶
Z_3	Costo fijo unitario de la nueva planta energética de desalinización, \$ x10 ⁶
Z_4	Costo fijo unitario de la nueva planta energética de desalinización, \$ x10 ⁶
Z_5	Costo fijo unitario de la nueva planta energética de desalinización, \$ x10 ⁶
Z_6	Costo fijo unitario de la nueva planta energética de desalinización, \$ x10 ⁶
Z^{solar}	Costo unitario del colector solar, \$ x10 ⁶
α	Factor para considerar las economías de escala
β	Factor de rechazo de las plantas energéticas de desalinización
$\phi_{c,g,t}^{food}$	Factor de consumo de agua, m ³ x10 ⁶ /ton
$\lambda_{c,g}^{food}$	Factor de producción por tierras, ha/ton
ε_c^{FCrop}	Factor de consumo de fertilizantes, ton fertilizante/ton
$\Theta_q^{sto,max}$	Capacidad máxima del tanque, m ³ x10 ⁶
$\Theta_q^{sto,min}$	Capacidad mínima del tanque, m ³ x10 ⁶
$\Theta_u^{pdes,max}$	Capacidad máxima de las nuevas plantas energéticas de desalinización, m ³ x10 ⁶ /año
$\Theta_u^{pdes,min}$	Capacidad mínima de las nuevas plantas energéticas de desalinización, m ³ x10 ⁶ /año
$\Phi_{c,g,t}^{dfood,min}$	Producción mínima de alimentos, ton
$\Phi_{c,g,t}^{dfood,max}$	Producción máxima de alimentos, ton
$\Lambda_{c,g}^{dfood,min}$	Máximos requerimientos de tierra, ha

$\Lambda_{c,g}^{dfood,max}$ Mínimos requerimientos de tierra, ha

Variables Binarias

w_u^{solar} Existencia del colector solar

y_q^{sto} Existencia de los tanques de almacenaje

y_u^{pdes} Existencia de las plantas energéticas de desalinización

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la globalización y las interacciones que existen en el mundo han llevado a que recursos como el agua, la energía y los alimentos sean esenciales para la vida y el desarrollo sostenible de la sociedad. En la gran mayoría del mundo se sufre por algún tipo de escasez relacionado con estos recursos, por lo que en los próximos años posiblemente aumentará a mayor escala (Taniguchi y col., 2017). El cumplimiento de estas demandas será un gran desafío para la humanidad debido al crecimiento acelerado de la población y la densidad urbana, la escasez de agua, la dependencia de solo una fuente de suministro, incremento industrial y agrícola de los recursos, el desarrollo económico, la urbanización y los efectos del cambio climático (Gurdak y col., 2017; Rojas-Torres y col., 2014).

En ese mismo sentido, la población y el crecimiento económico plantean desafíos únicos para asegurar agua, energía y alimentos suficientes para satisfacer la demanda a nivel regional, nacional e internacional (Endo y col., 2017). Por eso, los países en desarrollo se enfrentan a un desafío difícil para satisfacer las crecientes demandas de alimentos, agua y energía, lo que se ve agravado por el cambio climático, buscando metas globales de desarrollo como seguridad alimentaria, disponibilidad de un suministro de agua, y sostenibilidad en el uso de la energía para toda la población (García-Montoya y col., 2016).

La adaptación efectiva al cambio climático requiere el uso eficiente de la tierra, el agua, la energía y otros recursos vitales, y el esfuerzo coordinado para minimizar las compensaciones y maximizar las sinergias. El agua, la energía y los alimentos son tres de los pilares claves sobre los que la humanidad existe y se desarrolla; existiendo entre ellos una multitud de conexiones y concesiones entre ellos (Kaddoura y Khatib, 2017). Por ejemplo, el agua se utiliza en la irrigación agrícola y también es esencial para la generación de energía, ya sea directa o indirectamente. La energía se utiliza en el bombeo de agua y para la mecanización de diversas actividades agrícolas. El uso de agua gris reciclada para aplicaciones no potables puede disminuir el riesgo de superar la escasez de agua, pero aumenta la demanda de energía para el tratamiento de agua.

En relación a lo anterior, el enfoque del nexo para la gestión de este sector busca comprender los vínculos, dependencias y compensaciones asociados con los elementos centrales dentro del nexo en particular (Hoff, 2011). De allí que el nexo agua-energía-alimentos se está promoviendo como una herramienta conceptual para lograr un desarrollo sostenible. Sin embargo, los marcos para la implementación del nexo no han incorporado explícita o adecuadamente perspectivas de medios de vida sustentables. Los objetivos de desarrollo sostenible representan una prueba globalmente significativa para la implementación de este pensamiento del nexo.

Bajo este concepto, existen diversos usuarios que se ven afectados y relacionados como la industria, la agricultura y la sociedad. Por ejemplo, la agricultura es el mayor consumidor de recursos de agua dulce del mundo, y más de una cuarta parte de la energía utilizada en todo el mundo se gasta en la producción y suministro de alimentos. Los vínculos complejos entre estos dominios críticos requieren un enfoque integrado para garantizar adecuadamente el agua, la seguridad alimentaria, la agricultura sostenible y la producción de energía en todo el mundo (Abou y Higgins, 2016).

Como es conocido, el agua es un recurso finito cuya demanda aumenta exponencialmente por sus usuarios; por lo que el garantizar que todos tengan acceso a un suministro confiable, es crucial para la supervivencia humana y el progreso sostenible. A medida que los recursos hídricos se vuelven más escasos, la dependencia del sector energético y alimentario, y el hecho de que los tres sustentan varios de los objetivos de desarrollo sostenible, significa que los encargados de la toma de decisiones en los tres ámbitos se están centrando cada vez más en la gestión de los recursos hídricos, la protección de los ecosistemas, el abastecimiento de agua y su saneamiento como parte de su política y práctica (Kaddoura, y col., 2017).

Es por ello que en la presente Tesis nos enfocaremos en la distribución del agua como vehículo para ilustrar el papel que la perspectiva del nexo agua-energía-alimentos puede tener en la promoción de los servicios sobre usuarios domésticos, agrícolas e industriales, que permitan reducir la demanda de agua. Dicha estrategia se basa en construir y resolver un modelo matemático en el que se consideren todas las configuraciones de uso, reusó,

reciclo y almacenamiento de agua, el cual está conformado por balances de materia, restricciones operacionales, de diseño y de producción.

1.1 Marco Teórico

1.1.1 Agua y redes de intercambio

El agua es un recurso renovable pero finito crucial en los procesos de distintos sectores. Es la fuente y el sustento de la vida, contribuye a regular el clima del mundo y con su fuerza formidable modela la Tierra. Para poder garantizar el uso adecuado de este recurso se han creado las redes de integración de agua.

Mismas que tienen como objetivo el minimizar el uso y costos asociados a este recurso (El-Halwagi, 2006). La escasez de agua es un problema que ha sido analizado de manera matemática con algoritmos, gráficas y métodos algebraicos. En la **Figura 1** podemos encontrar el esquema más básico donde el agua desechada de un proceso y/o actividad es reciclada (o tratada previamente si es que se necesita) a esta misma o rechazada.

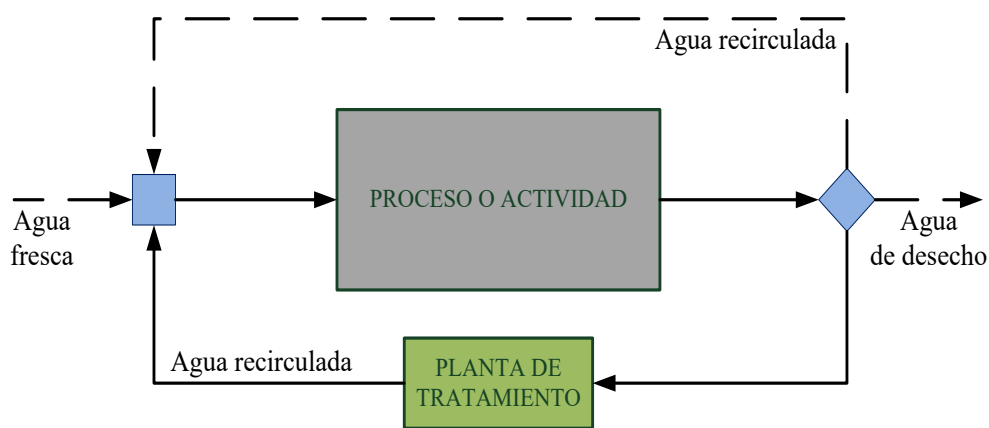


Figura 1. Esquema general de una red de intercambio de agua.

La integración de agua en plantas ha sido abordada de diferentes maneras, dependiendo de su objetivo (minimización de agua fresca, flujo de descarga al medio ambiente y costo de tratamiento), debido a esto se han reportado distintos modelos de las redes de intercambio y distribución de agua. En este contexto, Rojas-Torres y col. (2014), Alnouri y col. (2015), García-Montoya y col. (2016) y Rubio-Castro y col. (2016) presentaron diferentes enfoques del sistema de reúso y reciclo de agua a través de diferentes metodologías, identificando oportunidades y perspectivas de reutilización en el campo urbano, agrícola e industrial.

1.1.2 Nexo Agua-Energía-Alimentos

El agua, la energía y los alimentos son esenciales para el bienestar humano y para un desarrollo sostenible. El nexo agua-energía-alimentos se usa para explicar, analizar y poder entender las complejas interacciones entre estos tres sectores. Analizar estos sectores en conjunto nos ayuda a entender e identificar su interrelación y a construir sinergias que permitan una planificación integrada que proporcione soluciones que requieran tanto de políticas públicas como de inversiones a corto, mediano y largo plazo (Larcom y col., 2017). Como se observa en la **Figura 2**, donde se ilustra como la base de un proceso sostenible (sociedad, economía y medio ambiente) está estrechamente relacionado con las metas globales de desarrollo como son el suministro de agua, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad en el uso de la energía, y estas a su vez dependen de la distribución adecuada de los recursos hídricos (Miralles-Wilhelm, 2014).

Nexo Agua-Energía-Alimentos

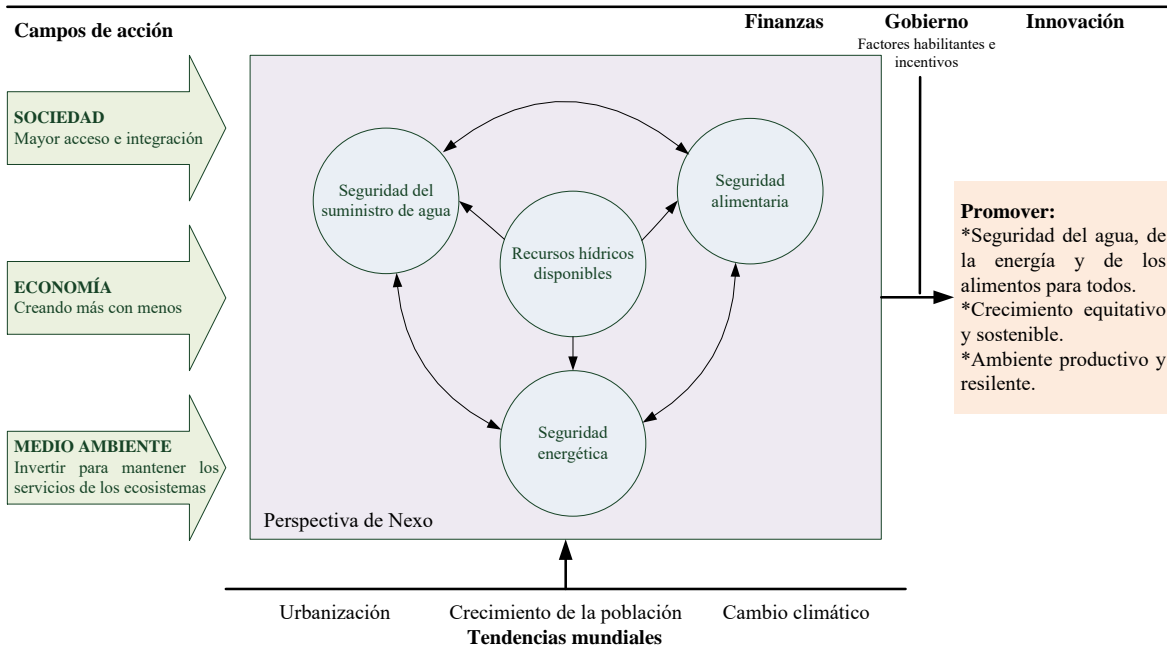


Figura 2. Esquema representativo del nexo agua-energía-alimentos.

1.1.3 Programación matemática

La programación matemática es una herramienta que permite plantear y resolver problemas de alto grado de complejidad. En la programación matemática se involucra la optimización de una funciones objetivo que depende de un conjunto de variables de decisión

y de parámetros. Estas variables pueden ser continuas o enteras, y pueden tener límites máximos y mínimos, así como formar parte de un conjunto de restricciones que limitan la solución de nuestro problema. El tipo de variables y de restricciones determinan el tipo de modelo, como podemos observar en la **Figura 3**. Se observa que existen problemas enteros, problemas lineales, problemas no lineales, problemas mixtos-enteros lineales y problemas mixtos-enteros no lineales. En los diferentes tipos de problemas pueden entrar en juego variables continuas y/o enteras asociadas de manera inteligente por medio de disyunciones matemáticas (Vecchietti y col., 2003).

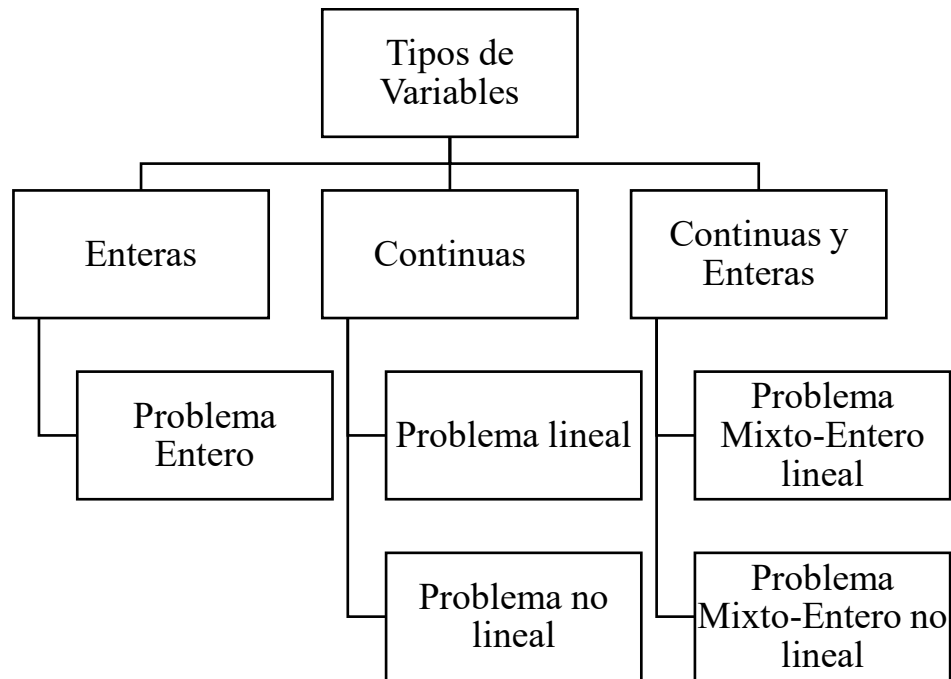


Figura 3. Tipos de modelos en función de sus variables.

La solución para problemas de programación matemática se compone de tres etapas: la primera etapa corresponde a la obtención del modelo matemático que por medio de ecuaciones algebraicas representa los fenómenos y/o situaciones prácticas del problema en cuestión. Una vez obtenido el modelo, se procede a la segunda etapa: la codificación del mismo en la plataforma computacional apropiada; y finalmente, la tercera etapa: se ejecuta tal codificación por medio de resolvedores previamente cargados en la plataforma computacional a fin de obtener las condiciones óptimas del caso de estudio. En cuanto a las plataformas computacionales, una de las más empleadas para resolver problemas de

optimización es GAMS, por sus siglas en inglés General Algebraic Modeling System (Brooke y col., 2017). Tal plataforma, es un programa de implementación de algoritmos matemáticos que permiten resolver problemas de optimización, y presenta la ventaja de promover un lenguaje de programación que permite escribir en un editor la formulación matemática del problema y posteriormente aplicar una serie de resolvedores para dar solución al problema.

1.1.4 GAMS

GAMS es un software de modelado algebraico que está diseñado específicamente para el modelado de problemas de optimización lineal, no lineal y mixto-entero. El sistema es especialmente útil con problemas grandes y complejos. GAMS está disponible para su uso en computadoras personales, estaciones de trabajo, *mainframes* y supercomputadoras. Este permite al usuario concentrarse en el problema de modelado, haciendo la instalación simple y la plataforma por así decirlo se encarga de los detalles que requieren mucho tiempo cómputo y el sistema de aplicación de software específico.

Esto permite al usuario concentrarse en el modelado, al eliminar la necesidad de pensar en los problemas puramente técnicos específicos de la máquina, tales como cálculos de direcciones, tareas de almacenamiento, la vinculación de subrutinas de entrada-salida y el control de flujo, lo cual aumenta el tiempo disponible para conceptualizar y ejecutar el modelo, así como el análisis de los resultados. El lenguaje GAMS es formalmente similar a los lenguajes de programación de uso general. Por lo tanto, es familiar para cualquier persona con experiencia en programación. Utilizando GAMS, los datos se introducen una sola vez en la lista de parámetros y forma de tabla. Los modelos se describen en declaraciones algebraicas concisas que son fáciles de leer. De esta manera, conjuntos completos de restricciones estrechamente relacionadas se introducen en una sentencia. GAMS genera automáticamente cada ecuación de restricción, y permite al usuario hacer excepciones en los casos en que no se desea la generalidad. Las declaraciones de los modelos pueden ser reutilizados sin tener que cambiar el álgebra cuando surgen otras instancias de los mismos o de otros problemas conexos. Estos modelos pueden ser desarrollados y documentados de forma simultánea porque GAMS permite al usuario incluir un texto explicativo, como parte de la definición de cualquier símbolo o ecuación. (Brooke y col., 2017).

Los tipos de modelo que incluye GAMS son del tipo lineal (LP), mixto-entero lineal (MIP), mixto-entero no lineal (MINLP), y las diferentes formas de problemas no lineales (NLP), y puede soportar los siguientes tipos de modelos básicos:

- LP Programación lineal.
- MIP Programación entera-mixta.
- NLP Programación no lineal.
- MCP Problemas complementarios mixtos.
- MPEC Programas matemáticos con restricciones de equilibrio.
- CNS Sistemas restringidos no lineales.
- DNLP Programación no lineal con derivadas discontinuas.
- MINLP Programación con mezcla de integración y no lineal.
- QCP Programación cuadrática restringida.
- MIQCP Programas con restricciones de mezcla de integración cuadrática.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Redes de distribución de agua

Para resolver el problema de distribución de agua en los últimos años se han planteado múltiples estrategias. Por ejemplo, Nápoles-Rivera y col. (2013) propusieron un modelo matemático para la gestión sostenible del agua en los sistemas macroscópicos, en el que la demanda de agua es subsidiada por el agua de lluvia y agua regenerada, donde se reportó un modelo de múltiples períodos incluyendo el almacenamiento y distribución en su programación. Gao y col. (2014) presentó un enfoque de optimización para integrar los sistemas de gestión del agua teniendo en cuenta la reducción del consumo de agua y costo del suministro de agua fresca. Zheng y Zecchin (2014) introdujeron un método de optimización multiobjetivo para el diseño de sistemas de distribución de agua en la que se tienen en cuenta, y la minimización del costo total de la red incluye a la selección de los diámetros de las tuberías y la optimización de la presión a través de la red de múltiples fuentes de suministro. Nápoles-Rivera y col. (2015) propusieron un modelo de programación matemática para el uso eficiente y sostenible del agua en condiciones de incertidumbre paramétrica. Rojas-Torres y col. (2014) reportaron un modelo de optimización para el almacenamiento y distribución de agua en las ciudades en un marco plurianual, que

involucraba agua regenerada, agua de lluvia recolectada, embalses, manantiales y pozos profundos para satisfacer las demandas industriales, agrícolas y domésticos, y luego este modelo se amplió para incluir múltiples objetivos por Rojas-Torres y col. (2015). Alnouri y col. (2015) presentaron un modelo mixto-entero no lineal de programación (MINLP) para integrar las redes de agua macroscópicas para el reúso del agua dentro de las ciudades industriales, en los que se introdujeron las opciones de tratamiento de agua centralizado y descentralizado. García-Montoya y col. (2015) presentaron una formulación de optimización para el diseño de redes de agua donde se involucra la recolección de agua de lluvia y la regeneración de aguas residuales. Rubio-Castro y col. (2016) propusieron un modelo mixto-entero no lineal para el diseño óptimo de redes de integración de agua basado en una superestructura que considera el uso, reúso y reciclaje del agua en la agricultura.

1.2.2 Concepto del nexo agua-energía-alimentos

Cairns y Krzywoszynska (2016) explicaron que la existencia de un nexo agua-energía-alimentos ha estado ganando una atención significativa en los debates internacionales sobre políticas de recursos naturales en los últimos años. También, en la literatura científica tratan de generalizar este concepto y sus relaciones en trabajos como los de Brazilian y col. (2011), Beisheim (2013), FAO (2014), Lawford y col. (2011), y Rahaman y col. (2013). En ese tenor, se han realizado conferencias como la del Nexus de Bonn 2011, donde el gobierno Alemán organizó la Conferencia Internacional de las Naciones Unidas sobre el desarrollo sostenible, en la cual se abordó este tema más a fondo y se plantearon nuevas metodologías. A esto le continuaron los debates en centros de conferencias como Nexus 2014 en Carolina del Norte y la semana mundial del Agua 2014 en Estocolmo. Bajo estos conceptos se han sentado las bases para el desarrollo de esta nueva metodología en cuanto al nexus. Podemos decir que el término “nexus” puede verse actualmente como una palabra de moda que está emergiendo por diferentes partes interesadas en debate sobre recursos naturales y sostenibles.

1.3 Hipótesis

Con el modelo de optimización propuesto se permitirá encontrar a través de múltiples prioridades la relación en seguridad alimentaria, sostenibilidad en el uso y gestión de la energía y suministro de agua, y con esto construir sinergias que permitan una planificación integrada que proporcione soluciones al problema planteado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo general de optimización para la síntesis y reconfiguración del uso de agua a nivel macroscópico considerando la disposición, obtención y destino.

1.4.2 Objetivos Particulares

- Proponer un modelo de optimización para uso del agua.
- Aplicar el modelo propuesto un caso de estudio de interés para mostrar la aplicabilidad y eficiencia del modelo propuesto.
- Analizar diferentes escenarios del caso de estudio para mostrar la robustez del modelo propuesto.
- Evaluar el consumo energético y producción agrícola dentro del modelo propuesto.

1.5 Justificación

La escasez de agua se produce cuando la demanda de agua dulce excede la recarga natural en un lugar específico, esta condición aumenta como resultado de la extracción excesiva de agua de todos los sectores (usuarios domésticos, industriales y agrícolas) en comparación con la oferta disponible, de acuerdo con los arreglos existentes (derechos de agua de riego) y la infraestructura disponible (Santibañez-Aguilar, 2015). Se prevé que la demanda global de agua pueda aumentar en aproximadamente un 55 % en 2050, causada principalmente por la demanda de agua en la industria (400 %), la generación térmica de electricidad (140 %) y los usuarios domésticos (130 %). Como resultado, la disponibilidad de agua disminuirá y como consecuencia el 40 % de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua en 2050. Hay una clara evidencia de que reservas de agua subterránea están disminuyendo. En la actualidad alrededor del 20 % de los acuíferos están sobreexplotados, algunos otros están en condiciones críticas (Water, U. N., 2014). Esto nos muestra un panorama sobre la demanda de agua a nivel global, especialmente en las economías emergentes, donde la agricultura, la industria y el desarrollo urbano están evolucionando rápidamente. De esta manera, es necesario encontrar formas sostenibles para garantizar el acceso al agua potable para todos.

Con esta idea se han realizado múltiples modelos de integración y distribución de agua, desde integración másica en redes de distribución de agua en las industrias (El-Halwagi y col., 2003; Foo y col., 2006) hasta varias estrategias para resolver el problema de distribución de agua (Oliveira-Esquerre y col., 2011; Nápoles-Rivera y col., 2013; Gao y col., 2014), todo esto con la finalidad de encontrar una metodología para maximizar la reutilización del agua teniendo en cuenta el uso del agua, su almacenamiento y distribución. Sin embargo, ninguno de estos modelos ha incorporado el factor del nexo agua-energía-alimentos; por esto, en este trabajo, como los objetivos se contraponen, se considerara un análisis de múltiples prioridades con la intención de llegar a una solución compromiso que permita compensarlos, y se cuantifica la relación del nexo agua-energía-alimentos para construir sinergias que permitan una planificación integrada.

1.6 Alcance

En el presente trabajo de tesis se planea generar diferentes escenarios en los cuales podremos probar que es posible distribuir agua de manera adecuada a través la integración másica, de igual manera podremos cuantificar el nexo agua-energía-alimentos. Esto nos permitirá comprender de mejor manera el problema existente y así tener una perspectiva más amplia del mismo. Todo esto nos permitirá evaluar el sistema desde los puntos de vista: económico, ambiental y social. El modelo propuesto representa una herramienta importante para la toma de decisión del escenario adecuado, ya que al tener objetivos contradictorios, este nos permitirá dar prioridades y ver cómo estas afectaran a cada uno de los objetivos considerados y proponer un escenario adecuado a las demandas existentes y futuras.

2. METODOLOGÍA

Para resolver el problema planteado se propuso la siguiente metodología mostrada en la **Figura 4.**

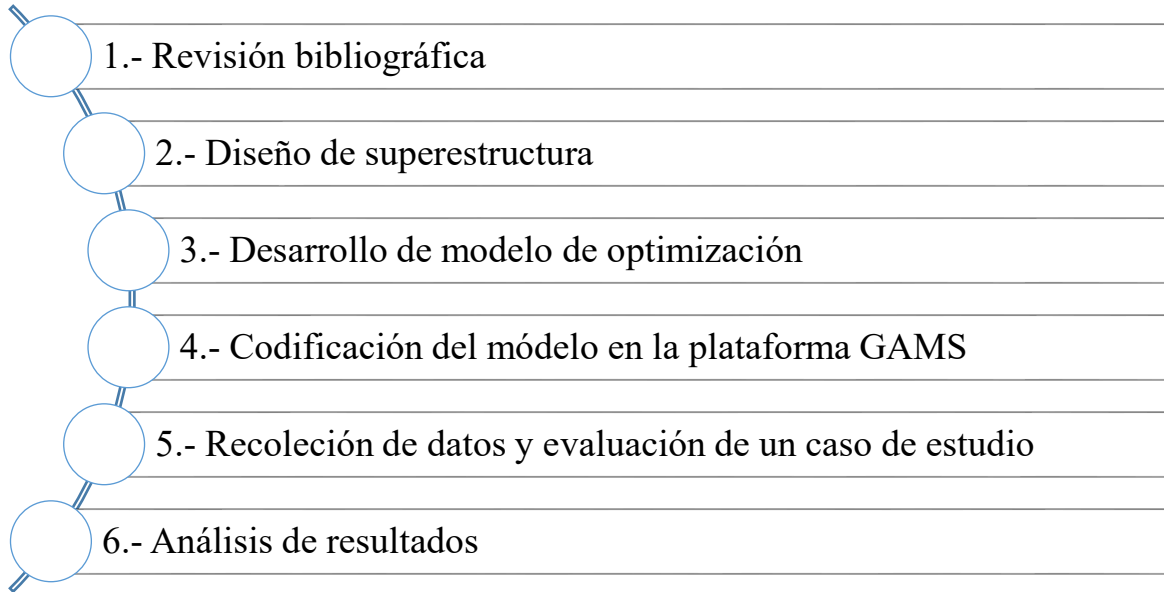


Figura 4. Metodología propuesta

1. Se realizó una extensa revisión bibliográfica, sobre los temas de interés del proyecto, tales como programación matemática, optimización de redes de agua en el uso urbano, en la industria y en la agricultura desde un panorama general, y relación entre agua-energía-alimentos.
2. Se propuso una superestructura que representa el problema a resolver, donde se incluyen todas las configuraciones de interés para las demandas de los usuarios del agua.
3. En base a la superestructura propuesta, se desarrolló el modelo matemático de optimización para el diseño del complejo residencial donde se incluyen todos los balances de materia, así como las restricciones del proceso.
4. Posteriormente se codificó el modelo de optimización en la plataforma de GAMS.
5. Se realizó la recolección de datos para un caso de estudio específico en una región del estado de Sonora, México. Una vez obtenidos los datos del caso de estudio, se colocaron en el modelo propuesto y se resolvió en GAMS.
6. Finalmente, se procedió a analizar los resultados obtenidos así como a la escritura y defensa de la tesis.

2.1 Planteamiento del problema

El problema abordado en este trabajo se puede definir de la siguiente manera: Considerar una región con un sistema macroscópico de distribución de agua. El sistema incluirá usuarios industriales, usuarios domésticos y usuarios agrícolas donde cada uno tendrá diferentes demandas de acuerdo a la temporada del año y la zona. Por ejemplo, para los usuarios industriales, la demanda permanece constante durante todo el año por su producción constante. Para los usuarios domésticos, la demanda variara entre los meses calientes y los meses fríos. Para los usuarios agrícolas, la demanda será variable de acuerdo a los requerimientos de la producción de alimentos. Las demandas de agua pueden ser satisfechas extrayendo agua de los recursos naturales (represas, acuíferos y ríos). La disponibilidad de los recursos naturales dependerá de la recarga natural (recarga vertical y recarga horizontal) y la precipitación. La electricidad será satisfecha mediante las plantas nuevas y existentes que además limpiarán el agua a través del proceso de desalinización de agua de mar. Para garantizar la sustentabilidad en el resultado del problema, se considerara la recarga de los cuerpos de agua sobreexplotados. Como caso de estudio se tomara una región del estado de Sonora, México (**Figura 5**).

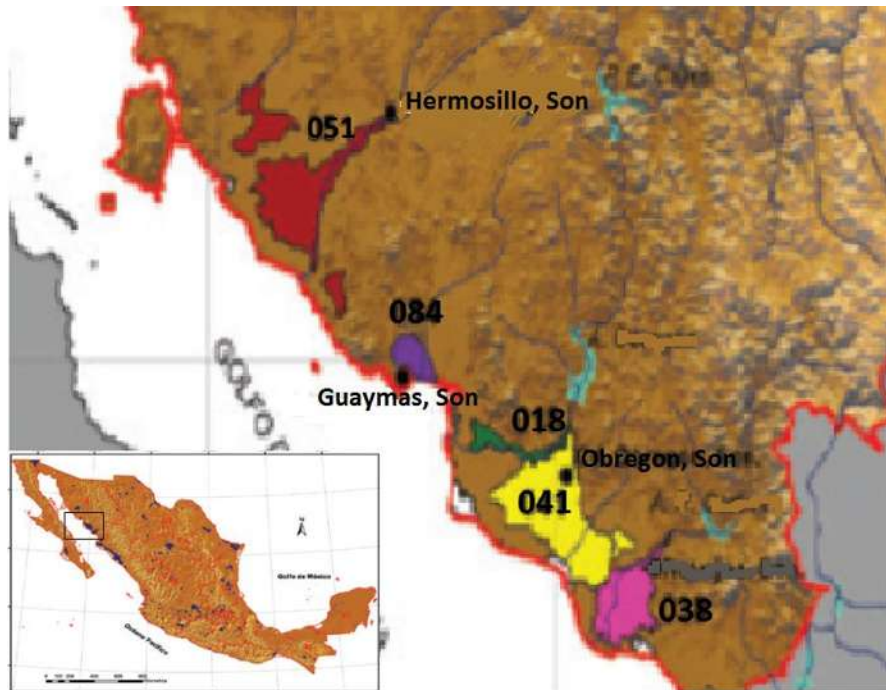


Figura 5. Localización del caso de estudio (Distritos de riego del organismo de cuenca: Noroeste). (CONAGUA, 2014).

2.2 Superestructura

La superestructura propuesta se basa en los sistemas de distribución que se muestra en la **Figura 6**. Este esquema contempla el uso de fuentes de agua naturales como acuíferos, pozos profundos y presas. También el modelo cuenta con las centrales eléctricas existentes en el área que pueden integrarse a un sistema de desalinización para proporcionar agua a la región. El modelo considera la posibilidad de instalar nuevas plantas de desalinización si la demanda de agua es más alta (playa Costa de Hermosillo y playa Valle de Yaqui); y considera tres tipos de consumidores de agua: usuarios domésticos (Hermosillo, Obregón y Guaymas), usuarios industriales (Hermosillo, Obregón y Guaymas), y usuarios agrícolas (Colonias Yaquis 018, Rio Yaqui 041, Costa de Hermosillo y Guaymas 084). La electricidad producida en estas plantas nuevas y existentes puede enviarse a los usuarios. El agua producida en las plantas energéticas de desalinización, nuevas y existentes, se envía para recargar acuíferos, presas, tanques de almacenamiento existentes y nuevos, también de las estaciones centrales se envía agua para alimentar los pozos profundos y presas; el agua de las estaciones centrales se distribuye a los usuarios, y el agua contenida en los tanques de almacenamiento nuevos y existentes puede ser entregada a los usuarios. El problema consiste en determinar la configuración óptima para la distribución del agua que involucre plantas energéticas de desalinización.

Esta superestructura además contempla la producción de cultivos en las zonas de riego, para lo cual la selección de cultivos se realizó bajo los criterios de consumo de agua, rendimiento de producción, demanda, hectáreas de cultivo y costo de venta; de tal manera que para la zona de riego de las Colonias Yaquis 018 se seleccionó en la temporada de otoño-invierno “granos de trigo” y en la temporada de primavera-verano “frijol (alubia)”, para la zona de riego del Rio Yaqui 041 se seleccionó en la temporada de otoño-invierno “granos de maíz, calabaza, chile verde, sandía y granos de trigo” y en la temporada de primavera-verano “espárrago, nuez, alfalfa verde y naranja”, para la zona de riego de la Costa de Hermosillo 051 se seleccionó en la temporada de otoño-invierno “cártamo, garbanzo y granos de trigo” y en la temporada de primavera-verano “uva, nuez y alfalfa verde”, y para la zona de riego de Guaymas 084 se seleccionó en la temporada de otoño-invierno “cártamo, granos de maíz, melón, calabacín, chile verde, sandía” y en la temporada de primavera-verano “uva,

espárrago, alfalfa verde y naranja”. Dando como resultado el análisis de 15 cultivos en la superestructura.

2.3 Modelo matemático

La red de distribución de agua se puede describir considerando los siguientes aspectos: másicos, energéticos y económicos. El modelo matemático se basa en la superestructura que se muestra en la **Figura 6**. Las demandas de agua y electricidad son rastreadas para usuarios domésticos (r), usuarios industriales (o) y usuarios agrícolas (g); las demandas de agua pueden ser satisfechas por el contenido de volumen de agua en los acuíferos existentes de la región (i) extrayendo agua de las profundidades existentes pozos en cada región (j) y por el agua existente en las presas de la región (x). En este caso, el modelo considera la ubicación de los tanques de almacenamiento existentes (p), así como la posible instalación de nuevos tanques de almacenamiento (q). La electricidad se puede generar en las centrales eléctricas existentes de la región (n), así como la posible instalación de nuevas plantas de doble propósito (u). Los requisitos de energía de la planta de energía de doble propósito pueden satisfacerse completamente utilizando combustibles fósiles (f), biocombustibles (j) y/o energía solar. El modelo se divide en períodos de tiempo (t) (meses). El modelo propuesto incluye relaciones lineales, no lineales y lógicas.

2.3.1 Modelo para distribución de agua

El cambio en el volumen total de agua de un acuífero durante un cierto período de tiempo ($W_{i,t} - W_{i,t-1}$) es igual a la suma del agua recibida de los tanques de almacenamiento existentes ($s_{p,i,t}^{E,aaq}$), nuevos tanques de almacenamiento ($s_{q,i,t}^{N,aaq}$), plantas de desalinización existentes ($B_{n,i,t}^{E,des}$), nuevas plantas energéticas de desalinización ($B_{u,i,t}^{N,des}$), la recarga de agua de los cultivos agrícolas ($F_{i,t}^{agr}$) y la recarga natural ($R_{i,t}^{aaq}$), menos el agua que se envía a los pozos profundos ($a_{i,j,t}^{dw}$):

$$\begin{aligned}
 W_{i,t} - W_{i,t-1} = & \sum_p s_{p,i,t}^{E,aaq} + \sum_q s_{q,i,t}^{N,aaq} + \sum_n B_{n,i,t}^{E,des} + \sum_u B_{u,i,t}^{N,des} \\
 & + F_{i,t}^{agr} + R_{i,t}^{aaq} - \sum_j a_{i,j,t}^{dw}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, t \neq 1
 \end{aligned} \tag{1}$$

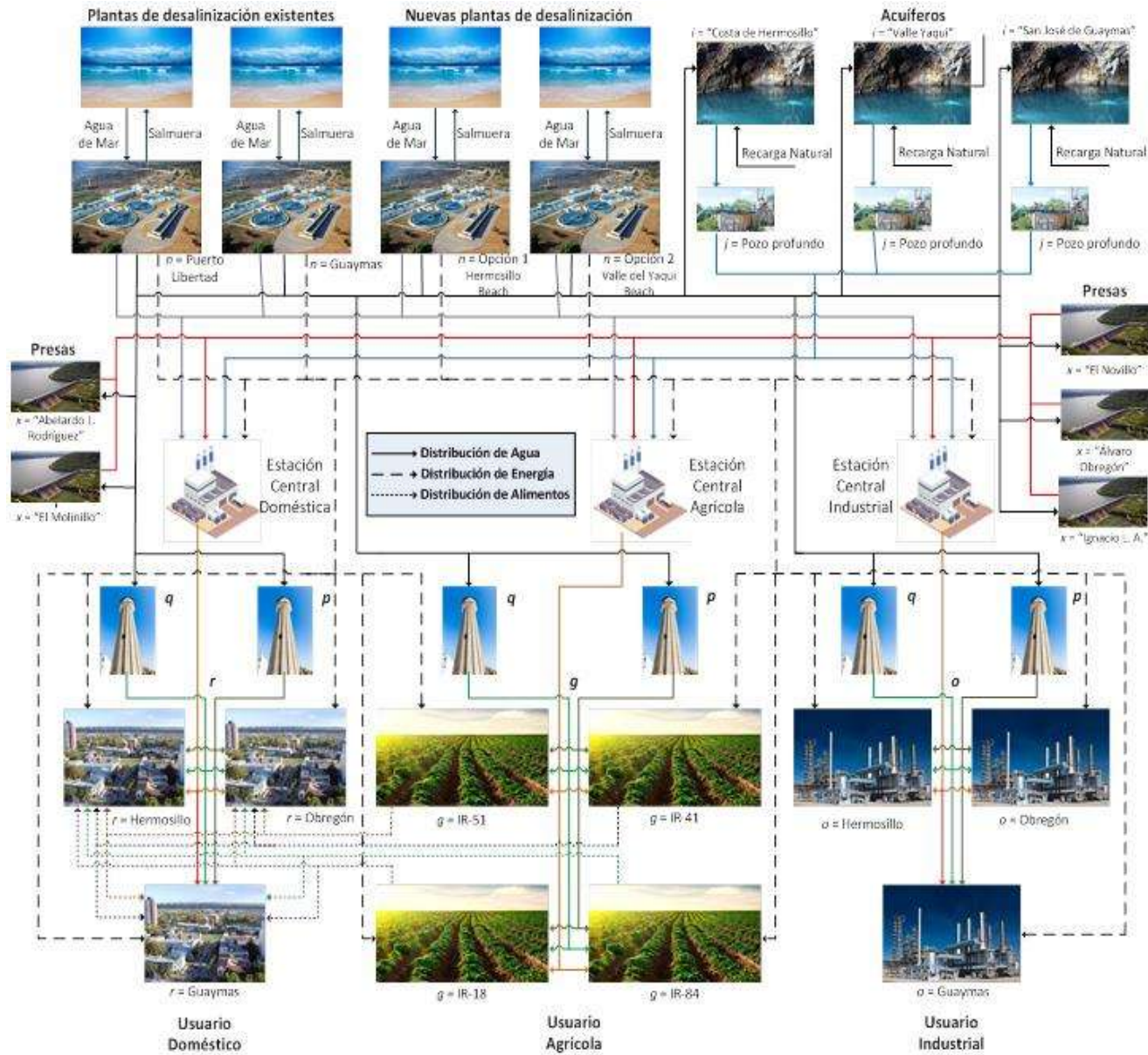


Figura 6. Superestructura propuesta

El agua en los pozos profundos ($a_{i,j,t}^{dw}$) es extraída por las estaciones de distribución, incluidas las estaciones domésticas ($d_{r,j,t}^{dom}$), las estaciones industriales ($d_{g,j,t}^{agr}$) y las estaciones agrícolas ($d_{o,j,t}^{ind}$):

$$\sum_i a_{i,j,t}^{dw} = \sum_r d_{r,j,t}^{dom} + \sum_g d_{g,j,t}^{agr} + \sum_o d_{o,j,t}^{ind}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (2)$$

Entonces, el agua total en cada estación central ($h_{i,t}$) es igual a la suma del agua recibida de plantas de desalinización ($v_{g,n,t}^E$), las nuevas plantas de desalinización ($v_{g,u,t}^N$), los pozos profundos ($d_{g,j,t}$), y las presas ($w_{g,x,t}$).

Para la estación doméstica:

$$h_{r,t}^{dom} = \sum_n v_{r,n,t}^{E,dom} + \sum_u v_{r,u,t}^{N,dom} + \sum_j d_{r,j,t}^{dom} + \sum_x w_{r,x,t}^{dom}, \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (3)$$

Para la estación industrial:

$$h_{o,t}^{ind} = \sum_n v_{o,n,t}^{E,ind} + \sum_u v_{o,u,t}^{N,ind} + \sum_j d_{o,j,t}^{ind} + \sum_x w_{o,x,t}^{ind}, \quad \forall o \in O, \forall t \in T \quad (4)$$

Para la estación agrícola:

$$h_{g,t}^{agr} = \sum_n v_{g,n,t}^{E,agr} + \sum_u v_{g,u,t}^{N,agr} + \sum_j d_{g,j,t}^{agr} + \sum_x w_{g,x,t}^{agr}, \quad \forall g \in G, \forall t \in T \quad (5)$$

Las demandas de agua (domdem) pueden ser satisfechas mediante el agua que se encuentra en cada estación central ($h_{r,t}$), más el agua que se encuentra en los tanques de almacenamiento ($s_{p,r,t}^E$) y los nuevos tanques de almacenamiento ($s_{q,r,t}^N$).

Para los usuarios domésticos:

$$\text{domdem}_{r,t} = h_{r,t}^{dom} + \sum_p s_{p,r,t}^{E,dom} + \sum_q s_{q,r,t}^{N,dom}, \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (6)$$

Para los usuarios industriales:

$$\text{inddem}_{o,t} = h_{o,t}^{ind} + \sum_p s_{o,p,t}^{E,ind} + \sum_q s_{o,q,t}^{N,ind}, \quad \forall o \in O, \forall t \in T \quad (7)$$

Para los usuarios agrícolas:

$$agr_{dem_{g,t}} = h_{g,t}^{agr} + \sum_p s_{g,p,t}^{E,agr} + \sum_q s_{g,q,t}^{N,agr}, \quad \forall g \in G, \forall t \in T \quad (8)$$

donde la cantidad total de agua utilizada por los usuarios agrícolas se establece de la siguiente manera:

$$arg_{dem_{g,t}} = \sum_c c_{c,g,t}^{food}, \quad \forall g \in G, \forall t \in T \quad (9)$$

En el cual, la cantidad de agua consumida por cada cultivo en cualquier período de tiempo t ($c_{c,g,t}^{food}$), depende de la producción del cultivo ($P_{c,g,t}^{food}$) multiplicada por un factor ($\phi_{c,g,t}^{food}$), es decir $c_{c,g,t}^{food} = P_{c,g,t}^{food} \cdot \phi_{c,g,t}^{food}$,

$$\forall c \in C, \forall g \in G, \forall t \in T, \quad (10)$$

donde la cantidad de agua utilizada por cada cultivo está limitada por una producción máxima de alimentos ($\Phi_{c,g,t}^{dfood,max}$) y una producción mínima de alimentos ($\Phi_{c,g,t}^{dfood,min}$), estos valores dependen de la demanda de alimentos en cada región:

$$\Phi_{c,g,t}^{dfood,min} \leq P_{c,g,t}^{food} \leq \Phi_{c,g,t}^{dfood,max} \quad (11)$$

En cuanto al agua utilizada para la agricultura un porcentaje se filtra al suelo (pca), por lo que puede recargar el acuífero ($F_{i,t}^{agr}$). Esto matemáticamente se representa de la siguiente manera:

$$F_{i,t}^{agr} = \sum_{g(i)} pca * agr_{dem_{g,i,t}} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (12)$$

Por otra parte, el volumen total de agua en una presa en un período de tiempo determinado ($M_{x,t} - M_{x,t-1}$) es igual a la suma del agua recibida de las plantas energéticas desalinizadoras de energía existentes ($G_{n,x,t}^{E,rel}$), las nuevas plantas energéticas desalinizadoras ($G_{u,x,t}^{N,rel}$) y el agua recargada naturalmente ($R_{x,t}^{dam}$), menos el agua enviada a las estaciones domésticas ($W_{r,x,t}^{dom}$), las estaciones industriales ($W_{o,x,t}^{ind}$) y las estaciones agrícolas ($W_{g,x,t}^{agr}$):

$$\begin{aligned}
 M_{x,t} - M_{x,t-1} = & \sum_n G_{n,x,t}^{E,rel} + \sum_u G_{u,x,t}^{N,rel} + R_{x,t}^{dam} \\
 & - \sum_r W_{r,x,t}^{dom} - \sum_g W_{g,x,t}^{agr} - \sum_o W_{o,x,t}^{ind}, \quad \forall x, \in X, \forall t \in T, t \neq 1
 \end{aligned} \tag{13}$$

Respecto al volumen total de agua en los tanques de almacenamiento existentes en un período de tiempo determinado ($S_{p,t}^E - S_{p,t-1}^E$) es igual a la suma del agua recibida de las plantas energéticas desalinizadoras existentes ($D_{n,p,t}^{E,Esto}$) y las nuevas plantas energéticas desalinizadoras ($D_{u,p,t}^{N,Esto}$), menos el agua enviada a las estaciones domésticas ($S_{p,r,t}^{E,dom}$), las estaciones industriales ($S_{o,p,t}^{E,ind}$), las estaciones agrícolas ($S_{g,p,t}^{E,agr}$) y el agua enviada a los acuíferos ($S_{p,i,t}^{E,aq}$):

$$\begin{aligned}
 S_{p,t}^E - S_{p,t-1}^E = & \sum_n D_{n,p,t}^{E,Esto} + \sum_u D_{u,p,t}^{N,Esto} - \sum_r S_{p,r,t}^{E,dom} \\
 & - \sum_g S_{g,p,t}^{E,agr} - \sum_o S_{o,p,t}^{E,ind} - \sum_i S_{p,i,t}^{E,aq} \quad \forall p \in P, \forall t \in T, t \neq 1
 \end{aligned} \tag{14}$$

En este mismo sentido, el volumen total de agua en nuevos tanques de almacenamiento en un período de tiempo ($S_{q,t}^N - S_{q,t-1}^N$) es igual a la suma del agua recibida de las plantas energéticas desalinizadoras existentes ($D_{n,q,t}^{E,Nsto}$) y las nuevas plantas energéticas desalinizadoras ($D_{u,q,t}^{N,Nsto}$), menos el agua enviada a las estaciones domésticas ($S_{q,r,t}^{N,dom}$), las estaciones industriales ($S_{o,q,t}^{N,ind}$), las estaciones agrícolas ($S_{g,q,t}^{N,agr}$) y el agua enviada a los acuíferos ($S_{q,i,t}^{N,aq}$):

$$\begin{aligned}
 S_{q,t}^N - S_{q,t-1}^N = & \sum_n D_{n,q,t}^{E,Nsto} + \sum_u D_{u,q,t}^{N,Nsto} - \sum_r S_{q,r,t}^{N,dom} \\
 & - \sum_g S_{g,q,t}^{N,agr} - \sum_o S_{o,q,t}^{N,ind} - \sum_i S_{q,i,t}^{N,aq} \quad \forall q \in Q, \forall t \in T, t \neq 1
 \end{aligned} \tag{15}$$

En relación a la cantidad de agua de mar extraída del mar por las plantas desalinizadoras ($SW_{n,t}^{in,E}$), esta es igual a la suma del agua enviada a los tanques de almacenamiento existentes ($D_{n,p,t}^{E,Esto}$), los nuevos tanque de almacenamiento ($D_{n,q,t}^{E,Nsto}$), las estaciones domésticas ($v_{r,n,t}^{E,dom}$), las estaciones industriales ($v_{o,n,t}^{E,ind}$) y las estaciones agrícolas ($v_{g,n,t}^{E,agr}$)

$v_{g,n,t}^{E,agr}$), también el agua enviada para recargar los acuíferos ($B_{n,i,t}^{E,des}$), el agua para recargar las presas ($G_{n,x,t}^{E,rel}$) y el agua que se envía al mar como rechazo ($b_{n,t}^{E,rej}$):

$$SW_{n,t}^{in,E} (1 - \beta) = \sum_p D_{n,p,t}^{E,Esto} + \sum_q D_{n,q,t}^{E,Nsto} + \sum_r v_{r,n,t}^{E,dom} + \sum_g v_{g,n,t}^{E,agr} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (16)$$

$$+ \sum_o v_{o,n,t}^{E,ind} + \sum_i B_{n,i,t}^{E,des} + \sum_x G_{n,x,t}^{E,rel} + b_{n,t}^{E,rej}$$

En tanto que, la cantidad de agua de mar extraída del mar por las nuevas plantas desalinizadoras ($SW_{u,t}^{in,N}$) es igual a la suma del agua enviada a los tanques de almacenamiento existentes ($D_{u,p,t}^{N,Esto}$), los nuevos tanque de almacenamiento ($D_{u,q,t}^{N,Nsto}$), las estaciones domésticas ($v_{r,u,t}^{N,dom}$), las estaciones industriales ($v_{o,u,t}^{N,ind}$) y las estaciones agrícolas ($v_{g,u,t}^{N,agr}$), también el agua enviada para recargar los acuíferos ($B_{u,i,t}^{N,des}$), el agua para recargar las presas ($G_{u,x,t}^{N,rel}$) y el agua que se envía al mar como rechazo ($b_{u,t}^{N,rej}$):

$$SW_{u,t}^{in,N} (1 - \beta) = \sum_p D_{u,p,t}^{N,Esto} + \sum_q D_{u,q,t}^{N,Nsto} + \sum_r v_{r,u,t}^{N,dom} + \sum_g v_{g,u,t}^{N,agr} \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (17)$$

$$+ \sum_o v_{o,u,t}^{N,ind} + \sum_i B_{u,i,t}^{N,des} + \sum_x G_{u,x,t}^{N,rel} + b_{u,t}^{N,rej}$$

Finalmente, la salmuera rechazada se puede calcular multiplicando el agua de mar total por un factor (β) que represente la relación entre la salmuera y los flujos de agua de mar: $b_{n,t}^{E,rej} = \beta * SW_{n,t}^{in,E}$, $\forall n \in N, \forall t \in T$ (18)

$$b_{u,t}^{N,rej} = \beta * SW_{u,t}^{in,N}, \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (19)$$

2.3.2 Modelo para la producción de energía

La potencia total producida ($TEnergy_t$) es la suma de la energía generada en las plantas energéticas desalinizadoras existentes ($Eproduction_{n,t}^E$) y las nuevas ($Eproduction_{u,t}^N$):

$$TEnergy_t = \sum_u Eproduction_{u,t}^N + \sum_n Eproduction_{n,t}^E, \quad \forall t \in T \quad (20)$$

Este valor está sujeto a las demandas de electricidad en zonas industriales ($E_{o,t}^{ind}$), usuarios domésticos ($E_{r,t}^{dom}$) y regiones agrícolas ($E_{r,t}^{dom}$):

$$TEnergy_t = \sum_r E_{r,t}^{dom} + \sum_g E_{g,t}^{agr} + \sum_o E_{o,t}^{ind} \quad \forall t \in T \quad (21)$$

La energía producida en las nuevas plantas energéticas de desalinización es función de su capacidad. Esta función se representa multiplicando la capacidad de la nueva planta desalinizadora ($SW_{u,t}^{in,N}$) por un factor (GEP) que representa el consumo de energía por unidad de caudal de agua de mar entrante:

$$EProduction_{u,t}^N = SW_{u,t}^{in,N} \cdot GEP, \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (22)$$

2.3.3 Existencia de los nuevos tanque de almacenamiento

La existencia, ubicación y tamaño de los nuevos tanque de almacenamiento en cada región se modela a través de variables binarias (y_q^{sto}), si la variable binaria es igual a uno, entonces se necesita el tanque; si la variable es igual a cero, el tanque no es necesario, la existencia está sujeta a la capacidad máxima del tanque ($\Theta_q^{sto,max}$) y la capacidad mínima del tanque ($\Theta_q^{sto,min}$):

$$y_q^{sto} \cdot \Theta_q^{sto,min} \leq S_q^{max} \leq y_q^{sto} \cdot \Theta_q^{sto,max} \quad (23)$$

El costo de instalación ($InstCost_{q,t}^{sto}$) es una función de un costo fijo del tanque (Z_1), el costo unitario variable (Z_2), y un factor anual de inversión (k_F). Además, S_q^{max} representa la capacidad máxima para tanque de almacenamiento:

$$InstCost_q^{sto} = k_F \left[Z_1 \cdot y_q^{sto} + Z_2 \left(S_q^{max} \right)^\alpha \right], \quad \forall q \in Q \quad (24)$$

donde S_q^{max} es mayor que el agua existente en el tanque de almacenamiento ($S_{q,t}^N$) en cualquier periodo de tiempo t .

$$S_{q,t}^N \leq S_q^{max} \quad q \in Q, t \in T \quad (25)$$

En donde, el costo de almacenamiento puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$Storage Cost = H_Y \sum_q InstCost_q^{sto} \quad (26)$$

2.3.4 Existencia de las nuevas plantas energéticas de desalinización

La existencia, ubicación y tamaño de las nuevas plantas energéticas de desalinización se modela a través de variables binarias (y_u^{pdes}). Si la variable binaria es igual a uno, entonces se necesita la planta de desalinización; si la variable es igual a cero, la planta no es necesaria, también la planta energética de desalinización tiene una capacidad máxima ($\Theta_u^{pdes,max}$) y una capacidad mínima ($\Theta_u^{pdes,min}$):

$$y_u^{pdes} \cdot \Theta_u^{pdes,min} \leq SW_u^{max} \leq y_u^{pdes} \cdot \Theta_u^{pdes,max} \quad (27)$$

El costo de instalación ($InstCost_{u,t}^{pdes}$) es una función de los costos unitarios (Z_3 and Z_4), la capacidad máxima de agua de mar (SW_u^{max}) y un factor usado para anualizar la inversión (k_F). El costo de operación ($OpCost_{u,t}^{pdes}$) es una función del costo unitario de operación (Z_5), el agua total extraída de mar ($SW_{u,t}^{in,N}$), el factor de recuperación ($1-\beta$) y un factor utilizado para contabilizar el tiempo operacional por año (H_Y):

$$InstCost_{u,t}^{pdes} = k_F \left[Z_3 \cdot y_u^{pdes} + Z_4 (SW_u^{max})^\alpha \right] \quad \forall u \in U \quad (28)$$

$$OpCost_{u,t}^{pdes} = H_Y \left[Z_5 (1-\beta) SW_{u,t}^{in,N} \right] \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (29)$$

donde SW_u^{max} es mayor que cualquier agua posible en una planta energética de desalinización ($SW_{q,t}^N$) durante cualquier período de tiempo t .

$$SW_{u,t}^{in,N} \leq SW_u^{max} \quad u \in U, t \in T \quad (30)$$

El costo de operación es una función del agua extraída del mar. El costo de operación es función del agua de mar extraída ($SW_{n,t}^{in,E}$) multiplicada por el factor de recuperación total ($1-\beta$) y el costo unitario de operación (Z_6):

$$OpCost_{n,t}^{E,des} = H_Y \left[Z_6 (1-\beta) SW_{n,t}^{in,E} \right] \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (31)$$

H_Y es un factor utilizado para tener en cuenta el tiempo de operación por año.

El costo de instalación para las nuevas plantas energéticas de desalinización se calcula de la siguiente manera:

$$NPDinstcost = \sum_u InstCost_u^{pdes} \quad (32)$$

El costo de operación para las nuevas plantas energéticas de desalinización se calcula usando la siguiente expresión:

$$NPDopcost = \sum_u \sum_t OpCost_{u,t}^{pdes} \quad (33)$$

Por otro lado, el costo total global de operación para las plantas energéticas de desalinización existentes se puede calcular usando la siguiente expresión:

$$TEPDopcost = \sum_n \sum_t TOpCost_{n,t}^{E,des} \quad (34)$$

Donde el costo total de operación para la planta energética de desalinización existente ($TOpCost_{n,t}^{E,des}$) también incluye el costo de consumo de combustibles.

Los requisitos totales de energía ($TER_{u,t}^N$) de las nuevas plantas energéticas de desalinización son función del agua total de mar alimentada. Esta función tiene un comportamiento lineal y depende de la capacidad de las nuevas plantas energéticas de desalinización ($SW_{u,t}^{in,N}$) multiplicadas por un factor (FCF):

$$TER_{u,t}^N = SW_{u,t}^{in,N} \cdot FCF, \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (35)$$

donde $TER_{u,t}^N$ es igual a la energía obtenida por la combustión de combustibles fósiles ($Q_{f,u,t}^{fossil}$), biocombustibles ($Q_{b,u,t}^{biofuel}$) y la energía obtenida por el colector solar ($Q_{u,t}^{solar}$) durante cualquier periodo t .

$$TER_{u,t}^N = \sum_{f \in F} Q_{f,u,t}^{fossil} + \sum_{b \in B} Q_{b,u,t}^{biofuel} + Q_{u,t}^{solar}, \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (36)$$

El costo total de energía (TEC^N) se obtiene mediante la siguiente ecuación, donde FFC_f y BFC_b son los precios de los combustibles fósiles y los biocombustibles, respectivamente.

$$NPDenergycost = H_Y \sum_u \sum_t \left[\sum_{f \in F} (FFC_f \cdot Q_{f,u,t}^{fossil}) + \sum_{b \in B} (BFC_b \cdot Q_{b,u,t}^{biofuel}) \right] \quad (37)$$

La cantidad de calor que se producirá está sujeta a la disponibilidad de biocombustibles ($AVF_{f,t}^{\max}$) y de combustibles fósiles ($AVB_{b,t}^{\max}$) multiplicado por el correspondiente factor de potencia de calentamiento, HPF_f para combustible fósiles y HPB_b para biocombustibles, de acuerdo a las siguientes relaciones.

Para los combustibles fósiles:

$$\sum_u Q_{f,u,t}^{fossil} \leq HPF_f \cdot AVF_{f,t}^{\max} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (38)$$

Para los biocombustibles:

$$\sum_u Q_{b,u,t}^{biofuel} \leq HPB_b \cdot AVB_{b,t}^{\max} \quad \forall b \in B, \forall t \in T \quad (39)$$

2.3.5 Existencia del colector solar

La existencia, el área y el costo del colector solar se modelan utilizando variables binarias (w_u^{solar}). Si la variable binaria es igual a uno, se necesita el colector solar, si la variable binaria es igual a cero, no se necesita el colector, esto de acuerdo con el área de recolección máxima ($ATot_u^{\max}$) y mínima ($ATot_u^{\min}$):

$$w_u^{solar} \cdot ATot_u^{\min} \leq AREA_u^{solar,max} \leq w_u^{solar} \cdot ATot_u^{\max} \quad (40)$$

El costo de capital para el colector solar ($SCCost_u^{solar}$) es una función de los costos unitarios (Z_1^{solar} y Z_2^{solar}), el área máxima efectiva del colector solar ($AREA_u^{solar,max}$), un factor de área (γ) y un factor para anualizar la inversión (k_F). El costo de operación ($OpCost_{u,t}^{solar}$) es una función del factor unitario de operación (Z_3^{solar}), el área del colector solar en cada período ($A_{u,t}^{solar}$) y un factor para tener en cuenta el tiempo operativo por año (H_Y):

$$SCCost_u^{solar} = k_F \left[Z_1^{solar} \cdot w_u^{solar} + Z_2^{solar} \left(AREA_u^{solar,max} \right)^\alpha \right] \quad \forall u \in U \quad (41)$$

$$SOCost_{u,t}^{solar} = H_Y \left[Z_3^{solar} \cdot A_{u,t}^{solar} \right] \quad \forall u \in U, \forall t \in T \quad (42)$$

donde $AREA_u^{solar,max}$ es más grande que el área existente del colector solar ($A_{u,t}^{solar}$) en cualquier periodo de tiempo t .

$$A_{u,t}^{solar} \leq AREA_u^{solar,max} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (43)$$

El calentamiento proporcionado por el colector solar ($Q_{u,t}^{solar}$) se obtiene multiplicando la energía recolectada útil ($UCE_{u,t}^{solar}$) por el área efectiva del colector solar ($A_{u,t}^{solar}$):

$$Q_{u,t}^{solar} = UCE_{u,t}^{solar} \cdot A_{u,t}^{solar} \quad (44)$$

El costo total del colector solar se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$SolarCost = \sum_u SCCost_u^{solar} + \sum_u \sum_t SOCost_{u,t}^{solar} \quad (45)$$

2.3.6 Costo de tuberías y bombeo

El costo de distribución del agua (tuberías) se calcula usando la siguiente expresión:

$$Piping\ cost = k_F \left[\begin{aligned} & \sum_r DPC1_r \cdot y_r^{h,dom} + \sum_p \sum_r DPC2_{p,r} \cdot y_{p,r}^{sE,dom} + \sum_q \sum_r DPC3_{q,r} \cdot y_{q,r}^{sN,dom} \\ & + \sum_g APC1_g \cdot y_g^{h,agr} + \sum_p \sum_g APC2_{p,g} \cdot y_{g,p}^{sE,agr} + \sum_q \sum_g APC3_{q,g} \cdot y_{g,q}^{sN,agr} \\ & + \sum_o IPC1_o \cdot y_o^{h,ind} + \sum_p \sum_o IPC2_{p,o} \cdot y_{o,p}^{sE,ind} + \sum_q \sum_o IPC3_{q,o} \cdot y_{q,o}^{sN,ind} \\ & + \sum_r \sum_j DPC4_{r,j} \cdot y_{r,j}^{d,dom} + \sum_g \sum_j APC4_{g,j} \cdot y_{g,j}^{d,agr} + \sum_o \sum_j IPC4_{o,j} \cdot y_{o,j}^{d,ind} \\ & + \sum_r \sum_x DPC5_{r,x} \cdot y_{r,x}^{w,dom} + \sum_g \sum_x APC5_{g,x} \cdot y_{g,x}^{w,agr} + \sum_o \sum_x IPC5_{o,x} \cdot y_{o,x}^{w,ind} \\ & + \sum_n \sum_i BPC1_{n,i} \cdot y_{n,i}^{BE,des} + \sum_u \sum_i BPC2_{u,i} \cdot y_{u,i}^{BN,des} + \sum_r \sum_n DPC6_{r,n} \cdot y_{r,n}^{vE,dom} \\ & + \sum_r \sum_u DPC7_{r,u} \cdot y_{r,u}^{vN,dom} + \sum_g \sum_n APC6_{g,n} \cdot y_{g,n}^{vE,agr} + \sum_g \sum_u APC7_{g,u} \cdot y_{g,u}^{vN,agr} \\ & + \sum_o \sum_n IPC6_{o,n} \cdot y_{o,n}^{vE,ind} + \sum_o \sum_u IPC7_{o,u} \cdot y_{o,u}^{vN,ind} + \sum_n \sum_q EPC1_{n,q} \cdot y_{n,q}^{DE,Nsto} \\ & + \sum_n \sum_p EPC2_{n,p} \cdot y_{n,p}^{DE,Esto} + \sum_u \sum_q NPC1_{u,q} \cdot y_{u,q}^{DN,Nsto} + \sum_u \sum_p NPC2_{u,p} \cdot y_{u,p}^{DN,Esto} \\ & + \sum_n \sum_x GPC1_{n,x} \cdot y_{n,x}^{GE,rel} + \sum_u \sum_x GPC2_{u,x} \cdot y_{u,x}^{GN,rel} + \sum_i \sum_j AQP1_{i,j} \cdot y_{i,j}^{a,dw} \\ & + \sum_p \sum_i SPC1_{p,i} \cdot y_{p,i}^{sE,aaq} + \sum_q \sum_i SPC2_{q,i} \cdot y_{q,i}^{sN,aaq} \end{aligned} \right] \quad (46)$$

Los factores de costo de tubería están determinados por la siguiente ecuación:

$$PipingCostFactor = k_m LD^m \quad (47)$$

donde L es la longitud de la tubería, D^m es el diámetro de la tubería, k_m y m son los parámetros de costo de la tubería que dependen del material. Debido a que el diámetro de las tuberías, la distancia desde los puntos de almacenamiento hasta los usuarios finales y la altura son fijos, el índice de flujo determina el costo de la tubería. La existencia de la tubería está determinada por la variable binaria y se utiliza para activar la contabilidad de costos de tubería para la capacidad máxima utilizada en todos los períodos de tiempo.

El costo de bombeo se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$Pumping\ cost = H_Y \left[\begin{aligned} & \sum_r \sum_t h_{r,t}^{dom} PPD1_{r,t} + \sum_p \sum_r \sum_t s_{p,r,t}^{E,dom} PPD2_{p,r,t} + \sum_q \sum_r \sum_t s_{q,r,t}^{N,dom} PPD3_{q,r,t} \\ & + \sum_g \sum_t h_{g,t}^{agr} PPA1_{g,t} + \sum_g \sum_p \sum_t s_{g,p,t}^{E,agr} PPA2_{g,p,t} + \sum_q \sum_g \sum_t s_{q,g,t}^{N,agr} PPA3_{q,g,t} \\ & + \sum_o \sum_t h_{o,t}^{ind} PPI1_{o,t} + \sum_o \sum_p \sum_t s_{o,p,t}^{E,ind} PPI2_{o,p,t} + \sum_q \sum_o \sum_t s_{q,o,t}^{N,ind} PPI3_{q,o,t} \\ & + \sum_r \sum_j \sum_t d_{r,j,t}^{dom} PPD4_{r,j,t} + \sum_g \sum_j \sum_t d_{g,j,t}^{agr} PPA4_{g,j,t} + \sum_o \sum_j \sum_t d_{o,j,t}^{ind} PPI4_{o,j,t} \\ & + \sum_r \sum_x \sum_t w_{r,x,t}^{dom} PPD5_{r,x,t} + \sum_g \sum_x \sum_t w_{g,x,t}^{agr} PPA5_{g,x,t} + \sum_o \sum_x \sum_t w_{o,x,t}^{ind} PPI5_{o,x,t} \\ & + \sum_n \sum_i \sum_t B_{n,i,t}^{E,des} PPC1_{n,i,t} + \sum_u \sum_i \sum_t B_{u,i,t}^{N,des} PPC2_{u,i,t} + \sum_r \sum_n \sum_t v_{r,n,t}^{E,dom} PPD6_{r,n,t} \\ & + \sum_r \sum_u \sum_t v_{r,u,t}^{N,dom} PPD7_{r,u,t} + \sum_g \sum_n \sum_t v_{g,n,t}^{E,agr} PPA6_{g,n,t} + \sum_g \sum_u \sum_t v_{g,u,t}^{N,agr} PPA7_{g,u,t} \\ & + \sum_o \sum_n \sum_t v_{o,n,t}^{E,ind} PPI6_{o,n,t} + \sum_o \sum_u \sum_t v_{o,u,t}^{N,ind} PPI7_{o,u,t} + \sum_n \sum_q \sum_t D_{n,q,t}^{E,Nsto} PPE1_{n,q,t} \\ & + \sum_n \sum_p \sum_t D_{n,p,t}^{E,Esto} PPE2_{n,p,t} + \sum_u \sum_q \sum_t D_{u,q,t}^{N,Nsto} PPN1_{u,q,t} + \sum_u \sum_p \sum_t D_{u,p,t}^{E,Esto} PPN2_{u,p,t} \\ & + \sum_n \sum_x \sum_t G_{n,x,t}^{E,rel} PPG1_{n,x,t} + \sum_u \sum_x \sum_t G_{u,x,t}^{N,rel} PPG2_{u,x,t} + \sum_i \sum_j \sum_t a_{i,j,t}^{dw} PAQ1_{i,j,t} \\ & + \sum_p \sum_i \sum_t s_{p,i,t}^{E,aaq} PPS1_{p,i,t} + \sum_q \sum_i \sum_t s_{q,i,t}^{N,aaq} PPS2_{q,i,t} \end{aligned} \right] \quad (48)$$

Los factores de costo de bombeo están determinados por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$PumpingCostFactor = \frac{1}{0.0000576} f \frac{L (\#of\ hours) (\$/\ kWh)}{D^5 \eta} \quad (49)$$

donde f es el factor de fricción, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro interno de la tubería y η es la eficiencia combinada de la bomba y el motor. El factor de fricción se basa en la rugosidad de la tubería, el diámetro de la tubería y el número de Reynolds.

2.3.7 Costos de la producción de alimentos

La tierra requerida por cada cultivo se establece de la siguiente manera:

$$Land_{c,g}^{food} = \lambda_{c,g}^{food} \cdot \sum_t P_{c,g,t}^{food}, \quad \forall c \in C, \forall g \in G, \quad (50)$$

Donde la tierra disponible requerida cada cultivo depende de un factor de producción de la tierra ($\lambda_{c,g}^{food}$) y la producción total ($P_{c,g,t}^{food}$). Ver **Tabla 1** para los factores de producción.

En este caso, los requisitos de terreno para cualquier cultivo tienen un mínimo ($\Lambda_{c,g}^{dfood,min}$) y un máximo valor ($\Lambda_{c,g}^{dfood,max}$), este valor depende de la cantidad máxima de tierra disponible para producir cualquier cultivo c :

$$\Lambda_{c,g}^{dfood,min} \leq Land_{c,g}^{food} \leq \Lambda_{c,g}^{dfood,max} \quad (51)$$

El costo operacional de la tierra depende del costo operacional unitario de la tierra, que depende del tipo de cultivo, este valor se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión:

$$OpCostLand = \sum_c \sum_g Land_{c,g}^{food} \cdot VCL_c \quad (52)$$

donde VCL_c es el costo operacional unitario que depende del tipo de cultivo.

También es importante determinar los costos de los fertilizantes, este valor se obtiene multiplicando el consumo de fertilizantes, el costo de los fertilizantes y la producción total del cultivo, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$FertilizersCost = \sum_c \left[UCF_c \cdot \varepsilon_c^{FCrop} \left[\sum_g \sum_t P_{c,g,t}^{food} \right] \right] \quad (53)$$

donde UCF_c es el costo unitario de los fertilizantes, y ε_c^{FCrop} es el factor de consumo de fertilizantes para cada cultivo.

El costo de distribución depende de un factor para tener en cuenta el costo de transporte de cada cultivo, multiplicado por la producción total en cada región:

$$DistributionCost = \sum_c \sum_g \sum_t P_{c,g,t}^{food} \cdot UTC_{c,g}^{food} \quad (54)$$

La ganancia anual total alimentaria ($FNprofit$) es igual a la venta de alimentos ($FoodSales$) menos el costo operativo de la tierra ($OpCostLand$), el costo de los fertilizantes ($FertilizersCost$), los costos de consumo de energía y el costo del consumo de agua.

$$FNprofit = FoodSales - OpCostLand - FertilizersCost - DistributionCost - H_Y \left[\sum_g \sum_t E_{g,t}^{agr} \cdot AEC_t \right] - H_Y \left[\sum_g \sum_t agrdem_{g,t} \cdot WDC_t \right] \quad (55)$$

Donde las ventas de alimentos se pueden calcular con la siguiente expresión:

$$FoodSales = \sum_c \sum_g \sum_t FCV_{c,g,t} \cdot P_{c,g,t}^{food} \quad (56)$$

Tabla 1. Factores de producción de cultivos.

CULTIVO	ϕ (m ³ /ton)	1/ λ (ton/ha)	1/ ϵ (ton/N ton)
Trigo grano	4500.0	5.1	124.2
Maíz grano	5000.0	6.0	178.1
Calabaza	2088.0	16.9	8.4
Chile verde	975.0	17.0	11.5
Sandía	216.5	55.7	12.0
Cártamo	2727.3	2.4	64.4
Garbanzo	1582.3	2.5	57.0
Melon	595.8	40.0	11.6
Calabacita	2726.1	22.0	23.2
Frijol (Alubia)	2841.2	2.0	5.8
Espárrago	8419.5	5.0	110.2
Nuez (Nogal)	1600.0	5.0	226.8
Alfalfa verde	7500.0	53.0	644.2
Uva	1858.7	15.0	11.6
Naranja	2230.5	18.0	19.8

2.3.8 Reducción del crédito fiscal

Esta ecuación representa los ingresos obtenidos por la reducción en las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GHGE) como créditos fiscales, esta cantidad se

obtiene teniendo en cuenta el GHGE obtenido por la combustión de combustibles fósiles (es decir, gas natural y petróleo).

$$TRC = H_Y \left[\left(TF_{CO_2}^{REF} - F_{CO_2} \right) \cdot R_{tax} \right] \quad (57)$$

donde $TF_{CO_2}^{REF}$ es la cantidad total de GHGE cuando sólo se usan combustibles fósiles para alimentar la planta de energía de doble propósito, y F_{CO_2} es la cantidad de GHGE cuando se usan combustibles fósiles, biocombustibles o tecnología solar. R_{tax} es el crédito fiscal para las emisiones de CO_2 .

La cantidad de GHGE se calculan de la siguiente manera:

$$F_{CO_2} = \sum_f \sum_u \sum_t \left[GHGE_f^{fossil} \cdot Q_{f,u,t}^{fossil} \right] + \sum_b \sum_u \sum_t \left[GHGE_b^{biofuel} \cdot Q_{b,u,t}^{biofuel} \right] \quad (58)$$

2.3.9 Funciones objetivo

El modelo de optimización multiobjetivo propuesto implica tres aspectos importantes. El primero consiste en maximizar el beneficio anual bruto, como función económica. El segundo es la minimización de las GHGE general, como objetivo ambiental. Finalmente, el tercero es la maximización de los empleos generados por el proyecto, como un objetivo social.

$$OF = \text{Max } Annual Profit; \text{ Min } OGHGE; \text{ Max } ONJobs \quad (59)$$

La función objetivo económica consiste en maximizar el beneficio bruto anual, la función incluye las ventas de agua, las ventas de energía, la ganacia anual total alimentaria y la reducción del crédito fiscal, menos el costo anual total.

$$Annual Profit = Water Sales + EnergySales + FNprofit + TCR - TAC \quad (60)$$

donde las ventas anuales de agua incluyen el agua vendida a usuarios domésticos, industriales y agrícolas, y se puede calcular a través de la siguiente relación:

$$\text{Water Sales} = H_Y \sum_t \left[\begin{aligned} & \left(\sum_r h_{r,t}^{dom} + \sum_p \sum_r s_{p,r,t}^{E,dom} + \sum_q \sum_r s_{q,r,t}^{N,dom} \right) WDC_t \\ & + \left(\sum_g h_{g,t}^{agr} + \sum_p \sum_g s_{p,g,t}^{E,agr} + \sum_q \sum_g s_{q,g,t}^{N,agr} \right) WAC_t \\ & + \left(\sum_o h_{o,t}^{ind} + \sum_p \sum_o s_{p,o,t}^{E,ind} + \sum_q \sum_o s_{q,o,t}^{N,ind} \right) WIC_t \end{aligned} \right] \quad (61)$$

Y las ventas de energía se pueden calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Energy Sales} = H_Y \sum_t \left[\sum_r E_{r,t}^{dom} \cdot DEC_t + \sum_g E_{g,t}^{agr} \cdot AEC_t + \sum_o E_{o,t}^{ind} \cdot IEC_t \right] \quad (62)$$

El costo anual total (TAC) incluye el costo de instalación ($NPDinstcost$), operativo ($NPDopcost$) y consumo de energía ($NPDenergycost$) para las nuevas plantas energéticas de desalinización, así como los costos operativos totales para las plantas de desalinización existentes ($TEPDopcost$), la ecuación también incluye el costo almacenamiento ($StorageCost$), costo de la tubería ($PipingCost$), el costo de bombeo ($PumpingCost$) y el costo del colector solar ($SolarCost$).

$$\begin{aligned} TAC = & NPDinstcost + NPDopcost + NPDenergycost + EPDopcost \\ & + StorageCost + PipingCost + PumpingCost + SolarCost \end{aligned} \quad (63)$$

La función objetivo ambiental ($OGHGE$) busca minimizar las emisiones globales de gases de efecto invernadero, como una evaluación indirecta del impacto ambiental. Como puede verse, la ecuación toma en cuenta las emisiones de los combustibles fósiles ($GHGE_f^{fossil}$) y de los biocombustibles ($GHGE_b^{biofuel}$), se supone que las emisiones del colector solar son cero, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Min } OGHGE = & \sum_f \sum_u \sum_t \left[GHGE_f^{fossil} \cdot Q_{f,u,t}^{fossil} \right] \\ & + \sum_b \sum_u \sum_t \left[GHGE_b^{biofuel} \cdot Q_{b,u,t}^{biofuel} \right] \end{aligned} \quad (64)$$

La cuantificación de puestos de trabajo ($ONJOBS$) se determina indirectamente a través de la cantidad de energía utilizada basada en el modelo JEDI (Empleo e impacto en el desarrollo económico), en la que se puede obtener el número de empleos por kWh producido

por combustibles fósiles ($NJOB_f^{fossil}$), biocombustibles ($NJOB_b^{biofuel}$) y energía solar ($NJOB^{solar}$), este objetivo se puede obtener de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 ONJOBS = & \sum_f \sum_u \sum_t [NJOB_f^{fossil} \cdot Q_{f,u,t}^{fossil}] \\
 & + \sum_b \sum_u \sum_t [NJOB_b^{biofuel} \cdot Q_{b,u,t}^{biofuel}] \\
 & + \sum_u \sum_t [NJOB^{solar} \cdot Q_{u,t}^{solar}]
 \end{aligned} \quad (65)$$

2.3.10 Método de optimización

La formulación de optimización es un problema multiobjetivo de programación mixto entera no lineal que busca minimizar $OGHGE$ y maximizar simultáneamente $Annual Profit$ y $ONJOBS$, y además satisfacer las restricciones. Es posible, dado que los objetivos son contradictorios, un análisis de *multi-stakeholders* con la intención de alcanzar una solución de compromiso (CS), que compensen los objetivos en conflicto. La formulación de esta solución compromiso es presentada por:

$$CS = w_1 \left| \frac{Annualprofit - Annualprofit^{LB}}{Annualprofit^{UB} - Annualprofit^{LB}} \right| + w_2 \left| \frac{OGHGE - OGHGE^{UB}}{OGHGE^{LB} - OGHGE^{UB}} \right| + w_3 \left| \frac{ONJOBS - ONJOBS^{LB}}{ONJOBS^{UB} - ONJOBS^{LB}} \right| \quad (66)$$

donde w_i son los pesos asociados a cada función objetivo y $Annual Profit^{LB}$, $OGHGE^{LB}$ y $ONJOBS^{LB}$ son los límites inferiores de las funciones y $Annual Profit^{UB}$, $OGHGE^{UB}$ y $ONJOBS^{UB}$ son los límites superiores, estas coordenadas determinan el punto utópico y el más bajo de las soluciones objetivo (**Tabla 2**), con $\sum_i w_i = 1$ y $0 \leq CS \leq 1$.

Tabla 2. Resultados de los límites superiores e inferiores (matriz de pagos) para cada función objetivo

	LIMITE SUPERIOR (UB)			LIMITE INFERIOR (LB)		
	ANPROFIT	OGHGE	ONJOBS	ANPROFIT	OGHGE	ONJOBS
GANANCIA ANUAL (\$MM/año)	2175.973	1127.987	1310.254	-314.596	189.808	1092.657
OGHGE (x10⁷ emisiones/año)	1.454	1.458	1.262	1.266	1.262	1.458
ONJOBS (empleos/año)	10307	8878	57168	56311	57163	8878

3. RESULTADOS

3.1 Caso de estudio

El estudio de caso seleccionado es el problema de la escasez de agua en una zona del estado de Sonora en México, que incluye las ciudades de Hermosillo, Obregón y Guaymas cuya poblaciones son de 784,342, 149,299 y 409,310 habitantes, respectivamente (INEGI, 2017). Su demanda de agua promedio es de 266,677, 50,762 y 139,166 m³/d, considerando un uso promedio 0.36 m³/d por persona. En general, la mayoría del estado se encuentra en una región desértica (Desierto de Sonora), donde la precipitación varía a lo largo del año. La zona urbanizada de esta zona se localiza cercana principalmente al Río Sonora, Río Matape y Río de Yaqui que dan lugar a las presas: “El Molinillo”, “Abelardo L. Rodríguez”, “El Novillo”, “Ignacio R. A.” y “Álvaro Obregón”. También hay cuatro distritos de riego que se consideran en el estudio: 084 Guaymas, 051 Costa de Hermosillo, 041 Río Yaqui y 018 Colonias Yaquis. Además, la escasez de agua en la región ha llevado a una mayor explotación de las aguas subterráneas, principalmente para actividades agrícolas, en total 62 acuíferos se reconocen en todo el estado de Sonora, donde los más importantes son los de la Costa de Hermosillo, Valle del Yaqui, Guaymas, Río Mayo y el Valle de Sonora. (CONAGUA, 2014). Para este caso, se consideran las demandas industriales, agrícolas y domésticas, también se consideran la población involucrada en la región, las represas como recursos naturales, los acuíferos existentes en la región y las centrales eléctricas existentes con potencial para abastecer de agua a la región (González-Bravo y col., 2015).

Para los usuarios agrícolas se toma en cuenta la variabilidad de los requerimientos de agua y las etapas de riego de cada cultivo considerando dos estaciones de crecimiento, (marzo-agosto) y (octubre-enero) y las demandas de electricidad para los usuarios agrícolas.

En el sector doméstico se consideran las demandas de agua para las ciudades de Hermosillo, Obregón y Guaymas en cada mes, donde la demanda de agua aumenta en los meses más calurosos. También, las demandas de electricidad en cada ciudad aumentan en los meses más calurosos debido al mayor uso de sistemas de enfriamiento.

Para el sector industrial en el estado de Sonora, se han identificado más de 200 empresas auto-abastecidas que utilizan aguas subterráneas y superficiales. La demanda de

agua en el sector industrial se estima en 69 hm^3 , de los cuales 40 millones m^3 corresponden a aguas subterráneas y 29 hm^3 a aguas superficiales. Las demandas de agua y de energía para los usuarios industriales son relativamente constantes durante todo el año.

3.2 Análisis del caso de estudio

El modelo propuesto fue codificado en GAMS y consistió en 12,108 ecuaciones, 11,612 variables continuas y 721 variables binarias. El resolvidor BARON fue implementado para resolver el problema mixto-entero no lineal; y el tiempo de computo promedio fue de 16,113 s (con variaciones) en una computadora con un procesador Intel core i7 a 2.90 GHz y 8 GB de RAM. Los pesos para las funciones objetivo para cada uno de los escenarios del caso de estudio para la parte de múltiples partes interesadas se plantearon con crecimiento gradual para ver si existía una relación en el comportamiento de la función compromiso. La solución óptima se basa en la existencia de tuberías de un punto a otro, sujetas a costos de bombeo, costos de tubería, costos de instalación y operación, ventas de agua, energía y alimentos. La existencia de tuberías se modeló utilizando variables binarias, donde los costos de instalación de nuevos dispositivos se basan en la parte fija de los costos de capital.

En primera instancia se resolvió el problema considerando las tres funciones objetivos (maximizar el beneficio bruto anual, minimizar de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y maximizar el número de empleos nuevos). Para resolver el problema de optimización multiobjetivo, se implementó el método de la solución compromiso (*multi-stakeholders*), lo primero que se realiza es la matriz de pesos (**Tabla 2**), la cual nos permite cuantificar el nivel de conflicto existente entre los objetivos que se estén considerando. Se construye a partir de las soluciones que optimizan independientemente cada objetivo. Con cada solución obtenida, se construye un vector formado por los valores que toman las funciones objetivo en ese problema y los valores que resultarían para los demás objetivos con esa solución. Se obtiene así una matriz cuadrada en cuya diagonal principal se encuentra el punto ideal, formado por los valores óptimos de cada uno de los objetivos. Este punto es en general inalcanzable, a no ser que los objetivos no se encuentren en conflicto en cuyo caso el problema multiobjetivo tendría una única solución. Igualmente, se puede definir el punto utópico, como un punto inalcanzable, cuyas componentes de las diferentes funciones objetivo

poseen valores más ambiciosos que el del punto ideal. Por otra parte, el punto Nadir representa una solución no deseada. Este vector se define por los peores valores de las funciones objetivo en la matriz. De esta forma se conocerá para cada función objetivo su rango de variación dentro del conjunto factible. Estos puntos son utilizados comúnmente para la normalización de los objetivos en los métodos de optimización multiobjetivo (**Tabla 3**).

Tabla 3. Punto utópico y punto nadir para nuestro caso de estudio.

	ANPROFIT (\$MM/año)	OGHGE ($\times 10^7$ emisiones/año)	ONJOBS (empleos/año)
Punto Utópico	2175.973	1.262	57168
Punto Nadir	-314.596	1.458	8878

A partir de lo anterior, se analizó el comportamiento de los pesos (prioridades) a los diferentes objetivos de la solución compromiso, como se puede observar en la **Tabla 4** y en la **Figura 7**, dar pesos con incrementos fijos no garantiza un tendencia en el comportamiento de la solución compromiso, por lo cual pequeños cambios en las prioridades de cualquier objetivo hace que otro de los objetivos se dispare para compensar dicho cambio. Entonces, analizando la **Tabla 4** y comparando los resultados con el punto utópico, encontramos tres soluciones aceptables en $w_1 = 0.25$, $w_2 = 0.50$, $w_3 = 0.25$ y $CS = 0.012$ con un 97 %, en $w_1 = 0.33$, $w_2 = 0.33$, $w_3 = 0.33$ y $CS = 0.016$ con un 96 % y en $w_1 = 0.5$, $w_2 = 0.0$, $w_3 = 0.5$ y $CS = 0.024$ con un 97 % de cercanía al punto utópico. Entonces, nuestra solución más aceptada para manejar los pesos de la función objetivo sería balancearlos, es decir, que cada objetivo tenga la misma prioridad debido que comparando el resultado es muy cercano al utópico y brinda mayor seguridad para garantizar que las funciones objetivo sean consideradas de igual manera.

En cuanto a la **Figura 7**, se observa de mejor manera el comportamiento de estos cambios en cuanto a la distribución de las prioridades y la solución. Dando como resultado que aunque ciertos objetivos lleguen a alcanzar su valor utópico, éste se ve afectado por otro objetivo, haciendo que sea inalcanzable para los tres objetivos que simultáneamente se alcance este valor pero existiendo casos muy cercanos.

Tabla 4. Resultados de la solución compromiso (*CS*) respecto a las funciones objetivo.

w_1	w_2	w_3	<i>CS</i>	<i>ANNUAL PROFIT</i> (\$MM/año)	<i>OGHGE</i> ($\times 10^7$ emisiones/año)	<i>ONJOBS</i> (empleos/año)
0.00	0.00	1.00	5.67E-09	192.589	1.45	57168
0.00	0.25	0.75	0.291	171.698	1.36	46050
0.00	0.50	0.50	0.653	1251.937	1.43	36464
0.00	0.75	0.25	0.454	1051.975	1.36	44633
0.00	1.00	0.00	1.78E-15	1310.434	1.26	42869
0.25	0.00	0.75	0.012	2058.407	1.26	51168
0.25	0.25	0.50	0.012	2057.953	1.28	52154
0.25	0.50	0.25	0.012	2058.234	1.28	56154
0.25	0.75	0.00	0.012	2058.672	1.26	32878
0.33	0.33	0.33	0.016	2058.475	1.36	57154
0.50	0.00	0.50	0.024	2058.405	1.45	57168
0.50	0.25	0.25	0.024	2055.858	1.28	52154
0.50	0.50	0.00	0.024	2058.681	1.26	34870
0.75	0.00	0.25	0.035	2058.572	1.45	57160
0.75	0.25	0.00	0.035	2058.636	1.26	33124
1.00	0.00	0.00	1.89E-15	2175.973	1.45	10307

Para el escenario donde se considera la recarga de recursos sobreexplotados, la recarga incluye a la presa "Abelardo L. Rodríguez", el acuífero "Guaymas" y el acuífero "Costa de Hermosillo". En este caso, el flujo de agua se fijó para la presa "Abelardo L. Rodríguez" y el acuífero "Guaymas" en $600 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$ ($50 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{mes}$). También se cubren las demandas de agua y energía que satisfacen las tres ciudades. La **Figura 10** muestra la solución óptima obtenida.

En este caso, se fija un flujo de recarga para la presa "Abelardo L. Rodríguez" y para el acuífero Guaymas en $600 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{año}$. El nivel de agua en los acuíferos "Costa de Hermosillo" y "Guaymas" se incrementa cargando desde la nueva planta desalinizadora a como se muestra en la **Figura 10**. Se debe considerar que el caudal fijo de la nueva planta desalinizadora de potencia al acuífero "Guaymas" aumenta las reservas de agua son significativas. La recarga artificial hacia la presa "Abelardo L. Rodríguez" ($600 \text{ hm}^3 / \text{año}$) tiene un efecto positivo principalmente en la presa "El Molinito", que aumenta sus reservas mediante la recarga natural.

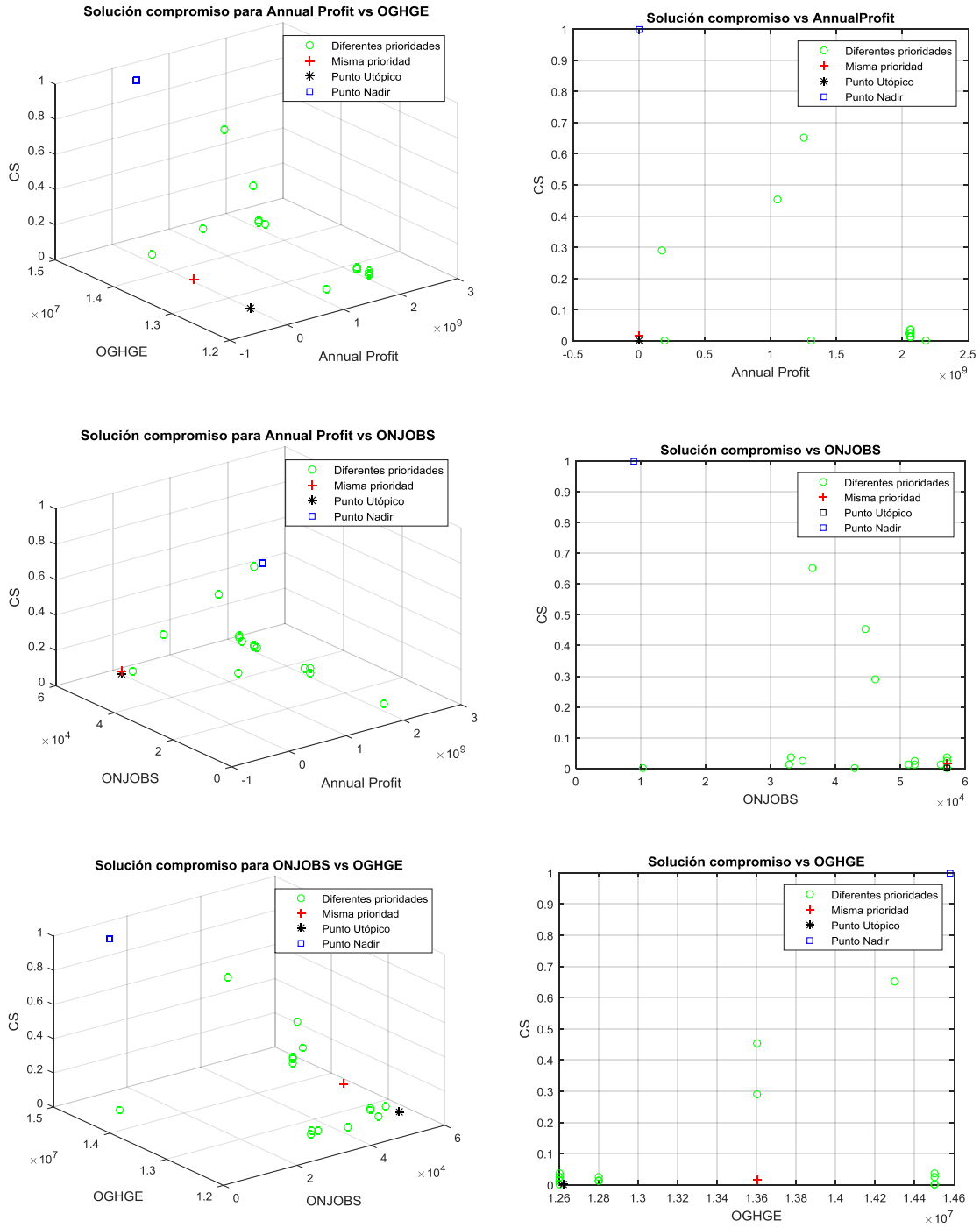


Figura 7. Solución compromiso (CS) respecto a las funciones objetivo.

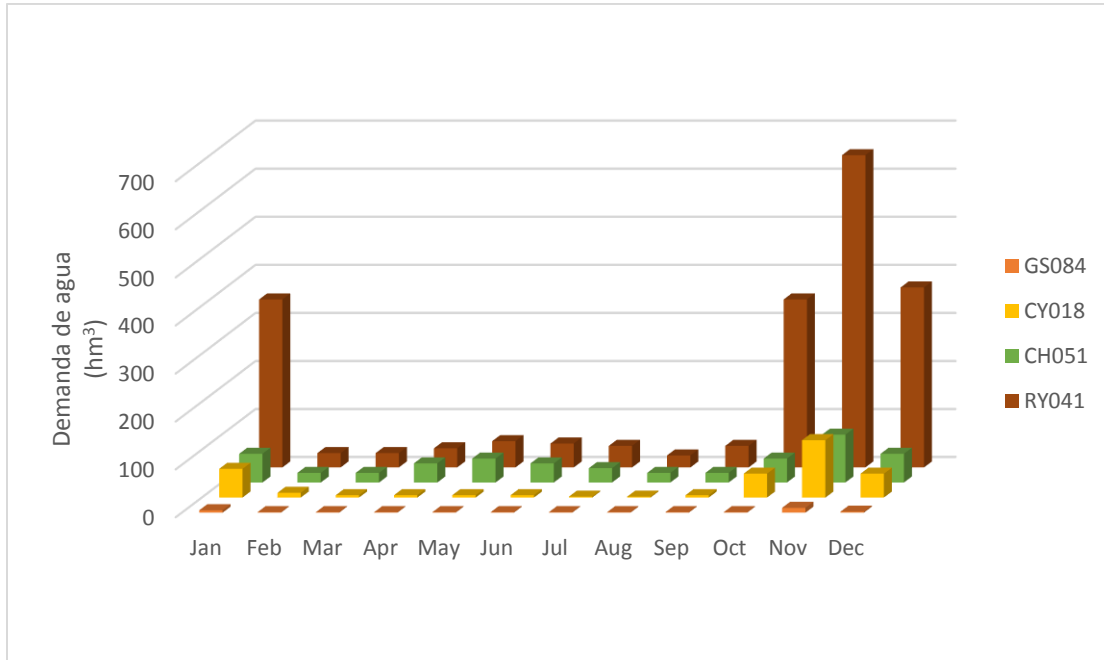


Figura 8. Variación de la demanda de agua para cada zona agrícola.

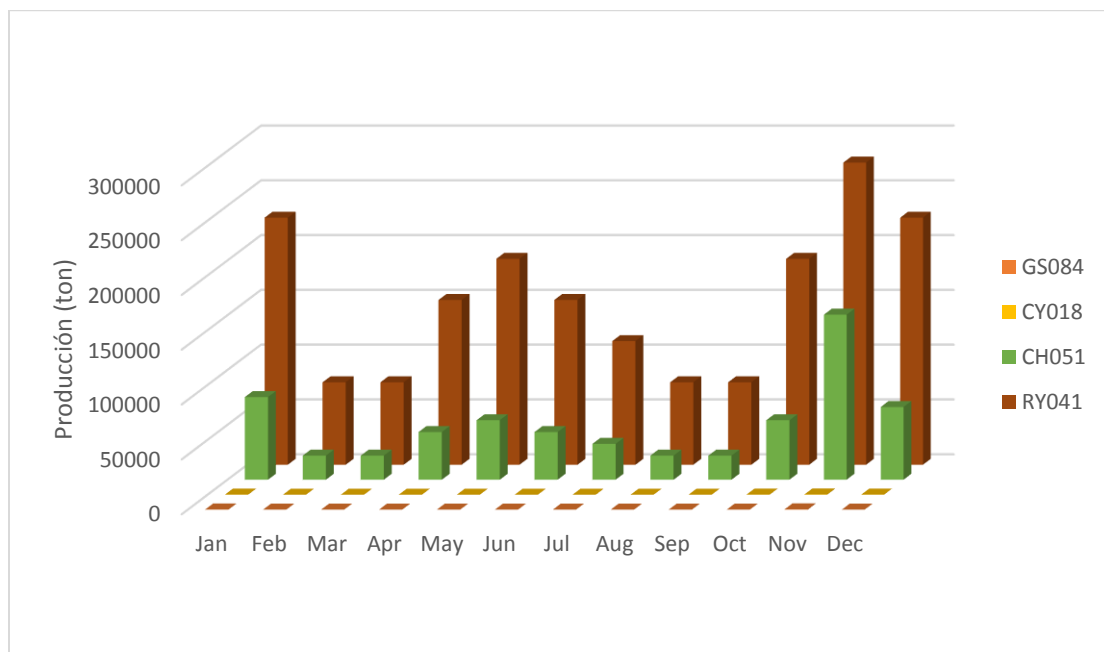


Figura 9. Producción de alimentos para cada zona agrícola.

En la **Figura 8** se muestra la variación de la demanda de agua para cada zona agrícola, aquí se observa que hay más demanda de agua en la temporada de otoño-invierno donde la escases de lluvia tiene que ser compensada por medio del sistema, de aquí podemos decir que el 70 % del agua que maneja del sistema es destinado a la agricultura, sin embargo el modelo garantiza una mayor producción agrícola por una distribución óptima de la superficie disponible bajo riego y como se tiene un uso más intensivo del agua hay menos pérdidas y mayor eficiencia.

En la **Figura 9** se observa la producción de los alimentos para cada zona agrícola, donde la producción de alimentos es proporcional al consumo de agua de cada distrito de riego. Los distritos de riego con mayor producción son 041 Rio Yaqui y 051 Costa de Hermosillo, principalmente en la temporada otoño-invierno, donde el cultivo de mayor producción es el trigo como se observa en la **Tabla 6**, donde también se observa la producción agrícola anual que tienen el resto de los cultivos en cada zona de irrigación y por temporada.

Tabla 5. Energía utilizada para entregar agua a los usuarios.

Puntos de entrega	Intensidad energética (MW/ha)
RY041(DR-41)	0.985
CY018(DR-18)	0.435
GS084(DR-84)	1.165
CH051(DR-51)	1.008
Hermosillo, Son	2.826
Obregón, Son	2.580
Guaymas, Son	3.236

En la **Tabla 5** se muestra la energía utilizada por cada usuario para suministrar agua, dando como resultado que hay mayor demanda energética para bombeo de agua y operaciones de equipos. Además, la cadena de producción y suministro de alimentos consume alrededor del 30 % del total de la energía consumida.

Tabla 6. Producción agrícola anual por cultivo para cada zona de irrigación.

018 COLONIAS YAQUIS					
CICLO	MODALIDAD	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)		PRODUCC.
			SEMBRADA	COSECHADA	(ton)
OT-IN	RIEGO	Trigo Grano	17461	17461	89577
PR-VE	RIEGO	Frijol (Alubia)	36	36	76
041 RIO YAQUI					
CICLO	MODALIDAD	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)		PRODUCC.
			SEMBRADA	COSECHADA	(ton)
OT-IN	RIEGO	Maíz Grano	7601	7601	53581
		Calabaza	1300	1300	21900
		Chile Verde	1240	1240	36043
		Sandía	364	364	20302
		Trigo Grano	166322	166322	1024673
PR-VE	RIEGO	Espárrago	2196	2196	10321
		Garbanzo	60	60	88
		Nuez	1296	1296	1037
		Naranja	1946	1946	44613
051 COSTA DE HERMOSILLO					
CICLO	MODALIDAD	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)		PRODUCC.
			SEMBRADA	COSECHADA	(ton)
OT-IN	RIEGO	Cártamo	3043	3043	7029
		Garbanzo	10922	10922	27305
		Trigo Grano	6557	6557	42227
PR-VE	RIEGO	Uva	5946	5946	77298
		Nuez	6358	6358	12716
		Alfalfa	272	272	19464
084 GUAYMAS					
CICLO	MODALIDAD	CULTIVO	SUPERFICIE (ha)		PRODUCC.
			SEMBRADA	COSECHADA	(ton)
OT-IN	RIEGO	Cártamo	380	380	570
		Maíz Grano	65	65	325
		Melón	585	585	20475
		Calabacín	757	757	16665
		Chile Verde	109	109	3871
PR-VE	RIEGO	Uva	777	777	12432
		Espárrago	1	1	3
		Alfalfa	468	468	33780
		Naranja	812	812	11368

Analizando los dos escenarios, A. solución óptima donde las demandas de energía y agua están totalmente satisfechas, y B. solución donde se considera la recarga de recursos sobre-explotados (**Tabla 7**), observamos que las diferencias en ventas es prácticamente la misma, sin embargo el costo anual total de la solución del escenario A es 2,956.85 \$ MM / año y del escenario B es 3,129.58 \$ MM / año, que es 6% mayor que la solución óptima donde no se considera la recarga de recursos sobre-explotados, el costo de la tubería para el escenario A es 4.465 \$ MM / año y del escenario B es 10.06 \$ MM / año, que es 2.25 veces el costo de la solución óptima, el costo de bombeo para el escenario A es 281.5 \$ MM / año y del escenario B es 535 \$ MM / año, que es 90 % mayor. Aunque la solución arroje una ganancia anual total para el escenario A de 359.095 \$ MM / año y del escenario B de 86.37 \$ MM / año, sigue existiendo una ganancia y se tiene una mejor relación con el medio ambiente en el escenario B.

Tabla 7. Resultados económicos para los escenarios analizados

Concepto	Escenario 1 (\$MM/año)	Escenario 2 (\$MM/año)
Venta de agua	2004	2004
Venta de energía	1199	1199
Venta de cultivos	8103	8103
Costo total anual	2956.85	3129.58
Costo de tubería	4.465	10.06
Costo de bombeo	281.5	535
Costo de instalación (Nueva planta)	106	106
Costo de operación (Nueva planta)	2651	2651
Costo de operación (Planta existente)	0.25	0.25
Ganancia anual	259.095	86.365

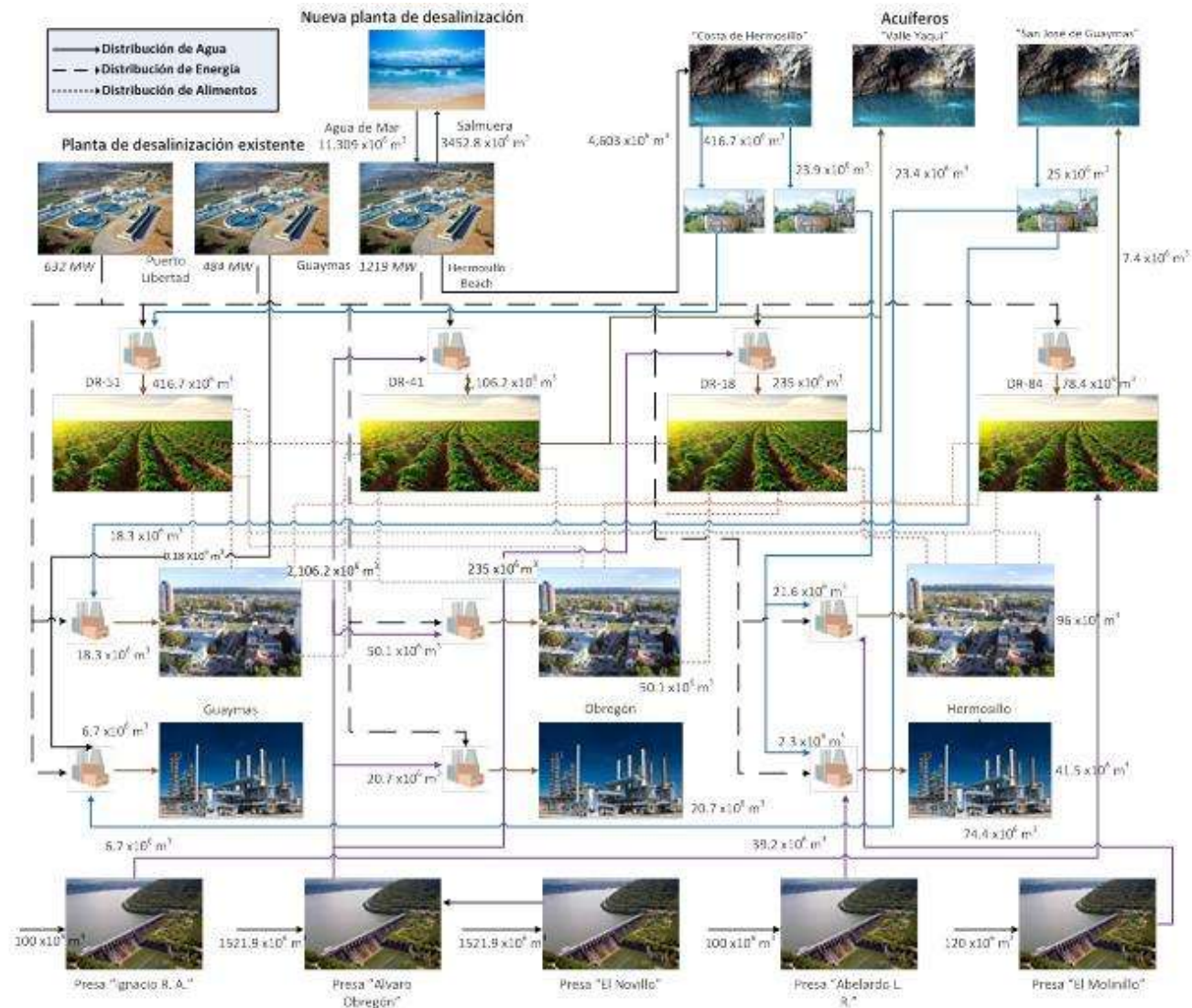


Figura 10. Red óptima para el uso de agua a nivel macroscópico.

4. CONCLUSIONES

- Se presentó un nuevo modelo de programación matemática para buscar distribuciones óptimas garantizando el suministro de agua, la seguridad alimentaria y la sostenibilidad en el uso de la energía.
- El modelo creado toma en cuenta el diseño óptimo de redes de distribución de agua en sistemas macroscópicos con escasez de agua, que satisface las demandas de agua, energía y alimentos y al mismo tiempo considera la recarga artificial de recursos sobreexplotados. El enfoque de optimización también tiene en cuenta la distancia y la elevación entre la ubicación de los recursos naturales y los usuarios del agua.
- El modelo puede ser utilizado en regiones de escasez de agua, por lo que se evaluó su aplicabilidad en una región del estado de Sonora, México. Aquí se analizaron diferentes escenarios del caso de estudio donde las demandas de energía y agua están totalmente satisfechas y donde se considera la recarga de recursos sobreexplotados.
- La evaluación económica del consumo energético y producción agrícola fueron buenos para estudiar variables tales como el beneficio y la demanda de agua.
- Finalmente, la formulación de optimización propuesta es general y puede aplicarse a otros casos de estudios. Además, no se identificaron complicaciones numéricas en la solución de la formulación de optimización propuesta.

5. REFERENCIAS

- Abou Najm, M., & Higgins, C. (2016). Toward Nexus Equation: A Conceptual and Mathematical Framework for Water-Energy-Food Nexus. In EGU General Assembly Conference Abstracts (Vol. 18, p. 11304).
- Alnouri, S. Y., Linke, P., & El-Halwagi, M. (2015). A synthesis approach for industrial city water reuse networks considering central and distributed treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, 89, 231-250.
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., & Yumkella, K. K. (2011). Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, 39(12), 7896-7906.
- Beisheim, T., Zieba, M., & Scheffknecht, G. (2013). Experimental investigations on deposit formation by recarbonation on external heat exchanger surfaces in oxyfuel CFB boilers. *Energy Procedia*, 37, 1283-1290.
- Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R., (2017), "GAMS, A user's guide". GAMS Development Corporation, Washington.
- Cairns, R., & Krzywoszynska, A. (2016). Anatomy of a buzzword: The emergence of 'the water-energy-food nexus' in UK natural resource debates. *Environmental Science & Policy*, 64, 164-170.
- CONAGUA. (2014). Distritos de riego del organismo de cuenca: Noroeste. Comisión Nacional del Agua / Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gerencia de Distritos de Riego. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGIH-6-15.pdf>> Acceso en: 2017.
- El-Halwagi, M. M. (2006). Process integration (Vol. 7). Elsevier.
- El-Halwagi, M. M., Gabriel, F., & Harell, D. (2003). Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(19), 4319-4328.

- Endo, A., Tsurita, I., Burnett, K., & Orencio, P. M. (2017). A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 20-30.
- FAO. (2014). The Water-Energy-Food Nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: http://www.fao.org/nr/water/docs/FAO_nexus_concept.pdf>. Acceso en: 2017.
- Foo, D. C. Y., Manan, Z. A., & Tan, Y. L. (2006). Use cascade analysis to optimize water networks. *Chemical Engineering Progress*, 102(7), 45-52.
- Gao, L., Ni, G. X., Liu, Y., Liu, B., Neto, A. H. C., & Loh, K. P. (2014). Face-to-face transfer of wafer-scale graphene films. *Nature*, 505, 190–194.
- García-Montoya, M., Bocanegra-Martinez, A., Napoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers & Chemical Engineering*, 76, 104-116.
- García-Montoya, M., Sengupta, D., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2016). Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex. *Journal of Cleaner Production*, 130, 82-91.
- González-Bravo, R., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Involving integrated seawater desalination-power plants in the optimal design of water distribution networks. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 181-193.
- Gurdak, J. J., Geyer, G. E., Nanus, L., Taniguchi, M., & Corona, C. R. (2017). Scale dependence of controls on groundwater vulnerability in the water–energy–food nexus, California Coastal Basin aquifer system. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 126-138.

- Hoff, H. (2011). Understanding the nexus: Background Paper for the Bonn2011. Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm.
- INEGI, (2017). National Institute of Statistics and Geography, Disponible en: http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/26/26004.pdf
- Kaddoura, S., & El Khatib, S. (2017). Review of water-energy-food Nexus tools to improve the Nexus modelling approach for integrated policy making. *Environmental Science & Policy*, 77, 114-121.
- Larcom, S., & van Gevelt, T. (2017). Regulating the water-energy-food nexus: Interdependencies, transaction costs and procedural justice. *Environmental Science & Policy*, 72, 55-64.
- Lawford, R., Bogardi, J., Marx, S., Jain, S., Wostl, C. P., Knüppe, K., ... & Meza, F. (2013). Basin perspectives on the water–energy–food security nexus. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 607-616.
- Miralles-Wilhelm, F. (2016). Development and application of integrative modeling tools in support of food-energy-water nexus planning—a research agenda. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6(1), 3-10.
- Nápoles-Rivera, F., Rojas-Torres, M. G., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Optimal design of macroscopic water networks under parametric uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 88, 172-184.
- Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2013). Sustainable water management for macroscopic systems. *Journal of cleaner production*, 47, 102-117.
- Oliveira-Esquerre, K. P., Kiperstok, A., Mattos, M. C., Cohim, E., Kalid, R., Sales, E. A., & Pires, V. M. (2011). Taking advantage of storm and waste water retention basins as part of water use minimization in industrial sites. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 316-324.

- Rahaman, M. M. (2013). Istanbul World Water Forum's Ministerial Statement (2009): a positive shift of global water policy recommendations towards sustainability. *International Journal of Sustainable Society*, 5(2), 114-132.
- Rojas-Torres, M. G., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal design of sustainable water systems for cities involving future projections. *Computers & Chemical Engineering*, 69, 1-15.
- Rojas-Torres, M., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., Guillén-Gosálbez, G., & Jiménez-Esteller, L. (2015). Multiobjective optimization for designing and operating more sustainable water management systems for a city in Mexico. *AIChE Journal*, 61(8), 2428-2446.
- Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Cervantes-Gaxiola, M. E., Hernández-Calderón, O. M., Ortiz-del-Castillo, J. R., Milán-Carrillo, J., ... & Meza-Contreras, J. A. (2016). Optimal design of integrated agricultural water networks. *Computers & Chemical Engineering*, 84, 63-82.
- Santibañez-Aguilar, J. E., Martinez-Gomez, J., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., González-Campos, J. B., & El-Halwagi, M. M. (2015). Optimal planning for the reuse of municipal solid waste considering economic, environmental, and safety objectives. *AIChE Journal*, 61(6), 1881-1899.
- Taniguchi, M., Endo, A., Gurdak, J. J., & Swarzenski, P. (2017). Water-energy-food Nexus in the Asia-Pacific Region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 11, 1-8.
- Vecchiotti, A., Lee, S., & Grossmann, I. E. (2003). Modeling of discrete/continuous optimization problems: characterization and formulation of disjunctions and their relaxations. *Computers & chemical engineering*, 27(3), 433-448.
- Water, U. N. (2014). The United Nations world water development report 2014: water and energy. United Nations, Paris.
- Zheng, F., & Zecchin, A. (2014). An efficient decomposition and dual-stage multi-objective optimization method for water distribution systems with multiple supply sources. *Environmental Modelling & Software*, 55, 143-155.