



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



INTEGRACIÓN ENERGÉTICA PARA UNA PLANTA DESALINIZADORA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO EN
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MCIQ BRÍGIDO JESÚS HIPÓLITO VALENCIA

BAJO LA DIRECCIÓN DE:

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ

EN CODIRECCIÓN:

DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA



DIRECCIÓN

CUNDUACÁN, TABASCO, ABRIL DE 2026

Declaratoria de Autoría y Originalidad

En la Ciudad de Villahermosa, el día 26 del mes de marzo del año 2026, el que suscribe Brígido Jesús Hipólito Valencia alumno del programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería con número de matrícula 172D20002, adscrito a la División de Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, como autor de la Tesis presentada para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería y titulada "Integración energética para una planta desalinizadora" dirigida por el Dr. Juan Barajas Fernández y Dr. José María Ponce Ortega.

DECLARO QUE:

La Tesis es una obra original que no infringe los derechos de propiedad intelectual ni los derechos de propiedad industrial u otros, de acuerdo con el ordenamiento jurídico vigente, en particular, la LEY FEDERAL DEL DERECHO DE AUTOR (Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Ley Federal del Derecho de Autor del 01 de Julio de 2020 regularizando y aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia), en particular, las disposiciones referidas al derecho de cita.

Del mismo modo, asumo frente a la Universidad cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de la autoría o falta de originalidad o contenido de la Tesis presentada de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Villahermosa, Tabasco a 26 de marzo de 2026


MCIQ. Brígido Jesús Hipólito Valencia



JEFATURA DE POSGRADO

Cunduacán, Tabasco a 24 de febrero de 2026.
MEM/AP-DAIA/14/2026

PARA: **DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ**
DIRECTORA DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS DE DOCTORADO

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

"Integración energética para una planta desalinizadora"

Desarrollado por el MCIQ: **BRÍGIDO JESÚS HIPÓLITO VALENCIA**, del Doctorado en Ciencias en Ingeniería, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMITÉ SINODAL

DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
PRESIDENTE

DR. JOSÉ GUADALUPE FABIAN RIVER TREJO
SECRETARIO

DR. JUAN BARAJAS FERNÁNDEZ
VOCAL 1

DRA. MARÍA DE LOS ANGELES OLÁN ACOSTA
VOCAL 2

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
VOCAL 3

DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA
VOCAL 4

DRA. ESVEIDI MONTSERRAT VALDOVINOS
GARCÍA VOCAL 5



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



2026
Año de
Margarita
Maza

DIRECCIÓN

OFICIO: DAIA/DIR/260/2026
FECHA: 24 de febrero de 2026
ASUNTO: Autorización de
impresión definitiva

MCIQ. BRÍGIDO JESÚS HIPÓLITO VALENCIA
PASANTE DE DOCTORADO EN CIENCIAS EN INGENIERIA
PRESENTE

En virtud de haber elaborado su trabajo de TESIS denominado:

"Integración energética para una planta desalinizadora"

Para obtener el grado de Doctorado en Ciencias en Ingeniería y en el cual ha tenido como Director de Tesis al Dr. Juan Barajas Fernández y su Co-director el Dr. José María Ponce Ortega.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DRA. DORA MARÍA FRÍAS MÁRQUEZ
DIRECTORA

c.c.p. Archivo
DRADHFM / MCA/RACT



DIRECCIÓN

Carta de cesión de derechos

Villahermosa, Tabasco a 26 de marzo del 2026

Por medio de la presente manifestamos haber colaborado como AUTOR(A) y/o AUTORES(RAS) en la producción, creación y/o realización de la obra denominada "Integración energética para una planta desalinizadora".

Con fundamento en el artículo 83 de la Ley Federal del Derecho de Autor y toda vez que, la creación y/o realización de la obra antes mencionada se realizó bajo la comisión de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco; entendemos y aceptamos el alcance del artículo en mención, de que tenemos el derecho al reconocimiento como autores de la obra, y la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco mantendrá en un 100% la titularidad de los derechos patrimoniales por un período de 20 años sobre la obra en la que colaboramos, por lo anterior, cedemos el derecho patrimonial exclusivo en favor de la Universidad.

Esta cesión de derechos se otorga sin fines de lucro, respetando en todo momento mi reconocimiento como autor intelectual del documento y de conformidad con lo establecido en la Ley Federal del Derecho de Autor vigente.

Manifiesto que este trabajo es producto de mi autoría y que las ideas, datos y textos de otros autores han sido debidamente citados conforme a las normas académicas.

COLABORADORES



MCIQ. Brígido Jesús Hipólito Valencia



Dr. Juan Barajas Fernández



Dr. José María Ponce Ortega

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, quienes me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia; a mi familia, por su apoyo incondicional, y a mis maestros, por compartir su conocimiento y motivarme a seguir creciendo académica y profesionalmente.

*Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.*

Agradecimientos

Le agradezco a Dios, por concederme la oportunidad de alcanzar una meta más en mi vida, como es el Doctorado en Ciencias en Ingeniería. Así también, a mi familia, que siempre me ha brindado su amor y apoyo incondicional. Además, deseo expresar de todo corazón, mis agradecimientos a todas aquellas personas que me brindaron su colaboración, sus conocimientos y, sobre todo, su amistad durante la realización de esta investigación.

Para el Dr. José María Ponce Ortega y para el Dr. Juan Barajas Fernández porque me permitieron ser parte de su grupo de trabajo, porque me encaminaron a trabajar con rectitud y entusiasmo, y en especial, por ser excelentes personas. Ustedes son ejemplos de perseverancia, dedicación y disciplina.

Le agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de posgrado, así como el apoyo recibido para hacer una estancia en Morelia, Michoacán.

Este es el esfuerzo de un gran equipo de trabajo, a cada uno de ellos, Gracias.

Índice de contenidos

Declaratoria de Autoría y Originalidad	2
Autorización de impresión	4
Carta de cesión de derechos	5
Dedicatoria	5
Agradecimientos	7
Índice de contenidos	8
Índice de Tablas	10
Índice de Figuras	11
Resumen	12
Abstract	13
Introducción	14
Marco Teórico	17
2.1 Plantas de desalinización	20
2.2 Sistemas de osmosis inversa	24
2.3 Problemas de optimización	26
Justificación	28
Pregunta de investigación	30
Hipótesis	31
Objetivo General	32
Objetivos Específicos	32
Metodología	33
3.1 Formulación del modelo	38
3.1.1 Consumo de aguas subterráneas	39
3.1.1.1 Requerimientos de agua para riego	39
3.1.1.2 Consumo de agua de mar desalinizada	40
3.1.2 Requisitos de energía eléctrica	41
3.1.2.1 Balance energético global del ciclo Rankine de vapor	43
3.1.2.2 Área óptima del colector solar y disponibilidad para los combustibles fósiles	44

3.1.2.3 Restricciones del límite superior _____	45
3.1.2.4 Demandas de potencia para la planta desalinizadora _____	46
3.1.2.5 Balance de energía eléctrica _____	47
3.1.3 Costo anual total _____	48
3.1.3.1 Costo de las tuberías _____	50
3.1.3.2 Ingresos anuales _____	51
3.2 Estrategia de la solución _____	51
Resultados y discusiones _____	53
4.1 Escenario A _____	59
4.3 Escenario B _____	63
4.2 Escenario C _____	66
4.4 Comparación entre los diferentes escenarios seleccionados para el caso de estudio _____	69
Conclusiones y Recomendaciones _____	75
Conclusiones _____	75
Recomendaciones _____	76
Referencias _____	78
Anexos _____	86
Anexo 1-Nomenclatura del modelo _____	86
Anexo 2-Código _____	92
Anexo 3-Artículo publicado _____	102
Anexo 4-Presentaciones en congresos _____	104
_____	104
Anexo 5-Cursos extracurriculares _____	108

Índice de Tablas

Tabla 1. Agua renovable per cápita, 2015 y 2030 _____	15
Tabla 2. Niveles de SDT para diferentes fuentes de agua _____	24
Tabla 3. Consumo energético específico de diferentes tecnologías de desalinización de acuerdo con varios autores _____	25
Tabla 4. Costos de capital, operación y de mantenimiento para procesos de desalinización con RO con agua de mar _____	25
Tabla 5. Datos económicos considerados en el caso de estudio _____	57
Tabla 6. Parámetros para cada campo de cultivo _____	57
Tabla 7. Cantidades mensuales para el caso de estudio considerado _____	58
Tabla 8. Datos de los combustibles fósiles considerados en el caso de estudio _	58
Tabla 9. Requerimientos mensuales de agua para riego para cada campo de cultivo _____	70
Tabla 10. Capacidad máxima de las plantas de desalinización y unidades de bombeo _____	71
Tabla 11. Costos obtenidos para los diferentes escenarios del caso de estudio _	71

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución del agua en el planeta _____	17
Figura 2. Esquema del sistema de desalinización por evaporación múltiple etapa	21
Figura 3. Esquema del sistema de desalinización por evaporación múltiple efecto _____	22
Figura 4. Esquema del proceso de osmosis inversa _____	22
Figura 5. Superestructura propuesta para la integración de agua y energía en actividades agrícolas _____	35
Figura 6. Localización del área de estudio, Caborca, Sonora, México _____	54
Figura 7. Representación esquemática del caso de estudio abordado en este trabajo _____	56
Figura 8. Curva de Pareto obtenida en el caso de estudio _____	59
Figura 9. Consumo de electricidad externa para los diferentes escenarios analizados en el caso de estudio _____	60
Figura 10. Solución del Escenario A del caso de estudio _____	62
Figura 11. Solución del Escenario B del caso de estudio _____	65
Figura 12. Fuentes de energía externa aplicados en el ciclo Rankine de vapor para el Escenario B _____	66
Figura 13. Solución del Escenario C del caso de estudio _____	68
Figura 14. Fuentes de energía externa aplicados en el ciclo Rankine de vapor para el Escenario C _____	69
Figura 15. Consumo de agua subterránea para los diferentes escenarios analizados en el caso de estudio _____	74
Figura 16. Consumo de agua de mar desalinizada para los diferentes escenarios analizados en el caso de estudio _____	74

Integración energética para una planta desalinizadora

Resumen

El agua es un recurso esencial para la actividad agrícola, considerada la principal fuente de producción de alimentos que sustentan la vida humana. Sin embargo, los requerimientos de agua se han incrementado en todo el mundo originando sobreexplotación de los acuíferos. En este trabajo se analiza la desalinización del agua de mar como una opción para reducir el consumo de agua subterránea en zonas agrícolas con alta demanda hídrica. Se propone un modelo de programación no lineal entera mixta multiobjetivo multiperíodo basado en una superestructura que integra diversas configuraciones del sistema, empleando los solvers Lindoglobal, Conopt y CPLEX para su solución. En la superestructura se considera un ciclo Rankine integrado con sistemas energéticos, energía solar y combustibles fósiles, para satisfacer los requerimientos energéticos del proceso de desalinización y de la agricultura. La función multiobjetivo busca minimizar simultáneamente el consumo de agua subterránea y el costo anual total, que incluye los costos de capital y de operación. El costo de capital abarca los costos del área de captación, proceso de desalinización, ciclo de potencia y bombas. Los costos operativos consideran los costos de bombeo, y el consumo de combustibles fósiles, del agua subterránea y del agua desalinizada. El modelo de optimización se aplicó a un caso de estudio del estado de Sonora, México, donde se evaluaron tres escenarios económicos y ambientales mediante una curva Pareto, mostrando un ahorro máximo de hasta 60% en el consumo de agua subterránea. La formulación es general y adaptable a otros contextos con escasez hídrica.

Palabras Clave: Optimización, Desalinización, Reúso de Agua.

Abstract

Water is a vital resource for the development of agriculture, considered the main source of food production that sustains human life. Demand for water has increased globally, leading to the overexploitation of groundwater reserves. This study analyzes the seawater desalination process as an option to reduce groundwater consumption from overexploited aquifers for agricultural activities through irrigation systems. A multi-period, multi-objective mixed-integer nonlinear programming (MINLP) model is proposed, representing a superstructure integrating different system alternatives or configurations. Lindoglobal, CONOPT and CPLEX solvers were used for its solution. In the superstructure, the energy requirements of the desalination process and agricultural activity are assumed to be fed by a steam Rankine cycle integrated with energy systems (solar energy and fossil fuels). The multi-objective function includes minimizing groundwater consumption and the total annual cost; this cost includes the capital and operating expenses. Capital costs consist of expenses associated with the catchment area, the desalination process, the power cycle, and the pumping systems. Operating costs include pumping, fossil fuel consumption, groundwater and desalinated seawater. The optimization model was applied to a case study localized in Sonora, Mexico, where three economic and environmental scenarios were evaluated using a Pareto curve; the results show that the maximum groundwater savings achieved with the proposed method are approximately 60%. The proposed formulation is general in nature and can be applied to other case studies.

Keywords: Optimization, Desalination, Water reuse.

Introducción

El crecimiento demográfico ha generado desabasto de agua en varias partes del planeta, por la dificultad de satisfacer la demanda en el suministro de agua a grandes ciudades y a los diferentes sectores productivos. La preocupación mundial por la escasez de agua es inobjetable y cada día se encuentran más problemas por falta de agua dulce y por procesos que contaminan e impactan al medio ambiente. De acuerdo con la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA) (CONAGUA, 2016a), el agua renovable per cápita alcanzará en 2030 niveles cercanos o incluso inferiores a los 1000 m³ por habitante al año, lo que el índice Falkenmark (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE 2013) califica como una condición de escasez (CONAGUA, 2015). México no es la excepción, la distribución geográfica del agua no coincide con la distribución geográfica de la población; en la Tabla 1 se mencionan las diferentes Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) en las que se divide México. En la Tabla 1 destacan las RHA I (Península de Baja California) y RHA VI (Río Bravo) en condición de escasez. De mayor gravedad son los niveles menores de 500 m³ por habitante por año, calificados como condición de absoluta escasez, en la que se encuentra la RHA XIII (Aguas del Valle de México).

Por otra parte, en varias regiones del mundo, el agua subterránea es la principal fuente de agua, alrededor del 65% del riego y del agua urbana (Moreno et al., 2010; CONAGUA, 2015). En este contexto, en México, el 15% de los acuíferos definidos están sometidos a sobreexplotación, ubicados principalmente en los estados del centro y norte del país, donde se tiene una alta actividad agrícola, lo que ha ocasionado el agotamiento de manantiales, la desaparición de cuerpos de aguas superficiales y el deterioro de los ecosistemas aledaños. Cabe hacer mención de que la actividad con mayor demanda de agua en el mundo es la actividad agrícola, que consume aproximadamente el 70% del agua fresca que se extrae al año. Solo alrededor del 17% de la tierra de cultivo del mundo está irrigada, pero esta tierra irrigada produce el 40% de los alimentos del mundo (World Bank, 2017).

La desalinización del agua de mar es una alternativa que parece más viable para mitigar el problema de escasez de agua. En primer lugar, la demanda de agua aumentará exponencialmente, mientras que las reservas de agua dulce comenzarán a colapsar. Segundo, los precios de la desalinización siguen decreciendo y la eficacia tecnológica de los métodos y los procesos desalinizadores sigue incrementándose. No obstante, la desalinización es un proceso que requiere más energía comparado con los procesos convencionales para el tratamiento de agua; por tal razón, los costos son relativamente altos (Ali et al., 2018; Zhou et al., 2014).

Tabla 1
Agua renovable per cápita, 2015 y 2030

Clave	Regiones hidrológicas administrativas RHA	Agua renovable 2015 (hm ³ /año)	Agua renovable per cápita (m ³ /hab./año)	
			2015	2030
I	Pla. de Baja California	4,958	1,115	899
II	Noroeste	8,273	2,912	2,465
III	Pacífico Norte	25,596	5,676	5,062
IV	Balsas	21,678	1,836	1,628
V	Pacífico Sur	30,565	6,041	5,660
VI	Rio Bravo	12,352	1,004	860
VII	Cuencas centrales del Norte	7,905	1,733	1,543
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	35,080	1,451	1,266
IX	Golfo norte	28,124	5,326	4,717
X	Golfo centro	95,022	8,993	8,187
XI	Frontera sur	144,459	18,852	16,334
XII	Pla. de Yucatán	29,324	6,373	5,026
XIII	Aguas del Valle de México	3,442	148	136
	Total	446,778	3,692	3,250

Fuente: Tomado de Atlas del agua en México (CONAGUA, 2016a).

Por tal motivo, se analizaron varios esquemas de desalinización tales como los sistemas de flash múltiple etapa; de acuerdo con Shatat & Riffat (2010), los procesos de destilación producen aproximadamente el 50% de la capacidad de la desalación mundial, y el 84% de esta es producida por esta tecnología. Sin embargo, los sistemas de desalinización con ósmosis inversa poseen menor consumo energético y pueden utilizar agua salobre de mar, una ventaja ante los sistemas térmicos (González et al., 2017; Drioli & Curcio, 2010). En este sentido,

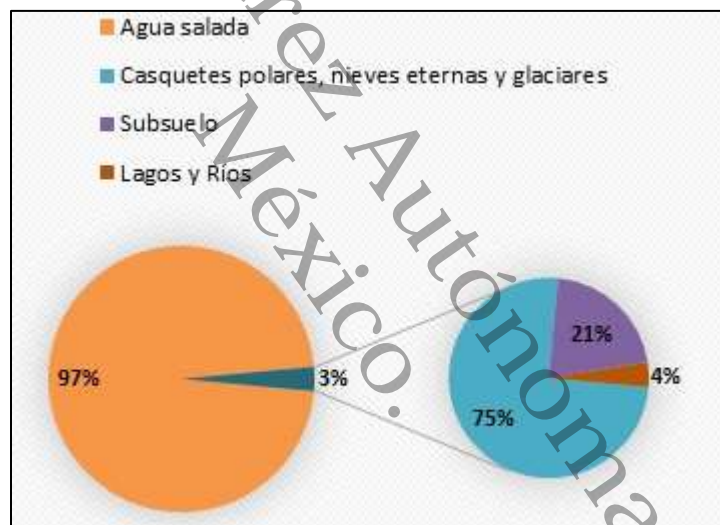
estudios recientes han demostrado que la combinación de plantas de desalinización de ósmosis inversa con plantas de potencia es una tecnología factible y eficiente para ser utilizada en la obtención de agua (García-Latorre et al., 2015; González-Bravo et al., 2015). Se han realizado trabajos donde se indican que el proceso de desalinización combinado con cogeneración y energía solar, como alimentación, aumenta la eficiencia energética del sistema (Shuja et al., 2017; Salimi & Amidpour, 2017). Estudios recientes han demostrado que la utilización de fuentes renovables, como la energía solar, biomasa, eólica y geotérmica, en sistemas energéticos y de desalinización son una opción para minimizar el impacto ambiental (Glasnović et al., 2011; Hamawand et al., 2017; Mata-Torres et al., 2017; Hipólito-Valencia et al., 2014a y 2014b). Wakeel et al., (2016) concluyen que los procesos de desalinización requieren más energía y emiten mayor cantidad de gases de efecto invernadero con respecto a otras etapas del ciclo del uso del agua; dicha situación puede solventarse a través del uso de energías renovables

En este trabajo se ha planteado el desarrollo de un modelo de optimización que incorpore ciclos de potencia y energías limpias para reducir el consumo de agua fresca en zonas costeras con problemas de escasez de agua y minimice la factura energética del proceso de desalinización. Es decir, el enfoque propuesto está dirigido a reducir el consumo de agua fresca y el costo anual total basándose en una nueva superestructura que permite la integración energética en sistemas de desalinización por ósmosis inversa con un ciclo Rankine de vapor, además de satisfacer los requerimientos energéticos de la actividad agrícola. El caso de estudio propuesto está localizado en el norte de México, en el estado de Sonora, considerada como una de las regiones con mayor sobreexplotación de acuíferos y donde la actividad agrícola es un pilar fundamental para su economía (CONAGUA, 2016b).

Marco Teórico

De acuerdo con CONAGUA (2016b), poco más del 97% del volumen de agua existente en el planeta es agua salada contenida en océanos y mares, mientras que menos del 3% (38 millones de kilómetros cúbicos) es agua dulce o de baja salinidad (ver Figura 1). Del volumen total de agua dulce, 75% está concentrado en casquetes polares, nieves eternas y glaciares; el 21% está almacenado en el subsuelo, y el 4% restante corresponde a los cuerpos y cursos de agua superficial (lagos y ríos).

Figura 1
Distribución del agua en el planeta



Fuente: Tomado de CONAGUA (2016b)

En muchas partes del mundo se necesitan grandes cantidades de agua dulce para usos agrícolas, industriales y domésticos (Chen & Chen, 2016; Vaklifard et al., 2018); sin embargo, en muchas regiones donde la disponibilidad de agua es baja, debido al clima y/o concentración de población en las ciudades más grandes, el suministro natural de agua rara vez satisface las demandas, lo que ha dado lugar a un aumento de la extracción de agua de acuíferos, presas y lagos (Seelen et al., 2019; Moredia-Valek et al., 2017; Pérez-Uresti et al., 2019). No obstante, en varias partes del mundo, el agua subterránea procedente de los

acuíferos es la principal fuente de agua, alrededor del 65% es usada para riego y agua urbana (Moreno et al., 2010; CONAGUA, 2015). Cabe hacer mención de que el agua procedente de los acuíferos se extrae mediante bombas sumergibles, y el agua puede almacenarse en depósitos o inyectarse directamente en el sistema de riego (Ching-Fang, 2018).

Por otra parte, la actividad agrícola consume aproximadamente el 70% del agua fresca que se extrae al año (World Bank, 2017). En México la superficie dedicada a la agricultura asciende a 20 millones de hectáreas, de las cuales solo 30% es de riego y utiliza alrededor de 80% del consumo total de agua. Sin embargo, la agricultura de riego contribuye con aproximadamente 55% de la producción total nacional, 70% de las exportaciones agrícolas y concentra 80% de la mano de obra agrícola (CONAGUA, 2016b). La agricultura con sistemas de riego es uno de los sectores que está aumentando su consumo de energía debido a la modernización de los sistemas de distribución de agua de riego (Sun et al., 2019).

La aplicación de la agricultura de riego en México ha presentado varios desafíos, tales como la presencia de lluvias en el norte del país, que en los últimos años ha sido irregular, ocasionando afectaciones a las principales zonas agrícolas; esta situación ha obligado a productores a invertir en obras de irrigación y tecnificación del riego con el propósito de asegurar la producción y rentabilidad de sus empresas. Además, los cambios estacionales en los caudales y las temperaturas de los ríos tienen un gran impacto en la programación de la generación de energía eléctrica; estas variaciones afectan directamente a la disponibilidad y fiabilidad de la generación de energía eléctrica (Huang et al., 2012; Gjorgiev & Sansavini, 2017). Por último, el bombeo para la distribución de agua y la extracción de agua subterránea son los principales consumidores de energía en las redes de agua presurizadas (Moreno et al., 2010). Por estas razones, se han desarrollado tecnologías y metodologías innovadoras para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos para la agricultura de riego, como la conservación del agua, la modernización de la infraestructura, la implementación de sistemas de riego inteligentes, las transferencias locales de

agua, el tratamiento de fuentes locales de agua de baja calidad, etc. (Duke & Casañas, 2015).

La búsqueda de soluciones óptimas para satisfacer las demandas de agua para actividades agrícolas ha sido estudiada por varios autores, por ejemplo, Arredondo-Ramírez et al. (2015) presentaron un enfoque de optimización para el uso del agua en la agricultura que incluye la recolección, el almacenamiento, la reutilización y el transporte de agua. Bataineh (2016) presentó el rendimiento de una bomba para riego-solar térmica utilizando un ciclo Rankine de vapor integrado con un colector cilíndrico parabólico (PTC, por sus siglas en inglés). Rubio-Castro et al. (2016) propusieron un modelo matemático para el diseño óptimo de redes de agua agrícola que implican la reutilización, el reciclaje y el almacenamiento de agua y fertilizantes entre los campos de cultivo en diferentes períodos. Pérez-Uresti et al. (2019) propusieron una red de distribución de agua óptima en la que la Captación de Agua de Lluvia (RWH, por sus siglas en inglés) se considera una fuente de agua alternativa para lugares con recursos hídricos sobreexplotados. Sin embargo, la mayoría de estas estrategias solo pueden mejorar el uso o cambiar la ubicación de los recursos hídricos convencionales existentes, no aumentarlos.

En este contexto, el agua de mar desalinizada se ha identificado como una opción potencial para mitigar la escasez de agua (Duke & Casañas, 2015; Saccon, 2018; Aparicio et al., 2019). Además, estudios recientes han demostrado que el uso de fuentes renovables, como la energía solar, biomasa, eólica y geotérmica, en sistemas energéticos y plantas desalinizadoras son opciones para minimizar el impacto ambiental y maximizar la eficiencia del sistema (Hamawand et al., 2017; Mata-Torres et al., 2017). La tecnología de desalinización más ampliamente adoptada para fines agrícolas es la ósmosis inversa (RO), debido a la relativa simplicidad del proceso, la facilidad de operación, el bajo costo y la tecnología más eficiente para extraer el agua dulce de una fuente salina a una escala adaptable para los agricultores (Subramani & Jacangelo, 2015; Duke & Casañas, 2015). Aparicio et al., (2019) presentaron un análisis costo-beneficio y concluyeron que una planta desalinizadora por ósmosis inversa (120 m³/d) es altamente rentable a partir de una superficie mínima de 1 ha; pero el beneficio final depende en gran

medida de la extensión de la superficie regada. También otros autores consideran que la tecnología RO es la más adaptable a las actividades agrícolas como Lahav et al., 2010; González-Bravo et al., 2015; Barron et al., 2015; y Martínez-Alvarez et al., 2016.

2.1 Plantas de desalinización

La desalinización del agua se define como un proceso fisicoquímico utilizado para eliminar los minerales presentes en el agua y la cual podría utilizarse para el consumo humano. En países como Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Chipre e Israel, la desalinización del agua es un proceso común. Las plantas de desalinización se instalan normalmente en zonas de gran amplitud y cerca de zonas costeras para tener acceso fácil al agua de mar. Cabe hacer mención, que la generación de agua desalinizada por estas plantas puede satisfacer la demanda local de agua, así como para las áreas no costeras, para ello, se deben considerar activos de infraestructura como tuberías y tanques de almacenamiento, los cuales deben instalarse en áreas grandes para permitir el transporte y almacenamiento de agua a través de una red de cadena de suministro (Saif & Almansoori, 2014). Aproximadamente 10,000 ton de combustibles son requeridos cada año para producir 1,000 m³/d de agua desalinizada (Kalogirou, 2005). Sin embargo, la desalinización es un proceso que requiere más energía comparado con los procesos convencionales para tratamiento de agua, por tal razón, los costos son relativamente altos (Ali et al., 2018; Zhou et al., 2014). El costo para cada método depende principalmente del tipo de proceso físico usado para remover las sales como la evaporación, filtración, congelamiento o por diferencia de potencial electrostático. La eficiencia de cada tipo de sistema depende de la cantidad de energía total necesaria para remover las partículas de sal, que en cierta medida depende del método de operación y así como de la pureza del agua requerida (Khoshrou et al., 2017). Por otro lado, Wakeel et al., (2016) hace referencia que el consumo de energía depende del volumen de agua, de la calidad del suministro de agua, de la

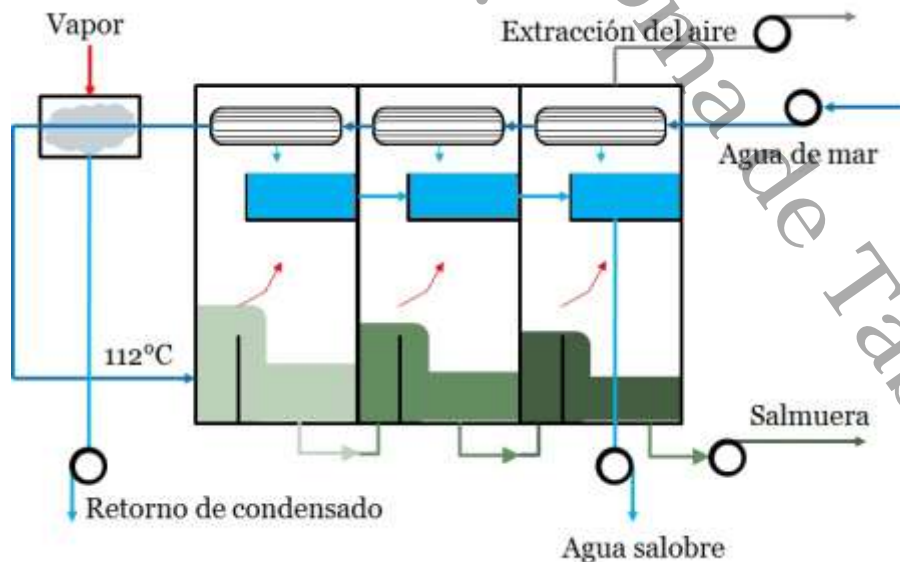
tecnología usada para el proceso de desalinización, así como la antigüedad de la planta de desalinización.

Los sistemas de desalinización están divididos en térmicos y no térmicos. Las plantas de desalinización tipo térmico incluyen los sistemas flash de múltiple etapa (MSF), compresión de vapor (VC), destilación solar, destilación de múltiple efecto (MED) y desalinización por congelamiento, los cuales usan calor por calentamiento directo por evaporación o extracción de calor para formar cristales de hielo de agua. Por otra parte, los sistemas como osmosis inversa (RO) y la tecnología de desionización capacitiva (CDT), se consideran sistemas no térmicos (Ali et al., 2018; Subramani & Jacangelo, 2015). Las principales desventajas que se asocian al proceso de desalinización son el uso elevado de combustibles fósiles, que son cada vez más costosos, las emisiones de gases de efecto invernadero que producen y la contaminación por las descargas de salmueras y residuos químicos a los alrededores (Khoshrou et al., 2017; Ali et al., 2018; Subramani & Jacangelo, 2015).

A continuación, se presentan los esquemas de los principales sistemas de desalinización:

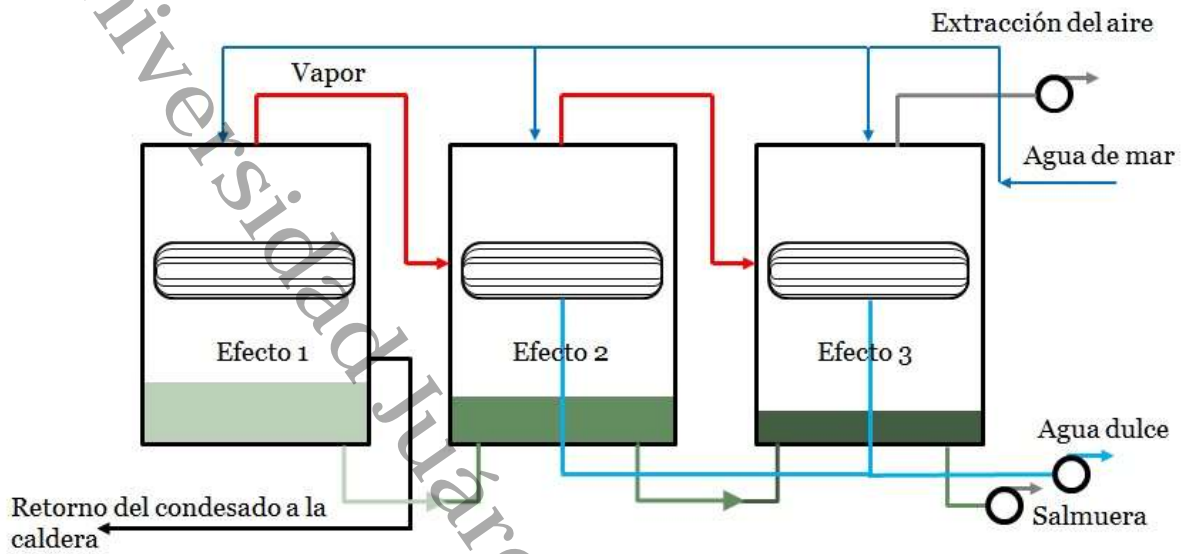
Figura 2

Esquema del sistema de desalinización por evaporación múltiple etapa



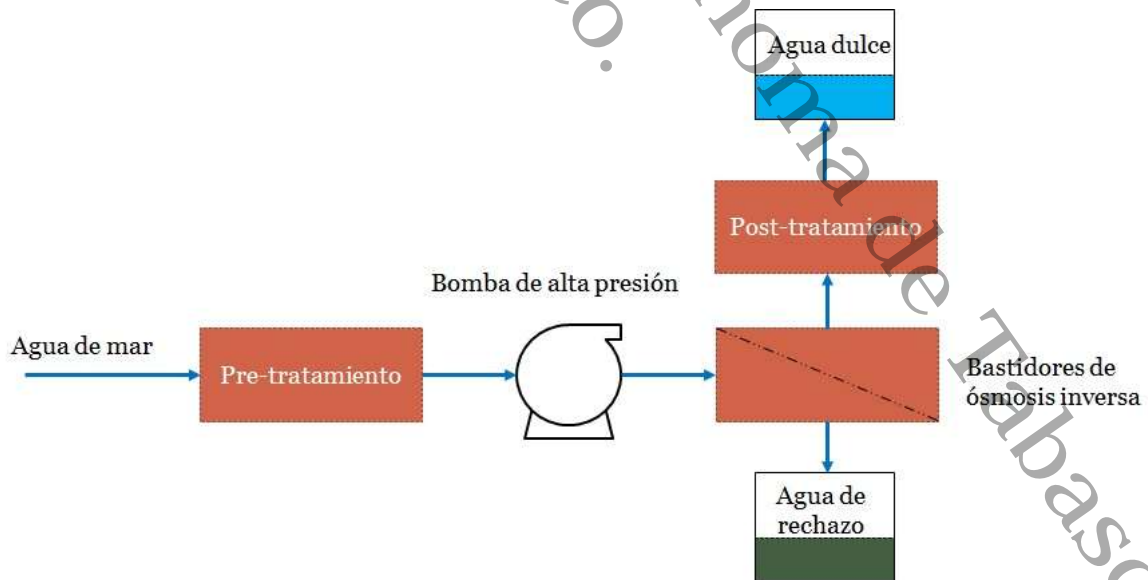
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3
Esquema del sistema de desalinización por evaporación múltiple efecto



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4
Esquema del proceso de ósmosis inversa



Fuente: Elaboración propia.

Shatat & Riffat (2010) indican que los procesos de destilación producen aproximadamente el 50% de la capacidad de la desalinización mundial, y el 84% de esta es producida por sistemas MSF. Wang & Lior (2006) mencionan que los sistemas de desalinización MSF y MED (ver Figura 2 y Figura 3, respectivamente) son adecuados para ser alimentados por el calor residual procedente de los ciclos de potencia. La MED también se puede combinar con bombas de calor para mejorar la eficiencia global del proceso (Padilla-Alarcón et al., 2010). Ehsan et al. (2012) presentan un análisis termoeconómico para un esquema para la producción de agua fresca que consiste en la combinación de sistemas para la recuperación de calor, como la desalinización por medio de VC-múltiple efecto y plantas de potencia con turbina de gas, obteniendo como resultado un rendimiento energético más alto que los sistemas tradicionales. Se ha encontrado que los procesos de desalinización que combinan la cogeneración y la energía solar como alimentación, aumentan la eficiencia energética del sistema (Shuja et al., 2017; Salimi & Amidpour, 2017).

Estudios recientes han demostrado que la utilización de fuentes renovables, como la energía solar, biomasa, eólica y geotérmica, en sistemas energéticos y de desalinización, es una opción para minimizar el impacto ambiental (Glasnović et al., 2011; Hamawand et al., 2017; Mata-Torres et al., 2017; Hipólito-Valencia et al., 2013 y 2014). Wakeel et al. (2016) concluyen que los procesos de desalinización requieren más energía y emiten mayor cantidad de gases de efecto invernadero con respecto a otras etapas del ciclo del uso del agua; dicha situación puede solventarse a través del uso de energías renovables y nuevas tecnologías de tratamiento. Varios trabajos han reportado que las tecnologías para aprovechar la energía renovable están creciendo rápidamente y pronto serán la segunda fuente de energía eléctrica a nivel mundial. Es así como la integración de fuentes de energía renovables como la solar, eólica y la energía geotérmica con sistemas de desalinización son una gran promesa para hacer frente a la escasez de agua y son una opción viable con potencial para la solución de los problemas del cambio climático y la escasez de agua (INEGI, 2018).

Las tecnologías de desalinización combinadas con los sistemas previamente mencionados han reducido los costos en un 50% y por lo cual se están instalando enormes plantas de desalinización en varias partes del mundo, como el Oriente Medio, África del Norte, Chile y México. La mayor planta desalinizadora del planeta se encuentra en Tel Aviv (Israel) y produce cerca de 624 millones de litros diarios de agua potable y vende 1,000 litros (consumo semanal medio de una persona) por US\$0.70 (INEGI, 2019). Por otra parte, en México hay una planta desalinizadora en Los Cabos, Baja California Sur, la cual produce 200 L/s (CONAGUA, 2016b).

2.2 Sistemas de osmosis inversa

Los procesos de desalinización por ósmosis inversa han ganado popularidad en los últimos años, dado que se alimenta sólo de energía eléctrica, por lo cual las emisiones de CO₂ son menores a los procesos de desalinización térmicos como MED, MSF, y VC (Gnaneswar et al., 2010). El número total de plantas de desalinización reportadas en el mundo en 2015 fue de 18,426, donde la tecnología de RO representa el 65%, le sigue MSF con el 21% y MED con el 7% (Cohen et al., 2017). En la Tabla 2 se muestran los diferentes tipos de agua producto que se pueden obtener de una planta desalinizadora en base al total de sólidos disueltos (SDT). En la Tabla 3 se presentan los diferentes tipos de procesos de desalinización y el consumo energético por cada metro cúbico de agua fresca obtenida.

Tabla 2
Niveles de SDT para diferentes fuentes de agua

Tipo	SDT (mg/L)
Agua potable	≤ 500
Agua fresca	< 1,000
Agua ligeramente salobre	1,000 - 5,000
Agua moderadamente salobre	5,000 - 15,000
Agua muy salobre	15,000 - 35,000
Agua de mar	≥ 35,000

Fuente: Tomado de Cohen et al. (2017)

Tabla 3

Consumo energético específico de diferentes tecnologías de desalinización de acuerdo con varios autores

Tecnología de desalinización	Consumo energético (kWh/m ³)	
	<i>Fthenakis et al. (2014)</i>	<i>Cohen et al. (2017)</i>
RO	2.5 - 7	0.3 - 7.5
MED	1.5 - 2.5	4 - 20.2
MSF	3 - 5	7.5 - 30.3
VC	8 - 15	7 - 12

Baipayee et al. (2011) mencionan que los sistemas RO, aunque requieren pre-tratamiento previo del agua, energéticamente son más eficiente que los procesos térmicos, además la energía mecánica consumida puede ser recuperada de la salmuera concentrada rechazada con un dispositivo adecuado de recuperación de energía tales como un intercambiador de presión (ver Tabla 3). Además, los RO pueden utilizar agua salobre como del mar, una ventaja ante los sistemas térmicos (González et al., 2017; Drioli & Curcio, 2010). El proceso general de desalinización por RO consiste en módulos de proceso que incluyen un sistema de ingesta de agua, pretratamiento de agua de alimentación, sistema de separación de desalinización, postratamiento del agua del producto y manejo del concentrado (Figura 4). Por otra parte, los costos del proceso de desalinización por ósmosis inversa se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Costos de capital, operación y de mantenimiento para procesos de desalinización con RO con agua de mar

Conceptos	Distribución (%)	
	<i>Eltawil et al. (2009)</i>	<i>Cohen et al. (2017)</i>
Costos fijos	37	34
Electricidad	44	38
Mano de obra	4	3
Reemplazamiento de membrana	5	5
Mantenimiento y partes	7	15
Químicos	3	5
Total	100	100

2.3 Problemas de optimización

Un modelo de optimización también denominado modelo de decisión es una representación matemática de la realidad. Puede ser representado de la siguiente manera:

$$\text{Max } f(x,y) \quad (1)$$

Sujeto a

$$s(x, y) = 0 \quad (2)$$

$$p(x, y) \leq 5 \quad (3)$$

$$\delta \leq t(x, y) \leq 10 \quad (4)$$

$$x \geq 0 \quad (5)$$

$$y \in \{0, 1\} \quad (6)$$

$$(x, y) \in R \quad (7)$$

Dónde:

La Ec. 1 representa la función objetivo: Consiste en maximizar o minimizar un determinado criterio de valor, tales como utilidades, producción, costos, uso de un determinado recurso, entre otros.

Las Ecs. de 2 hasta 6 representan actividades posibles y/o restricciones. Ejemplos de las actividades posibles pueden ser el tipo de riego, cultivos, compra de materia prima, procesos operativos, balances de materia y energía, relaciones de equilibrio, etc. Mientras que las restricciones representan las limitaciones dadas por condiciones que se deben cumplir, como son disponibilidad de agua

subterránea en una región, disponibilidad de combustibles fósiles, capacidad máxima de un tanque de almacenamiento y temperatura mínima requerida en el proceso, entre otras.

La Ec. 7 representa decisiones discretas y nos brinda respuestas a la pregunta ¿El equipo existe? Los resultados son dados por medio de variables binarias, las cuales pueden tomar valor de 0 para la no existencia del equipo y, 1 en caso de que el equipo sea parte de la solución óptima. Finalmente, diferentes tipos de variables que pueden ser usadas en un modelo matemático de optimización, tales como variables positivas (Ec. 5, denominada condición de no negatividad), binarias y enteras (Ec. 6), continuas (Ec. 7), etc.

Hay diferentes tipos de modelos matemáticos de optimización, para este trabajo se abordaron:

- a) MIP: Programación entera mixta. En este modelo, los requerimientos discretos son impuestos, es decir, las variables discretas asumen valores enteros entre sus fronteras. En este sentido, las variables discretas utilizadas en el modelo propuesto son variables binarias, que solo toman el valor entre 0 y 1 (Brooke et al., 2014).
- b) NLP: Programación no lineal. Términos no lineales son involucrados y funciones como las polinomiales, exponenciales, trigonométricas y logarítmicas son permitidas, pero en ninguno de los casos se deben presentar variables discretas (Brooke et al., 2014).
- c) MINLP: Programación no lineal mixta entera. El modelo puede contener tanto variables discretas como términos no lineales; sin embargo, los requerimientos discretos son impuestos como en los MIP (Brooke et al., 2014).

Por lo tanto, este trabajo presenta un modelo de optimización general basado en una formulación multiobjetivo y multiperíodo para satisfacer las futuras demandas de agua en regiones donde los acuíferos están significativamente sobreexplotados debido a las actividades agrícolas. Se considera un estudio de caso para la ciudad de Caborca, en el estado de Sonora en México, para reducir el uso de agua subterránea.

Justificación

El crecimiento poblacional y el incremento de la demanda de alimentos han intensificado de manera significativa el consumo de agua dulce a nivel global. En México, este fenómeno ha generado un escenario crítico de sobreexplotación de acuíferos, disminución de manantiales y degradación de ecosistemas. Regiones como la Región Hidrológica Administrativa XIII (Aguas del Valle de México) presentan niveles de agua renovable per cápita inferiores a 500 m³/hab./año, condición que la literatura clasifica como escasez absoluta, lo que representa un riesgo para la seguridad hídrica de la población y las actividades económicas.

La agricultura, responsable de aproximadamente el 70 % del consumo global de agua dulce, se encuentra en el centro de esta problemática, pues requiere grandes volúmenes de agua para mantener su productividad. En las zonas costeras, esta demanda hídrica ha provocado un déficit en los acuíferos, comprometiendo la disponibilidad futura del recurso y, por ende, la seguridad alimentaria.

En este contexto, la desalinización de agua de mar mediante ósmosis inversa surge como una alternativa estratégica para garantizar el abasto de agua en regiones con escasez de agua. Sin embargo, su alto consumo energético, los costos de operación y el impacto ambiental de la descarga de salmuera han limitado su implementación masiva en aplicaciones agrícolas.

Ante este desafío, es indispensable desarrollar modelos integrales de optimización que permitan:

- Reducir el consumo de agua fresca proveniente de acuíferos.
- Disminuir el costo anual total de producción de agua desalinizada.
- Aprovechar fuentes de energía renovable y ciclos de potencia eficientes para disminuir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

El presente estudio es relevante porque propone una solución técnica que sirva de base para la toma de decisiones de ingenieros, productores agrícolas y diseñadores de políticas públicas. Una solución enfocada en el diseño de un

sistema de desalinización sustentable que integre energías renovables y ciclos de potencia para mejorar la eficiencia energética.

En síntesis, esta investigación no solo busca garantizar el abasto de agua para la producción agrícola, sino también mejorar la eficiencia económica y fortalecer la seguridad hídrica nacional frente al contexto de crisis climática y crecimiento poblacional.

México.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Pregunta de investigación

- a. ¿En qué medida la desalinización de agua de mar puede convertirse en una solución técnica y económicamente viable para garantizar el abastecimiento de agua destinado al sector agrícola en zonas con escasez hídrica?
- b. ¿Cuáles son las regiones que presentan mayor escasez de agua fresca y, por tal motivo, utilizan acuíferos para satisfacer sus requerimientos hídricos?
- c. ¿Qué tecnología de desalinización es la más viable en términos de consumo energético y de costos de operación para actividades agrícolas?
- d. ¿Cuánta agua fresca procedente de los acuíferos es posible reducir usando el modelo de solución propuesto? ¿El costo es accesible? ¿Cuánto fue el consumo de electricidad?

Hipótesis

La integración de sistemas de desalinización por ósmosis inversa con ciclos de potencia y fuentes de energía renovable permitirá reducir el consumo de agua fresca y el costo anual total, garantizando el abasto hídrico para la actividad agrícola en zonas costeras con escasez de agua.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Objetivo General

Desarrollar un modelo de optimización para la operación de sistemas de desalinización por ósmosis inversa integrados con ciclos de potencia y energías renovables, con el fin de reducir el consumo de agua fresca y minimizar el costo energético anual.

Objetivos Específicos

- a. Diagnosticar la disponibilidad de agua y el grado de sobreexplotación de acuíferos en la región de estudio, considerando la demanda agrícola actual.
- b. Analizar las tecnologías de desalinización disponibles y seleccionar la más eficiente para la región en términos de consumo energético y costo.
- c. Diseñar un modelo matemático que integre el sistema de desalinización seleccionado con ciclos de potencia (por ejemplo, ciclo Rankine) y fuentes de energía renovable (solar, eólica o biomasa).
- d. Simular el comportamiento del sistema propuesto bajo diferentes escenarios de demanda hídrica y disponibilidad energética.
- e. Evaluar el impacto económico de la solución propuesta.

Metodología

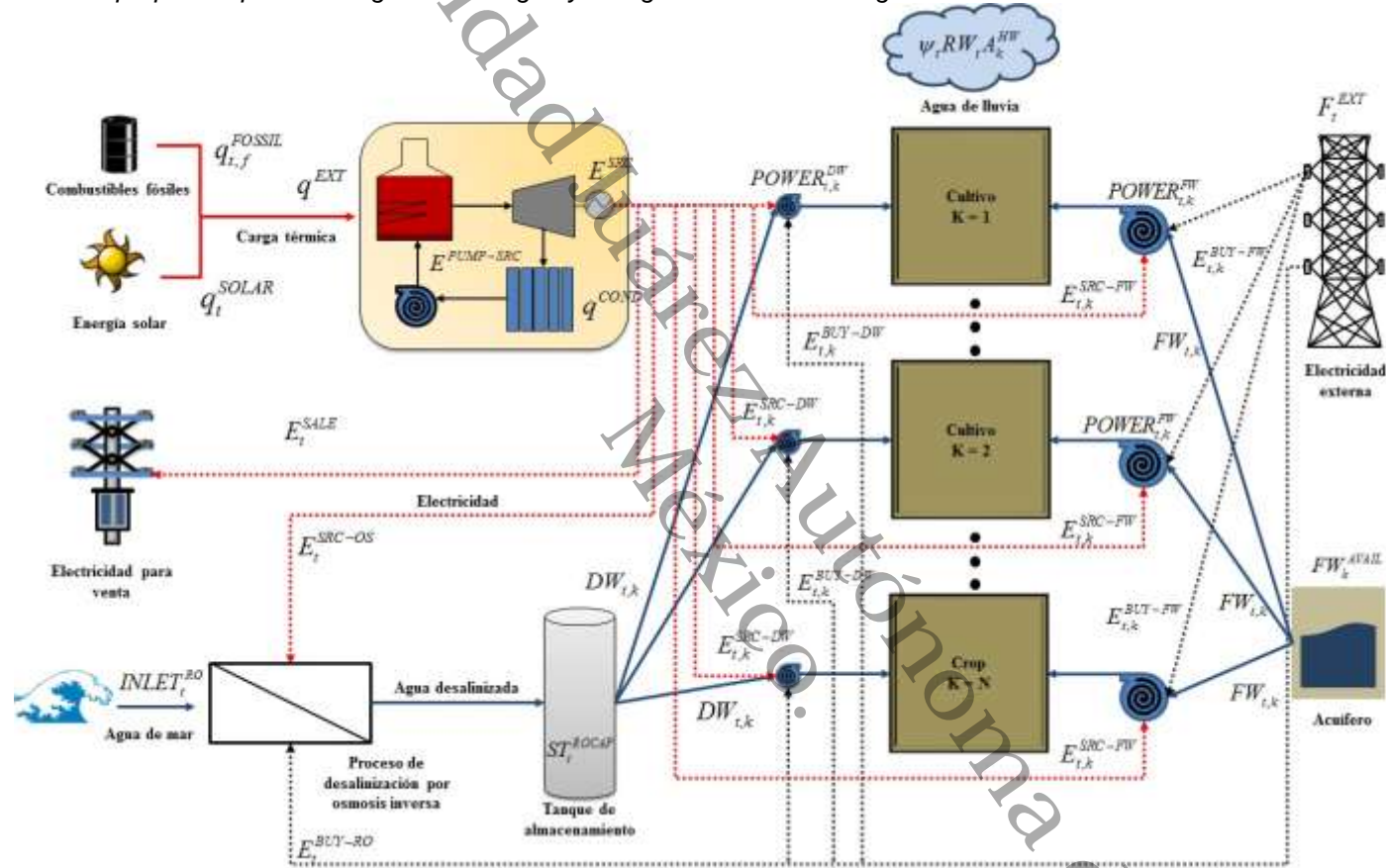
El área dedicada a la agricultura en México es de aproximadamente 20 millones de hectáreas, donde el 30% es para la agricultura de riego, y se utiliza alrededor del 80% del consumo total de agua (CONAGUA, 2016b). Sin embargo, países como México, con extensas regiones áridas y una distribución desigual de los recursos hídricos, presentan una fuerte sobreexplotación y agotamiento de los niveles piezométricos en los acuíferos. La disponibilidad de agua en regiones áridas y con características meteorológicas similares es nula, porque la evapotranspiración real absorbe completamente la precipitación en la mayoría de los casos. Además, México cuenta con 653 acuíferos definidos para la evaluación, manejo y administración de aguas nacionales; sin embargo, el 15% de ellos están sobreexplotados. Esto último ha provocado la contaminación del agua por intrusión salina, afectando varias actividades turísticas y de servicios ubicadas en la zona costera, además de la baja rentabilidad de la actividad agrícola (CONAGUA, 2016a). En consecuencia, para restablecer el equilibrio hidrológico, se han aplicado varias acciones, tales como programas anuales para reducir el bombeo, reducción de área irrigada y sistematización en sistemas de riego en áreas destinadas a un gran porcentaje de cultivos perennes. Sin embargo, estos programas no han tenido el éxito deseado; por esta razón, el agua de mar desalinizada se ha identificado como una opción potencial para reducir el consumo de agua de los acuíferos. El enfoque de optimización propuesto considera las limitaciones en la disponibilidad de agua subterránea para los pozos existentes y la instalación de una planta desalinizadora de ósmosis inversa como nueva fuente de agua.

Considerando lo anterior, se generó una superestructura para representar el problema de optimización abordado en este trabajo (ver Figura 5). De acuerdo con Novak et al. (1996), la superestructura se define como un esquema que presenta las corrientes de proceso, variables de entrada y de salida de los diferentes sistemas presentes (ciclos de potencia, procesos de desalinización, sistemas de

bombeo, paneles fotovoltaicos, entre otros), así como las interrelaciones entre los sistemas participantes.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Figura 5
 Superestructura propuesta para la integración de agua y energía en actividades agrícolas



El problema tratado en este documento se puede exponer de la siguiente manera (ver Figura 5). Dada una actividad agrícola de riego, donde hay campos de cultivo con una ubicación geográfica y extensión específica, donde se consumen grandes cantidades de agua subterránea de acuíferos sobreexplotados durante todo el año agrícola, es necesario diseñar una red de agua para reducir el consumo de agua subterránea incorporando agua de mar desalinizada a través de una planta desalinizadora de ósmosis inversa. Además, se consideran limitaciones en la disponibilidad de agua subterránea para cada campo, así como la captura de agua de lluvia por los cultivos y su evapotranspiración. Los procesos que se abordan en este sistema pueden describirse de la siguiente manera:

a) Una planta de desalinización de ósmosis inversa. Debido a las grandes cantidades de consumo de electricidad, el proceso de desalinización puede ser impulsado por la energía eléctrica producida a partir de un ciclo de Rankine de vapor y por la energía eléctrica externa (energía eléctrica suministrada por la red) necesaria para que el proceso tenga lugar en la planta. El modelo considera los costos de capital y operación de la nueva planta desalinizadora, la instalación de un tanque de almacenamiento de agua de mar desalinizada, tuberías para el transporte de agua a los cultivos y la potencia de bombeo correspondiente. Asimismo, se requiere un factor de eficiencia para simular su rendimiento.

b) Un ciclo Rankine de vapor. Se usa para satisfacer parcial o totalmente las demandas de energía de los sistemas participantes. En caso de que el ciclo de potencia presente excedente de electricidad, esta última se utilizará para producir ingresos por ventas de energía eléctrica hacia los alrededores. Por lo tanto, la incorporación del ciclo Rankine de vapor tiene como objetivo reducir la demanda de energía eléctrica externa de la planta desalinizadora. La carga de calor suministrada en la caldera del ciclo Rankine de vapor está optimizada y accionada por diferentes fuentes de energía primaria (energía solar y combustibles fósiles). Por lo tanto, los costos operativos para el ciclo Rankine de vapor son iguales a la suma del costo del colector solar y el costo asociado al consumo de combustibles fósiles. Cabe señalar que se considera un ciclo de potencia preespecificado (donde la carga de calor total proporcionada por los combustibles fósiles

disponibles genera una potencia máxima de 2500 kW). Así también, se requiere de un factor de eficiencia para simular su rendimiento.

c) Un conjunto de combustibles fósiles disponibles. Se utilizan para proporcionar energía primaria al ciclo Rankine de vapor. Para cada combustible fósil (gasolina, carbón y gas natural) se presenta el costo unitario y la disponibilidad máxima para cada período.

d) Un colector solar cilíndrico parabólico (PTSC, por sus siglas en inglés). En trabajos anteriores han obtenido buenos rendimientos integrados con ciclos Rankine de vapor (Glasnović et al., 2011; Lira-Barragán et al., 2013) y procesos de desalinización (Mata-Torres et al., 2017). El PTSC se utiliza considerando la radiación solar disponible durante el año en el lugar específico donde se instalará el colector solar (este parámetro incluye la eficiencia del equipo). Se especifican las funciones de capital y costos operativos, así como la capacidad de captar la radiación solar para cada período del año. Además, se determina la energía útil recogida por el colector solar por unidad de área. Esta última tarea se realiza después de conocer la ubicación del proyecto, ya que permite obtener los datos de radiación solar en cada período del año así también la capacidad de captación de radiación de la energía solar.

e) Bombas para agua subterránea y para agua de mar desalinizada. La ecuación de Hanzel-Williams (Mott, 2006) se utiliza para determinar la demanda de energía eléctrica para las unidades de bombeo; esta función determina la pérdida de fricción para un flujo volumétrico dado a través de una tubería conociendo su tamaño y longitud. En este sentido, la formulación incluye variables binarias para determinar la existencia de nuevas tuberías (0 si no se requiere la tubería existente, y 1 se requiere tubería nueva o la tubería existente es parte de la solución óptima), donde las operaciones incluyen costos fijos y variables; la formulación también incluye nuevos costos de tuberías y de bombeo. El costo de operación de la bomba está relacionado con los caudales en los diferentes períodos, así como con la distancia entre las fuentes de agua y los campos.

Por tales razones, las demandas de agua y energía pueden cambiar sustancialmente a lo largo del año. El problema consiste en determinar la

configuración óptima para la red de agua agrícola que implica las tuberías de agua requeridas, bombas y distribución que implica simultáneamente la minimización del consumo de agua subterránea anual y el costo anual total. El problema se plantea como un problema de optimización multiobjetivo para minimizar el consumo de agua subterránea anual (FW^{TOT}) y el costo anual total (TAC , por sus siglas en inglés) de la siguiente manera:

$$\text{Función objetivo} = (\min FW^{TOT}; \min TAC) \quad (8)$$

3.1 Formulación del modelo

El modelo propuesto busca satisfacer las demandas de agua y de energía para las actividades agrícolas a través de las aguas subterráneas de los acuíferos, un proceso de desalinización de ósmosis inversa y un ciclo de potencia. Los índices se definen de la siguiente manera: t representa el período de tiempo (meses para este caso), k representa los campos agrícolas para cada producto y f indica los combustibles fósiles (gas, carbón y gas natural) utilizados en el ciclo de Rankine de vapor. El superíndice FW representa las unidades para el transporte de agua subterránea, y DW denota las unidades para el transporte de agua de mar desalinizada. SRC y RO denotan los componentes del ciclo Rankine de vapor y la planta desalinizadora de ósmosis inversa, respectivamente. Finalmente, $SOLAR$ representa los componentes del colector solar.

El modelo propuesto se basa en la superestructura mostrada en la Figura 5. Este modelo representa la distribución de energía y la gestión del agua en un sistema macroscópico. La función objetivo del consumo de agua subterránea está representada por la Ec. (9), mientras que las Ecs. (10)-(16) representan los balances de masa en la red de distribución de agua, la disponibilidad de agua subterránea para cada campo y la capacidad máxima del equipo requerido. Las Ecs. (17)-(44) representan los balances de energía en la red de distribución de agua y los sistemas participantes, así como las capacidades de las unidades de bombeo existentes. El objetivo económico es descrito por la Ec. (45); mientras que

los costos implicados en este objetivo, la existencia o inexistencia de la nueva tubería, así como los ingresos por la venta de energía eléctrica, se describen en las Ecs. (46)-(52). Detalles de nomenclatura utilizada para las diferentes variables utilizadas en el modelo de optimización se muestran en el Anexo 1.

3.1.1 Consumo de aguas subterráneas

El consumo de agua subterránea anual (FW^{TOT}) se puede calcular sumando el agua subterránea consumida en cada campo k durante todos los períodos t ($FW_{t,k}$) de la siguiente manera:

$$FW^{TOT} = \sum_{\substack{t \in T \\ k \in K}} FW_{t,k} \quad (9)$$

La cantidad de agua subterránea necesaria para cada campo k durante cada período t ($FW_{t,k}$) se basa en la existencia de limitaciones en la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero; por lo tanto, para cada campo k se le asigna un límite superior (FW_k^{AVAIL}); se considera la siguiente relación:

$$\sum_{t \in T} FW_{t,k} \leq FW_k^{AVAIL}, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

El parámetro FW_k^{AVAIL} es una parte clave del modelo porque las limitaciones existentes en la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero determinan la red óptima para la distribución de agua en el sistema. Cabe señalar que el máximo de agua subterránea disponible para extracción está regulado por el gobierno (CONAGUA, 2016a).

3.1.1.1 Requerimientos de agua para riego

Los acuíferos se usan para satisfacer el consumo de agua en cada campo k , y la planta de desalinización de ósmosis inversa se presenta como una nueva

fuentes de agua. En este sentido, el agua utilizada para regar los diferentes campos ($WR_{t,k}$) durante cada período t puede ser suministrada por el agua subterránea del acuífero ($FW_{t,k}$) más el agua de mar desalinizada ($DW_{t,k}$) producida por el proceso de ósmosis inversa.

$$WR_{t,k} = DW_{t,k} + FW_{t,k}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (11)$$

Además, los requerimientos de agua para el sistema de riego ($WR_{t,k}$) también se pueden determinar de la siguiente manera:

$$WR_{t,k} = \frac{HW_{t,k} - RW_t A_k^{HW} \psi_t}{\eta_k^{WR}}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (12)$$

Donde, $HW_{t,k}$ es la cantidad de agua necesaria para los cultivos en el campo k durante cada período t ; este parámetro es equivalente a la evapotranspiración que depende de las características del cultivo, así como de los factores climáticos: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento e intensidad de la radiación solar. RW_t es la precipitación del agua de lluvia durante cada período t , A_k^{HW} es el área de cada campo k . Mientras que η_k^{WR} es la eficiencia del sistema de riego, y toma valores de 0.75 para riego por aspersión y 0.85 para riego por goteo (Howell, 2003; Irmak et al., 2011). ψ_t es el porcentaje de recuperación de agua de lluvia durante cada período t y toma valores entre 0.7 y 0.9, además considera las pérdidas por escorrentía y percolación profunda (Smith, 1992).

3.1.1.2 Consumo de agua de mar desalinizada

El consumo total de agua de mar desalinizada (DW^{TOT}) en el sistema se puede determinar con la suma del agua de mar desalinizada consumida en cada campo k durante cada período t ($DW_{t,k}$):

$$DW^{TOT} = \sum_{\substack{t \in T \\ k \in K}} DW_{t,k} \quad (13)$$

Para determinar el agua de mar desalinizada utilizada en cada período t (ST_t^{RO}) se calcula como sigue:

$$\sum_{k \in K} DW_{t,k} \leq ST_t^{RO}, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

La siguiente relación se considera para determinar el consumo de agua de mar en el proceso de desalinización en cada período t ($INLET_t^{RO}$):

$$INLET_t^{RO} = \frac{ST_t^{RO}}{\eta^{RO}}, \quad \forall t \in T \quad (15)$$

Aquí, η^{RO} es un factor de eficiencia para el proceso de desalinización por ósmosis inversa, toma un valor de 0.4 (Wang et al., 2011; Panagopoulos et al., 2019; Kim et al., 2019).

Para determinar la capacidad máxima del tanque de almacenamiento del proceso de desalinización (ST^{ROCAP}) se usa la siguiente restricción:

$$\frac{ST_t^{RO}}{\theta_t} \leq ST^{ROCAP}, \quad \forall t \in T \quad (16)$$

3.1.2 Requisitos de energía eléctrica

Para evaluar la potencia requerida para cada unidad de bombeo de cada campo k durante cada período t ($POWER_{t,k}^{FW}$, $POWER_{t,k}^{DW}$), se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$POWER_{t,k}^{FW} = \frac{\gamma^{FW} HT_{t,k}^{FW} Q_{t,k}^{FW}}{\eta^{PUMP-FW}}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (17)$$

$$POWER_{t,k}^{DW} = \frac{\gamma^{DW} HT_{t,k}^{DW} Q_{t,k}^{DW}}{\eta^{PUMP-DW}}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (18)$$

Aquí, γ es el peso específico y $Q_{t,k}$ es el caudal de agua en m³/s. Las eficiencias de la bomba ($\eta^{PUMP-FW}$ y $\eta^{PUMP-DW}$) toman valores cercanos a 0.8 (Pujades et al., 2017).

$HT_{t,k}$ es la altura dinámica total, se define como la altura total que bombeará el agua teniendo en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería, y se obtiene a través de las siguientes ecuaciones:

$$HT_{t,k}^{FW} = HSP_{t,k}^{FW} + HL_{t,k}^{FW}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (19)$$

$$HT_{t,k}^{DW} = HSP_{t,k}^{DW} + HL_{t,k}^{DW}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (20)$$

Aquí $HSP_{t,k}$ es la suma de la altura y la elevación estáticas. $HL_{t,k}$ es la pérdida de fricción en la tubería, que se calcula a través de la ecuación de Hanzel-Williams (Mott, 2006) de la siguiente manera.

$$HL_{t,k}^{FW} = L_k^{FW} \left(\frac{Q_{t,k}^{FW}}{0.85 C_H^{FW} A_k^{FW} (R_k^{FW})^{0.63}} \right)^{1.852}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (21)$$

$$HL_{t,k}^{DW} = L_k^{DW} \left(\frac{Q_{t,k}^{DW}}{0.85 C_H^{DW} A_k^{DW} (R_k^{DW})^{0.63}} \right)^{1.852}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (22)$$

Aquí A_k^{FW} y A_k^{DW} son las áreas transversales de las tuberías, R_k es el radio hidráulico y L_k es la longitud de la tubería. C_H es el coeficiente de Hanzel-Williams; este solo depende de la condición de la superficie de la tubería o conducto; por ejemplo, el valor que toma para tuberías nuevas y limpias de plástico, cobre, latón o vidrio es de 140.

Cabe señalar que la ecuación de Hanzel-Williams está limitada para flujos de agua en tuberías con diámetros entre 2 in y 6 pies, la velocidad de flujo no debe exceder 10 pies/s y la temperatura del agua alrededor de 60 °F.

3.1.2.1 Balance energético global del ciclo Rankine de vapor

El tamaño óptimo del colector solar se determina teniendo en cuenta simultáneamente la radiación solar mensual disponible en el sitio seleccionado y las disponibilidades máximas para satisfacer los requerimientos energéticos de los procesos. Las fuentes de energía externas solo se suministran al SRC; en este contexto, q^{EXT} representa la energía total requerida por el ciclo Rankine, la cual es proporcionada por el colector solar (q_t^{SOLAR}) y los combustibles fósiles ($q_{t,f}^{FOSSIL}$) durante cada período t .

$$q^{EXT} = q_t^{SOLAR} + \sum_{f \in F} q_{t,f}^{FOSSIL}, \quad \forall t \in T \quad (23)$$

La potencia producida por el ciclo Rankine de vapor (E^{SRC}) viene dada por la siguiente relación (Hipólito-Valencia et al., 2014a):

$$E^{SRC} = q^{EXT} \eta^{SRC} \quad (24)$$

Aquí, η^{SRC} es un factor de eficiencia para el ciclo Rankine de vapor.

La potencia necesaria para bombear el fluido de trabajo ($E^{PUMP-SRC}$) en el ciclo Rankine de vapor se obtiene de la siguiente manera.

$$E^{PUMP-SRC} = E^{SRC} \eta^{PUMP-SRC} \quad (25)$$

Donde $\eta^{PUMP-SRC}$ es un coeficiente de rendimiento y depende de la potencia producida por el ciclo Rankine de vapor y suele tomar valores inferiores a 0.06 (Hipólito-Valencia et al., 2014a).

La carga de calor total transferida en el condensador (q^{COND}) se obtiene a través de la suma de la potencia total proporcionada a la caldera del ciclo Rankine de vapor (q^{EXT}), la potencia requerida por la bomba ($E^{PUMP-SRC}$), menos la potencia generada por el sistema (E^{SRC}), que se indica de la siguiente manera.

$$q^{COND} = q^{EXT} + E^{PUMP-SRC} - E^{SRC} \quad (26)$$

3.1.2.2 Área óptima del colector solar y disponibilidad para los combustibles fósiles

El modelo propuesto considera que un colector solar puede proporcionar energía al ciclo Rankine de vapor; en este sentido, la energía solar en el período t (q_t^{SOLAR}) se obtiene teniendo en cuenta la radiación solar disponible en la ubicación específica donde se instala el colector solar, así como la eficiencia del equipo. El rendimiento del colector solar y su tamaño viene dado por la siguiente relación:

$$q_t^{SOLAR} \leq q_t^{USEFUL} A^{SOLAR} \frac{1}{\theta_t}, \quad \forall t \in T \quad (27)$$

Donde A^{SOLAR} representa el área óptima del colector solar, q_t^{USEFUL} es la radiación solar utilizada en la ubicación específica (este parámetro considera la eficiencia del equipo asociado), y θ_t es un factor de conversión para las unidades de tiempo en días/mes.

Por lo general, la disponibilidad de combustibles fósiles fluctúa a lo largo del año; por lo tanto, la siguiente relación modela esta variación.

$$q_{t,f}^{FOSSIL} \leq \frac{HEATING_f^{POWER} FOSSIL_{t,f}^{AVAIL}}{\theta_t}, \quad \forall t \in T, \forall f \in F \quad (28)$$

Aquí, $HEATING_f^{POWER}$ es la potencia térmica de los combustibles fósiles f y $FOSSIL_{t,f}^{AVAIL}$ representa la cantidad máxima disponible de combustibles fósiles f en el período t .

3.1.2.3 Restricciones del límite superior

Las relaciones lógicas que representan los límites superiores e inferiores de cada una de las potencias requeridas en las unidades de bombeo y ciclos térmicos son utilizadas para determinar la existencia de las unidades consideradas, que ocurre solo si la carga correspondiente es mayor que cero y la variable binaria correspondiente Z es 1; de lo contrario, la unidad no existe y la variable binaria Z toma el valor de cero. Estas relaciones lógicas se representan de la siguiente manera.

$$POWER_{t,k}^{FW} \leq POWER_k^{FWCAP}, \quad \forall k \in K \quad (29)$$

$$\delta Z_k^{FW} \leq POWER_k^{FWCAP} \leq POWER_k^{FWMAX} Z_k^{FW}, \quad \forall k \in K \quad (30)$$

$$POWER_{t,k}^{DW} \leq POWER_k^{DWCAP}, \quad \forall k \in K \quad (31)$$

$$\delta Z_k^{DW} \leq POWER_k^{DWCAP} \leq POWER_k^{DWMAX} Z_k^{DW}, \quad \forall k \in K \quad (32)$$

$$HP_k^{FWCAP} = 1.34102(POWER_k^{FWCAP}) \quad (33)$$

$$HP_k^{DWCAP} = 1.34102(POWER_k^{DWCAP}) \quad (34)$$

$$\delta Z^{SRC} \leq E^{SRC} \leq Q^{SRCMAX} Z^{SRC} \quad (35)$$

$$\delta Z^{PUMP-SRC} \leq E^{PUMP-SRC} \leq Q^{SRCMAX} Z^{PUMP-SRC} \quad (36)$$

$$\delta Z^{COND} \leq q^{COND} \leq Q^{SRCMAX} Z^{COND} \quad (37)$$

$$\delta Z^{SOLAR} \leq q_t^{SOLAR} \leq Q^{SRCMAX} Z^{SOLAR}, \quad \forall t \in T \quad (38)$$

Donde, los parámetros $POWER_k^{FWMAX}$ y $POWER_k^{DWMAX}$ son límites superiores para las unidades de bombeo, Q^{SRCMAX} es un límite superior para la carga de la unidad correspondiente, δ es un parámetro pequeño utilizado para evitar no factibilidades en el proceso de optimización, generalmente toma valor de 0.001; y Z es una variable binaria utilizada para seleccionar la unidad (un valor de 1 indica que la unidad existe y un valor de cero indica que la unidad no existe). $POWER_k^{FWCAP}$ y $POWER_k^{DWCAP}$ se utilizan para determinar la potencia requerida por las unidades de bombeo. Por otro lado, HP_k^{FWCAP} y HP_k^{DWCAP} se utilizan para determinar la potencia en caballos de fuerza (HP); estos datos son necesarios para conocer el costo variable de las unidades de bombeo.

3.1.2.4 Demandas de potencia para la planta desalinizadora

La energía eléctrica necesaria para la operación del proceso de desalinización en cada período t (E_t^{RO}) se determina a través de un factor de rendimiento D^{RO} que indica el consumo de energía eléctrica necesaria para obtener un metro cubico de agua fresca (Whittholz et al., 2008; Wang et al., 2011; Morote et al., 2017; Panagopoulos et al., 2019; Kim et al., 2019) y por la cantidad de agua de mar desalinizada consumida en cada período t (ST_t^{RO}).

$$E_t^{RO} = \frac{D^{RO} ST_t^{RO}}{H_Y^{RO} \theta_t}, \quad \forall t \in T \quad (39)$$

Aquí, H_Y^{RO} es el tiempo de funcionamiento diario de la planta de desalinización de ósmosis inversa.

3.1.2.5 Balance de energía eléctrica

La potencia producida por el ciclo Rankine de vapor (E^{SRC}) es igual a la suma de la potencia requerida por las unidades de bombeo para aguas subterráneas (E^{SRC-FW}) y agua de mar desalinizada (E^{SRC-DW}), más la potencia requerida en el proceso de desalinización (E^{SRC-RO}) y la energía eléctrica vendida (E^{SALE}).

$$E^{SRC} = \sum_{k \in K} E_{t,k}^{SRC-FW} + \sum_{k \in K} E_{t,k}^{SRC-DW} + E_t^{SRC-RO} + E_t^{SALE}, \quad \forall t \in T \quad (40)$$

Simultáneamente, la potencia requerida sobre cada unidad de bombeo para aguas subterráneas ($POWER_{t,k}^{FW}$) es igual a la suma de la potencia eléctrica del ciclo Rankine de vapor ($E_{t,k}^{SRC-FW}$), más la potencia externa necesaria ($E_{t,k}^{BUY-FW}$) para que el proceso se lleve a cabo en la unidad de bombeo.

$$POWER_{t,k}^{FW} = E_{t,k}^{SRC-FW} + E_{t,k}^{BUY-FW}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (41)$$

Del mismo modo, para las unidades de bombeo de agua de mar desalinizada:

$$POWER_{t,k}^{DW} = E_{t,k}^{SRC-DW} + E_{t,k}^{BUY-DW}, \quad \forall t \in T, \forall k \in K \quad (42)$$

Para el proceso de desalinización por ósmosis inversa:

$$E_t^{RO} = E_t^{SRC-RO} + E_t^{BUY-RO}, \quad \forall t \in T \quad (43)$$

Para determinar la energía eléctrica externa total requerida F_t^{EXT} durante cada período t se indica de la siguiente manera:

$$F_t^{EXT} = \sum_{k \in K} E_{t,k}^{BUY-DW} + \sum_{k \in K} E_{t,k}^{BUY-FW} + E_t^{BUY-RO}, \quad \forall t \in T \quad (44)$$

3.1.3 Costo anual total

La función de objetivo económico consiste en minimizar el costo anual total, que es la suma de los costos generados por el proyecto como los costos operativos (*OPEC*) y los costos de capital (*CAPC*), tuberías (*TLFW* para tuberías que transportan agua del acuífero y *TLDW* para tuberías que transportan agua desalinizada), menos los ingresos obtenidos por la venta de la energía producida en el ciclo Rankine de vapor a otros consumidores (*INCOME*).

$$\min TAC = OPEC + CAPC + TLFW + TLDW - INCOME \quad (45)$$

El costo de operación incluye los costos asociados por la carga térmica del ciclo Rankine de vapor (obtenida del colector solar y combustibles fósiles) más el costo total de las aguas subterráneas, el costo total del agua de mar desalinizada, los costos operativos de la planta de desalinización de ósmosis inversa y la energía eléctrica externa necesaria en el proceso de desalinización y las unidades de bombeo.

$$\begin{aligned} OPEC = & C^{SOLAR} \sum_{t \in T} q_t^{SOLAR} \theta_t + \sum_{\substack{t \in T \\ f \in F}} C_f^{FOSSIL} q_{t,f}^{FOSSIL} \theta_t + C^{FW} FW^{TOT} + C^{DW} DW^{TOT} + C^{RO} \sum_{t \in T} INLET_t^{RO} \\ & + C^{ELEC} \left(H_Y^{PUMP-DW} \sum_{k \in K} E_{t,k}^{BUY-DW} \theta_t + H_Y^{PUMP-FW} \sum_{k \in K} E_{t,k}^{BUY-FW} \theta_t + H_Y^{RO} E_t^{BUY-RO} \theta_t \right) \end{aligned} \quad (46)$$

Donde H_Y^{PUMP} es el tiempo de funcionamiento diario de las bombas. H_Y^{RO} es el tiempo de funcionamiento diario de la planta de desalinización de ósmosis inversa. C^{SOLAR} y C^{FOSSIL} son los costos unitarios de las fuentes de energía utilizadas

en el ciclo Rankine de vapor. C^{ELEC} es el costo unitario de la energía externa requerida. C^{FW} y C^{DW} son los costos unitarios de las aguas subterráneas y de mar desalinizada, respectivamente. Además, el costo operativo del proceso de desalinización es una función del total de agua procesada del mar $INLET_t^{RO}$ multiplicado por su costo operativo unitario C^{RO} , donde este incluye pretratamiento, mantenimiento, mano de obra, eliminación de salmuera y costos de reemplazo de membrana.

El costo de capital anualizado incluye los costos de capital fijos (CF) y variables (CV) de la bomba, turbina, condensador y caldera del ciclo Rankine de vapor, así como las bombas para aguas subterráneas y agua de mar desalinizada, planta desalinizadora, tanque de almacenamiento y colector solar.

$$CAPC = CF + CV \quad (47)$$

El costo fijo se calcula de la siguiente manera:

$$CF = K_F \left(\begin{array}{l} \sum_{k \in K} F^{PUMP-FW} Z_k^{FW} + \sum_{k \in K} F^{PUMP-DW} Z_k^{DW} + F^{SOLAR} Z^{SOLAR} \\ + F^{RO} + F^{ST} + F^{COND} Z^{COND} + F^{PUMP-SRC} Z^{PUMP-SRC} \\ + F^{TURB} Z^{SRC} + F^{BOILER} Z^{SRC} \end{array} \right) \quad (48)$$

Donde F representa los costos fijos para cada unidad de proceso (bombas para el transporte de agua subterránea y agua de mar desalinizada ($F^{PUMP-FW}$, $F^{PUMP-DW}$), colector solar (F^{SOLAR}), planta desalinizadora (F^{RO}), tanque de almacenamiento para agua de mar desalinizada (F^{ST}) y, condensador (F^{COND}), turbina (F^{TURB}), bomba ($F^{PUMP-SRC}$) y caldera (F^{BOILER}) del ciclo Rankine de vapor). Z es la variable binaria para considerar la existencia de las unidades de proceso. Por otro lado, la parte variable del costo, que depende del tamaño de las unidades, se expresa de la siguiente manera:

$$CV = K_F \left(\sum_{k \in K} V^{PUMP-FW} (HP_k^{FWCAP})^\alpha + \sum_{k \in K} V^{PUMP-DW} (HP_k^{DWCAP})^\alpha + V^{SOLAR} (A^{SOLAR})^\alpha \right. \\ \left. + V^{RO} (ST^{ROCAP})^\alpha + V^{ST} (ST^{ROCAP})^\alpha + V^{COND} (q^{COND})^\alpha + V^{TURB} (E^{SRC})^\alpha \right. \\ \left. + V^{PUMP-SRC} (E^{PUMP-SRC})^\alpha + V^{BOILER} (q^{EXT})^\alpha \right) \quad (49)$$

Donde K_F es el factor utilizado para anualizar la inversión, V es el coeficiente de costo para cada unidad incorporada (bombas para el transporte de agua subterránea y agua de mar desalinizada ($V^{PUMP-FW}$, $V^{PUMP-DW}$), colector solar (V^{SOLAR}), planta desalinizadora de ósmosis inversa (V^{RO}), tanque de almacenamiento de agua de mar desalinizada (V^{ST}) y, condensador (V^{COND}), turbina (V^{TURB}), bomba ($V^{PUMP-SRC}$) y caldera (V^{BOILER}) del ciclo Rankine de vapor). α es un parámetro utilizado para considerar la economía de escala (El-Halwagi, 2006).

3.1.3.1 Costo de las tuberías

La distribución de agua se lleva a cabo a través de tuberías, lo que representa una parte clave del modelo, ya que la existencia de tuberías determina la red de agua óptima. La distribución se puede calcular usando las relaciones siguientes.

Para tuberías nuevas que transportan agua subterránea (Narváez-Rincón & Galeano-Paramero, 2002):

$$TLFW = (1 + B + H) \sum_{k \in K} CL_k^{FW} L_k^{FW} Z_k^{FW} \quad (50)$$

Para tuberías nuevas que transportan agua de mar desalinizada (Narváez-Rincón & Galeano-Paramero, 2002):

$$TLDW = (1 + B + H) \sum_{k \in K} CL_k^{DW} L_k^{DW} Z_k^{DW} \quad (51)$$

Donde la variable binaria Z_k determina la existencia de la nueva tubería, B es la relación de costo de instalación con el costo de compra de la nueva tubería y el costo total de los accesorios; esto generalmente toma un valor entre 0.4 y 0.6. H es el costo fijo total con mantenimiento incluido, esto toma un valor de 0.2 (Narváez-Rincón & Galeano-Paramero, 2002). CL_k es el costo de la tubería que depende del material de la tubería y su diámetro. L_k es la longitud del tubo. Los parámetros de estas correlaciones se pueden obtener de la información proporcionada por los proveedores locales.

3.1.3.2 Ingresos anuales

Finalmente, los ingresos por la venta de energía generada por el ciclo Rankine de vapor se calculan de la siguiente manera:

$$INCOME = H_Y^{SRC} PV^{ELEC} \sum_{t \in T} E_t^{SALE} \theta_t \quad (52)$$

Aquí H_Y^{SRC} es el tiempo de funcionamiento diario del ciclo Rankine de vapor; PV^{ELEC} es el precio unitario de venta de la energía eléctrica.

3.2 Estrategia de la solución

El modelo de optimización propuesto corresponde a un problema de programación no lineal mixta entera (MINLP). La no linealidad aparece asociada con la función objetivo de costo por el exponente relacionado con las economías de escala (Ec. 49) y con las restricciones para determinar la pérdida de fricción en las tuberías (Ecs. 21 y 22). La parte mixta entera está representada por las restricciones que contienen variables binarias, como las relaciones lógicas (Ecs. 29-38), y por aquellas que contienen variables enteras como la ecuación de costo fijo (Ec. 48). Por último, todas las variables son positivas, a excepción de la variable costo anual total (CAT), indicada por la Ec. (45). El modelo se codificó en el sistema de modelado algebraico general (GAMS), que es un software de

modelado de alto nivel para problemas de programación matemática con aplicaciones de modelado a gran escala (Brooke *et al.*, 2014). Para resolver el problema asociado, los solvers Lindoglobal, Conopt y CPLEX se utilizaron para resolver la programación no lineal de enteros mixtos asociados, la programación no lineal y los problemas de programación lineal, respectivamente. El problema se resolvió para determinar la mejor solución económica (que corresponde al consumo máximo de agua subterránea); después, el programa se resolvió para minimizar el consumo de agua subterránea (que corresponde al costo máximo). Posteriormente, se consideraron varios escenarios entre los límites determinados por las funciones objetivo. Como resultado, la formulación de optimización constó de 1,148 variables continuas, 12 variables binarias y el modelo quedó restringido por 1,213 restricciones. El modelo propuesto se implementó en una computadora con un procesador I3-4150T a 3,0 GHz y 4 GB de RAM. (ver Anexo-Nomenclatura del modelo matemático)

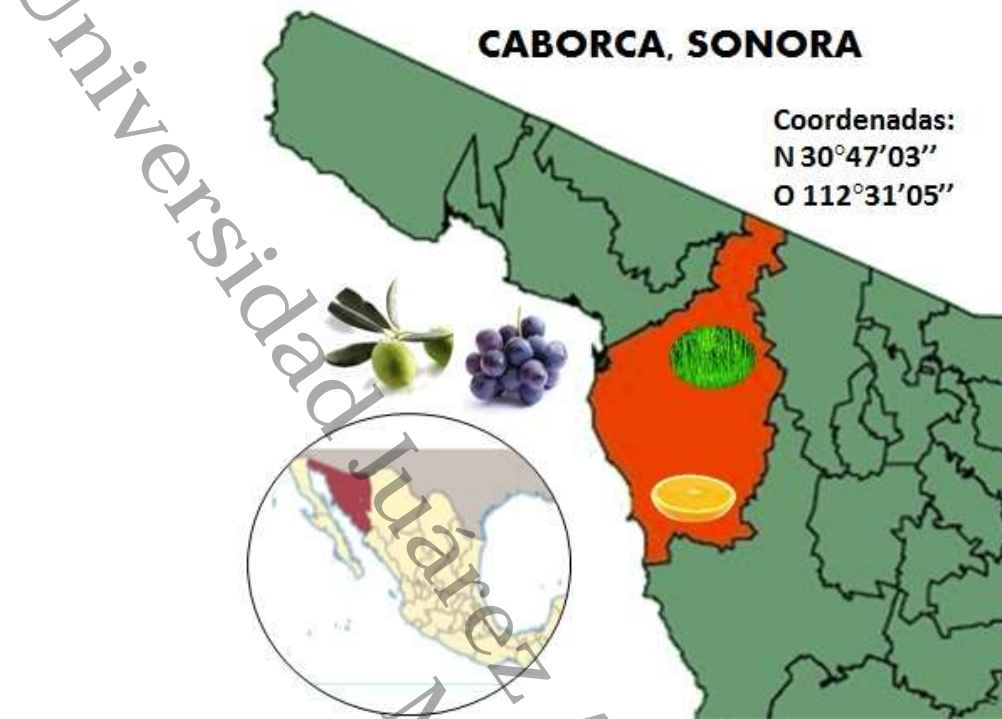
Resultados y discusiones

Se analizó un caso de estudio para probar la aplicabilidad del modelo matemático descrito previamente. Asimismo, para su descripción se identificaron tres escenarios que representan las posibles soluciones para el esquema propuesto: Escenario A que representa el costo anual total mínimo, pero con el mayor consumo de agua subterránea, el Escenario B muestra el mínimo consumo de agua subterránea, pero con el más alto costo anual total y un Escenario C, que proporciona los ahorros e ingresos más altos por producción de electricidad.

En este sentido, como caso de estudio se consideró el área de Caborca, Sonora (ver Figura 6); la cual presenta severos problemas de escasez de agua debido a la sobreexplotación de sus acuíferos y a su localización geográfica, además de que la región se encuentra situada sobre el acuífero de Caborca. Esta superficie se caracteriza por ser semiárida y tener una precipitación anual promedio de 269 mm/año, valor de evaporación potencial promedio de 234.6 mm/año y evapotranspiración cercana a 262.9 mm/año. Con respecto a la elevación del nivel estático, se observa que en las zonas más altas oscila un rango de 122 a 400 m sobre el nivel del mar, mientras que en zonas costeras es de -5 a 0 m sobre el nivel del mar. El principal uso del agua está dirigido a la actividad agrícola (CONAGUA, 2015). Por tales características, es necesario mejorar la red de distribución de agua en la agricultura, para reducir el consumo de agua subterránea.

Figura 6

Localización del área de estudio, Caborca, Sonora, México



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 describe las redes de distribución de agua que presenta el caso de estudio previo a la aplicación de la metodología propuesta (marco verde). La red muestra una actividad agrícola con cuatro cultivos (olivo, naranja, uva y prados y pastura), alimentada por agua subterránea del acuífero de Caborca, también se dan las distancias que existen entre los cultivos y los pozos existentes, la disponibilidad asignada de agua subterránea para cada campo de cultivo, la carga estática de succión y la elevación estática para determinar la potencia de bombeo. Los costos de operación asociados a agua subterránea y electricidad son de US\$95,433.88/año y US\$5,575.39/año, respectivamente. Cabe hacer mención, que en este esquema no hay integración energética y tampoco másica.

Por otra parte, el marco azul representa la red de distribución de agua implementando la metodología propuesta. Como se puede observar, se incluye la incorporación de una planta de desalinización por ósmosis inversa como una nueva fuente de agua para alimentar a los campos de cultivo. También se

muestran las distancias entre la planta de desalinización y los campos de cultivo, la carga estática de succión (40 m) y la elevación estática para bombeo de agua subterránea (0 m). Además, se consideran los datos que se presentan en el marco verde.

La Tabla 5 muestra los parámetros económicos. Donde C_H es de 140 (C_H promedio para tuberías nuevas y limpias de plástico, vidrio y cobre), η^{WR} es de 0.85 para riego de goteo, $\eta^{PUMP-FW}$ y $\eta^{PUMP-DW}$ toman valores de 0.7. La Tabla 6 presenta el área ocupada y la disponibilidad de agua subterránea para cada campo de cultivo, las distancias entre las fuentes de agua y los campos, y el diámetro de la nueva tubería. Se muestra que las distancias entre el sistema de desalinización y los campos son más grandes que las presentadas por los pozos existentes y los cultivos; así también, que el campo de uvas tiene 40,000 m³/año de disponibilidad de agua subterránea, el valor más grande.

Figura 7
 Representación esquemática del caso de estudio abordado en este trabajo

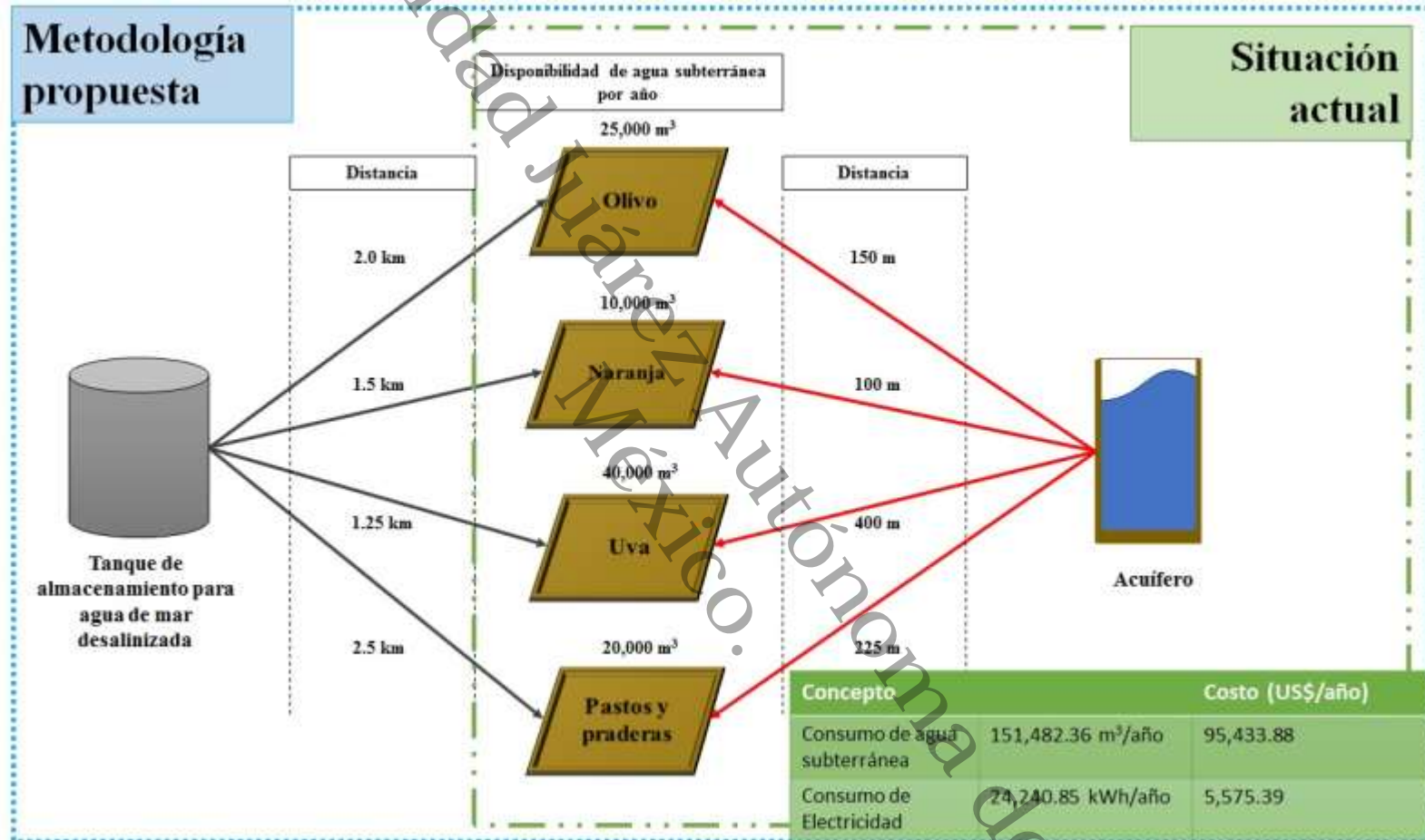


Tabla 5
 Datos económicos considerados en el caso de estudio

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
$\eta^{PUMP-DW}$	0.7	C^{ELEC} ^d	0.23 US\$/kWh	B	0.4	$V^{PUMP-FW}$	350 US\$/HP
$\eta^{PUMP-FW}$	0.7	C^{RO} ^a	0.25 US\$/m ³	H	0.2	$V^{PUMP-DW}$	350 US\$/HP
$\eta^{PUMP-SRC}$	0.05	C^{FW} ^d	0.63 US\$/m ³	α	1	$V^{PUMP-SRC}$	350 US\$/kW
η^{RO} ^a	0.45	C^{DW} ^c	1.72 US\$/m ³	α^{TURB}	0.45	V^{COND}	350 US\$/kW
η^{WR}	0.85	C^{SOLAR}	0.012 US\$/kWh	$H_Y^{PUMP-FW}$	4 h	V^{BOILER}	160 US\$/kW
η^{SRC}	0.4	C^{LFW}	50 US\$/m	$H_Y^{PUMP-DW}$	4 h	V^{SOLAR}	45 US\$/m ²
C_H	140	C^{LDW}	50 US\$/m	H_Y^{OS}	8 h	V^{TURB}	80,000 US\$/kW
ψ_t ^b	0.8	PV^{ELEC}	0.15 US\$/kWh	H_Y^{SRC}	8 h	V^{RO}	3,500 US\$/m ³ /d
D^{RO} ^c	3 kWh/ m ³	K_F	0.23/año	F	0 US\$	V^{ST}	70 US\$/m ³

^a Valor tomado de Saif & Almansoori (2014)

^b Valor determinado por FAO Cropwat 8.0, (Swennenhuis, 2006).

^c Valor tomado de Cohen et al. (2017)

^d Valor tomado de González-Bravo et al. (2016)

Los valores de los parámetros restantes fueron obtenidos de correlaciones de datos dados por vendedores de equipos especializados locales.

Tabla 6
 Parámetros para cada campo de cultivo

ID	Cultivo	ha.	Diámetro de la tubería (in)	Disponibilidad de agua subterránea (m ³ /año)	Distancia entre cada campo y	
					Pozos (m)	Planta de desalinización (m)
1	Olivo	5	6	25,000	150	2,000
2	Naranja	5	6	10,000	100	1,500
3	Uva	5	6	40,000	400	1,250
4	Pastos y praderas	5	6	20,000	225	2,500

Valores tomados de González-Bravo et al. (2016)

La Tabla 7 presenta la disponibilidad de combustibles fósiles y la energía solar que puede ser almacenada mensualmente por el colector solar en la región de Caborca. Para determinar la radiación disponible en el lugar, se calcula mediante la eficiencia del PTSC para captar la energía solar; también se presenta el agua de lluvia disponible en la región (Swennenhuis, 2006), y los requerimientos de agua para cada campo de cultivo. Nótese que hay disponible 390,000 kg/año de carbón, 535,000 kg/año de gasolina y 346,000 kg/año de gas natural para alimentar al ciclo Rankine de vapor; y que los períodos de mayo y junio presentan

los valores más bajos de precipitación, además de que los períodos de junio (26,445 m³), julio (30,275 m³) y agosto (25,895 m³) se consumen grandes cantidades de agua. La Tabla 8 indica cuáles combustibles fósiles son utilizados para el caso de estudio, así como sus potenciales térmicos y costos unitarios.

Tabla 7
Cantidades mensuales para el caso de estudio considerado

Mes	PTSC ^a (kJ/m ² mes)	Precipitación (mm)	Demandas de agua para cada cultivo ^c (m ³)				Disponibilidad de combustibles fósiles (kg)		
			1	2	3	4	1	2	3
Enero	306,900	26.0	1,010	1,415	130	770	10,000	10,000	80,000
Febrero	347,200	12.9	1,055	1,565	180	1,255	15,000	70,000	30,000
Marzo	483,600	18.1	1,510	2,380	450	2,810	40,000	60,000	25,000
Abril	570,000	6.7	2,345	3,190	1,625	4,710	50,000	65,000	35,000
Mayo	657,200	1.1	3,955	4,720	4,590	7,090	70,000	65,000	23,000
Junio	666,000	1.5	2,980	6,180	7,630	9,655	15,000	10,000	23,000
Julio	669,600	61.0	3,410	7,075	8,735	11,055	10,000	10,000	15,000
Agosto	613,800	72.2	3,120	6,295	7,025	9,455	50,000	10,000	15,000
Septiembre	504,000	28.2	4,425	5,130	4,700	7,570	40,000	10,000	20,000
Octubre	412,300	18.0	2,630	3,380	1,825	4,675	40,000	70,000	25,000
Noviembre	312,000	22.1	1,325	1,965	535	1,850	30,000	65,000	25,000
Diciembre	282,100	33.4	995	1,395	205	1,185	20,000	90,000	30,000

^a Valores determinados por FAO Cropwat 8.0 (Swennenhuis, 2006).

^b Datos tomados del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2015).

^c Datos obtenidos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2018).

Tabla 8
Datos de los combustibles fósiles considerados en el caso de estudio

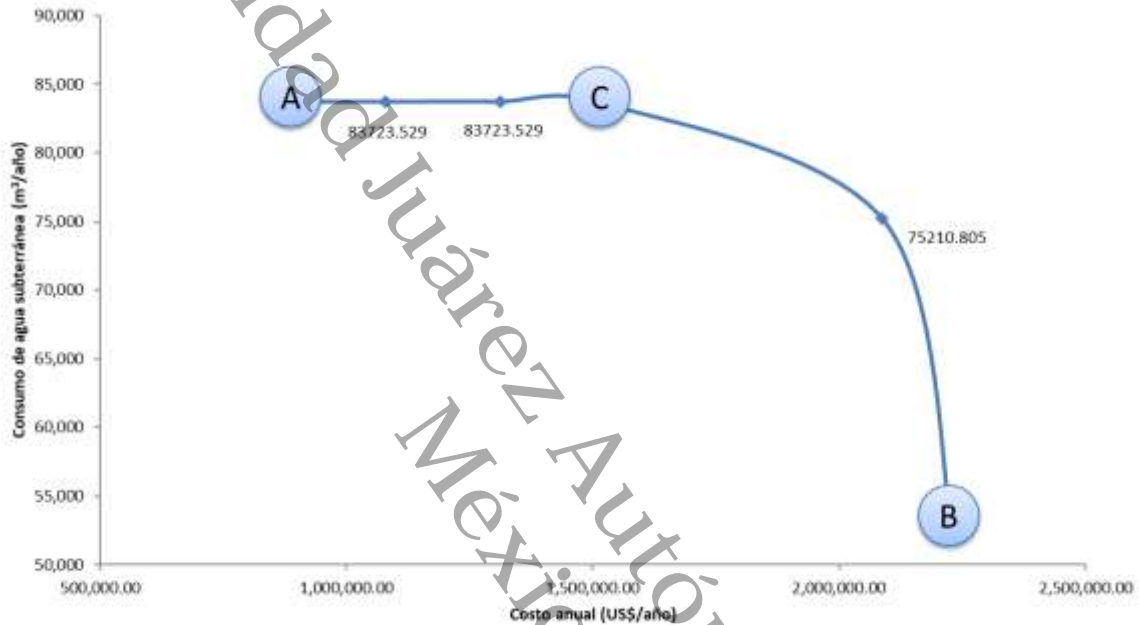
ID	Combustibles fósiles	Carga térmica (kJ/kg)	Costo (US\$/kJ)
1	Carbón	35,000	1.5559 x 10 ⁻⁶
2	Petróleo	45,200	18.244 x 10 ⁻⁶
3	Gas Natural	54,000	5.8349 x 10 ⁻⁶

Valores tomados de Lira-Barragán et al., (2013)

Los resultados de cada escenario son mostrados en la Curva de Pareto con la intención de identificar las interrelaciones entre los diferentes objetivos. Como se puede observar en la Figura 8, ambos objetivos están en los extremos de la Curva de Pareto: en el extremo izquierdo se muestra el Escenario A, el cual presenta el mínimo costo anual total, no obstante, es el que presenta el mayor consumo de agua subterránea; caso contrario al extremo derecho (Escenario B);

donde se presenta el mínimo consumo de agua subterránea, pero con el máximo costo asociado; es decir Escenario A y B son objetivos contradictorios. Finalmente, el Escenario C proporciona los ahorros e ingresos más altos por producción de electricidad, con respecto a los Escenarios A y B.

Figura 8
Curva de Pareto obtenida en el caso de estudio



En este sentido, las diferentes soluciones (escenarios A, B y C) seleccionadas de la Curva de Pareto se exploraron a detalle. Las configuraciones que se presentan en el trabajo como referencia son del mes de junio porque es el periodo con mayor consumo de agua subterránea.

4.1 Escenario A

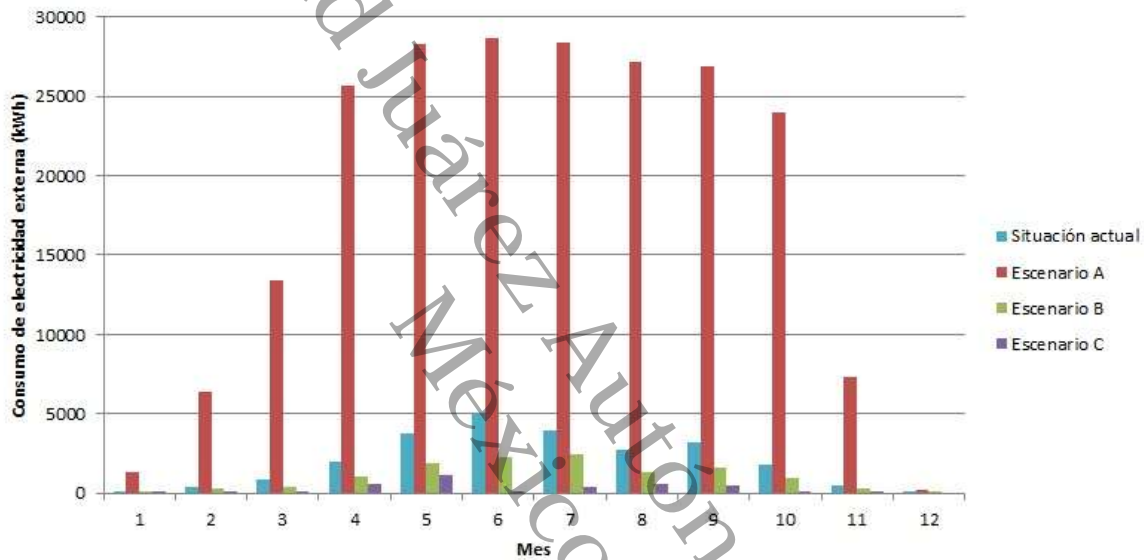
El Escenario A representa el costo anual total mínimo, pero con el mayor consumo de agua subterránea. Este considera entradas de agua subterránea y agua de mar desalinizada para la actividad agrícola.

El proceso de desalinización y el bombeo de agua son alimentados solo por potencia eléctrica externa. Este consume 88.13% del total de agua subterránea

disponible. Aquí el consumo de agua subterránea es de 83,723 m³/año, lo que representa 44.73% menos que la situación previa a la metodología propuesta. Además, el Escenario A presenta un consumo total de electricidad de 217,727.136 kWh/año, 8.98 veces el consumo de la situación actual (Figura 7). En la Figura 9 se puede observar el consumo de electricidad para cada período.

Figura 9

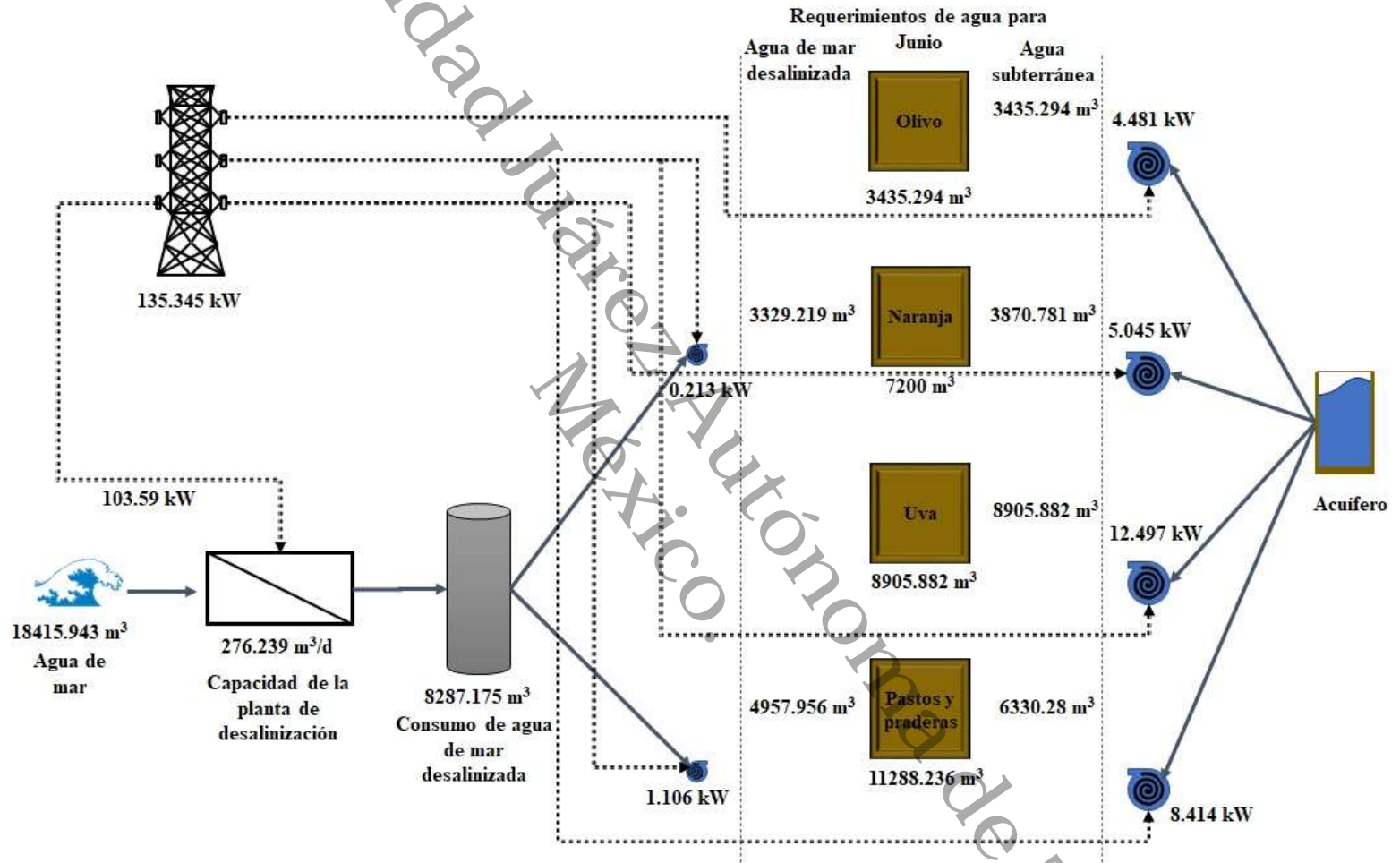
Consumo de electricidad externa para los diferentes escenarios analizados en el caso de estudio



La Figura 10 representa la solución para el Escenario A, el cual contiene solo valores del período de junio. La planta de desalinización tiene una capacidad de 276.239 m³/d y es alimentada por 18,415.943 m³ de agua de mar, la cual produce 8,287.175 m³ de agua de mar desalinizada. La configuración presenta cuatro tuberías para transporte de agua subterránea hacia los campos de cultivo, estos suman 22,542.237 m³ de requerimientos de agua; mientras para agua de mar se muestran dos tuberías que transportan 8,287.175 m³, que representa el 26% de los requerimientos de agua. La potencia eléctrica requerida para cada unidad de bombeo es de 0.123 y 1.106 kW (para bombeo de agua de mar desalinizada) y, 4.481, 5.045, 12.497 y 8.414 kW (para unidades de bombeo para agua subterránea). Cabe hacer mención que el proceso completo es ejecutado por electricidad externa (131.345kW).

El Escenario A es la mejor solución económica con respecto a los Escenarios B y C, el cual presenta un costo de operación total de US\$257,016.67/año, un costo de capital total de US\$247,616.40/año, y un costo de tubería total de US\$390,000.00/año, obteniendo un CAT de US\$894,633.07/año. Nótese que el costo de tuberías nuevas representa el 44% del CAT. El costo de la planta de desalinización es de US\$307,707.38/año, el cual representa el 34% de CAT, donde 27% corresponde al costo de operación y 73% al costo de capital; y el costo de capital del tanque de almacenamiento para agua de mar desalinizada es de US\$20,717.94/año. En este contexto, el costo de operación para agua subterránea y agua de mar desalinizada representa el 6% y el 13% del CAT respectivamente. Finalmente, el costo por requerimientos de potencia eléctrica externa es de US\$50,077.24/año.

Figura 10
Solución del Escenario A del caso de estudio



4.3 Escenario B

El Escenario B muestra el mínimo consumo de agua subterránea, pero con el más alto costo anual total (ver la Figura 11). Este escenario consume 54.01% del total de agua subterránea disponible para el proceso, considerado el valor más bajo (51,315.241 m³/año). Este último valor es 66.12% más bajo que el problema previo a la aplicación del método propuesto. Aquí, la potencia eléctrica externa satisface los requerimientos de potencia para todas las unidades de bombeo, donde el consumo de electricidad es de 12,505.1 kWh/año, que representa US\$2,876.18/año. Además, el ciclo Rankine de vapor produce la potencia necesaria para cumplir con los requerimientos energéticos de la planta de desalinización en cada período, lo que representa un ahorro de US\$69,271.313/año.

En esta representación de la Figura 11, el ciclo Rankine de vapor produce 600 kW generado por 1,500 kW de carga térmica que es enviada a la caldera; la potencia requerida de bombeo es de 30 kW y la carga térmica en el condensador es de 930 kW. El área requerida del colector solar es de 5,412.738 m². La Figura 12 indica que la principal fuente de energía externa para la solución del Escenario B es la energía solar con 57.2% y el carbón con 28.7%. La potencia producida por el ciclo Rankine de vapor es enviada a la planta de desalinización (364.231 kW), y a ventas (235.769 kW). La potencia de bombeo requerida de las fuentes de agua hacia los campos de cultivo es de 18.896 kW; este último es proporcionado por la fuente de energía externa. Además, la capacidad de la planta de desalinización por ósmosis inversa es de 971.284 m³/d y produce 29,034.976 m³ de agua de mar desalinizada para el período de junio. El Escenario B tiene un costo de operación total de US\$415,704.99/año, un costo de capital total de US\$1,379,706.80/año, y un costo por tuberías nuevas de US\$650,000/año, que suman US\$2,445,411.79/año; sin embargo, los ingresos obtenidos por la venta de electricidad generada por la planta de potencia son de US\$217,620.00/año, generando un CAT neto de \$US2,227,791.79/año. En este sentido, el costo total del ciclo Rankine de vapor (el colector solar es considerado como parte de los

costos de operación), el costo de la planta de desalinización y el de tuberías nuevas representan el 27%, 34% y 27% del CAT, respectivamente. Nótese que el gasto más grande en este escenario corresponde a la planta de desalinización y que este escenario utiliza 100,167.115 m³/año de agua de mar desalinizada, que es 32.35% y 32.30% más alto que los escenarios A y C, respectivamente.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Figura 11
Solución del Escenario B del caso de estudio

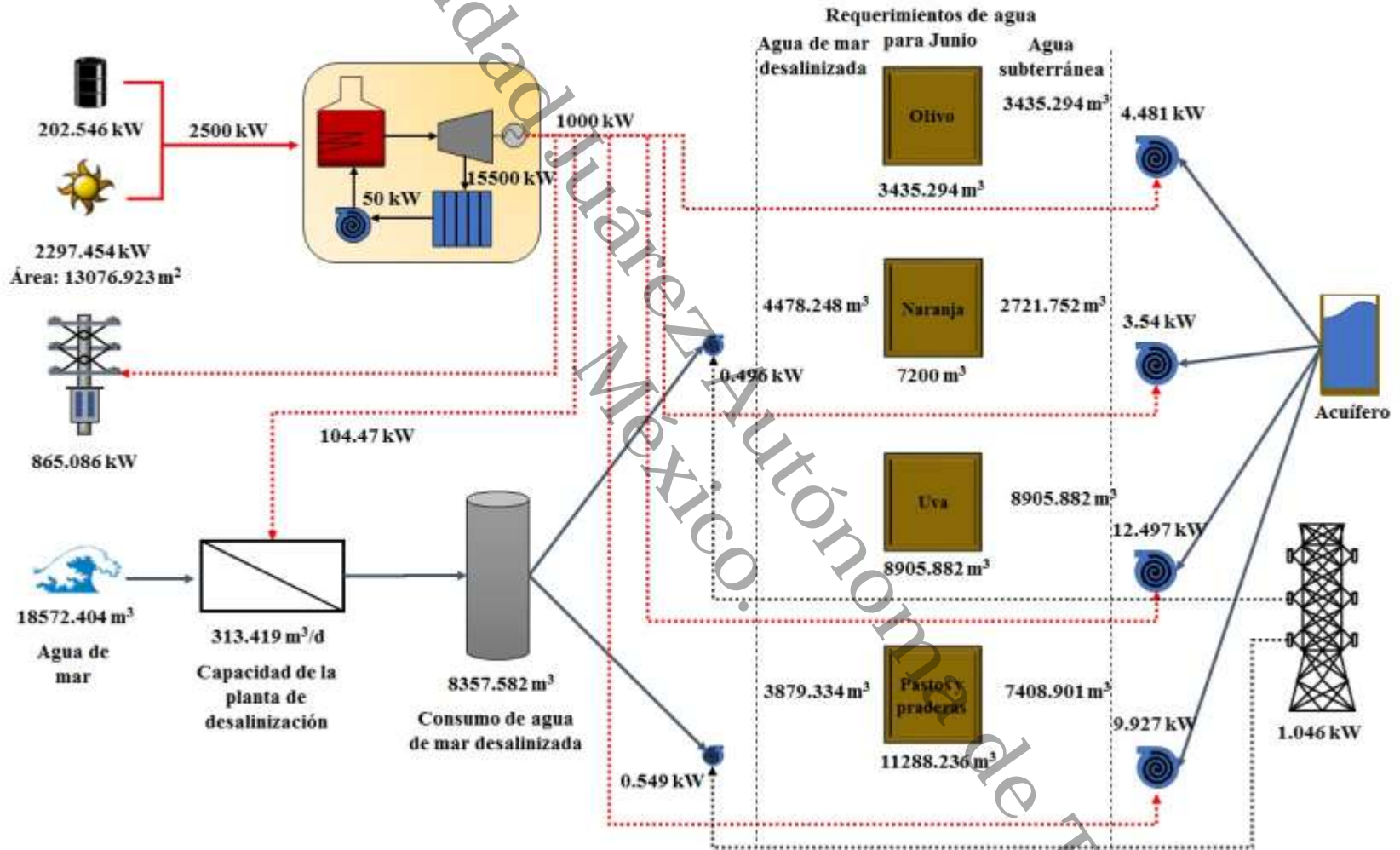
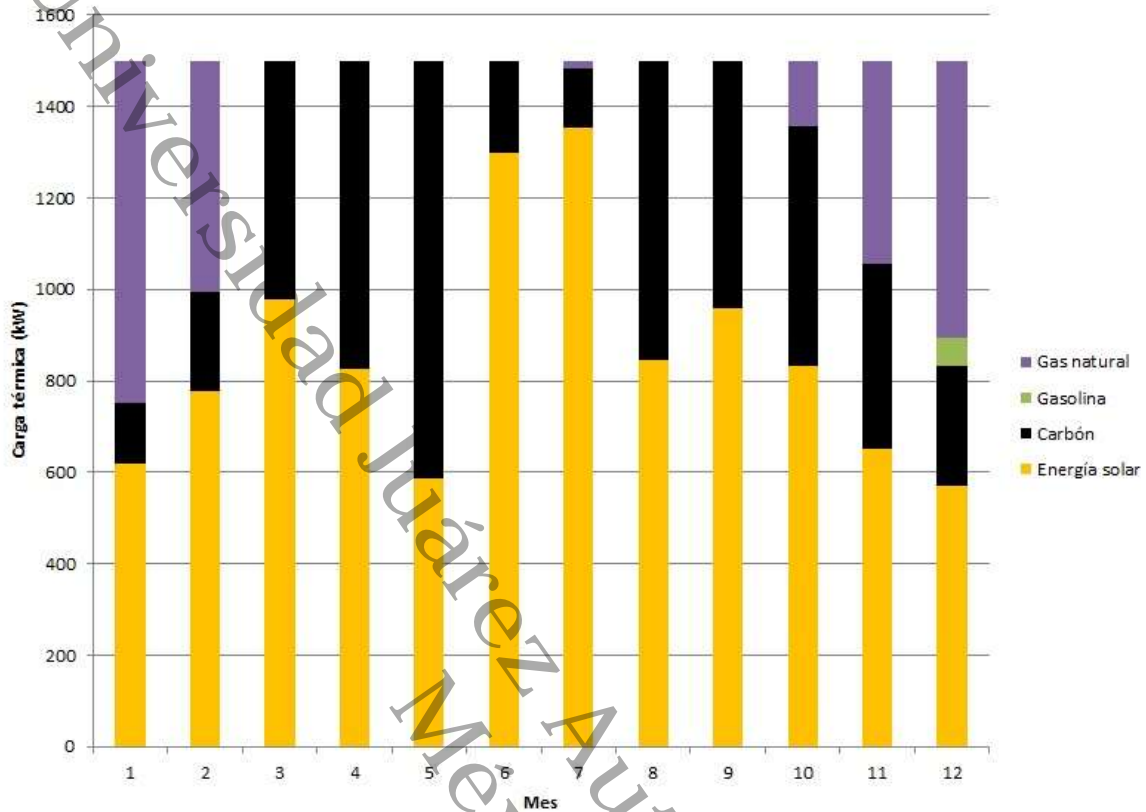


Figura 12

Fuentes de energía externa aplicados en el ciclo Rankine de vapor para el Escenario B



4.2 Escenario C

El Escenario C consume 88.08% del total de agua subterránea disponible en el proceso, 0.05% menos que el Escenario A. El consumo de agua subterránea es de 83,678.618m³/año; este valor es 44.76% menos que el problema previo a la integración de la planta de desalinización. Aquí, la potencia eléctrica externa satisface los requerimientos de potencia para las unidades de bombeo, donde el consumo de electricidad es de 3,344.531 kWh/año. Por otra parte, la potencia eléctrica requerida en la planta de desalinización es suministrada por el ciclo Rankine de vapor, que representa un ahorro de US\$46,785.908/año.

La Figura 13 muestra la solución para el Escenario C. Aquí, la capacidad de la planta de desalinización es de 313.419 m³/d y es alimentada por 18,572.404 m³ de agua de mar. Éste produce 8,357.582 m³ de agua producto. La configuración

contiene cuatro nuevas tuberías que transportan 22,471.829 m³ de agua subterránea, y la potencia de bombeo para agua de mar desalinizada es suministrada por la fuente externa (1.046 kW), mientras que el ciclo Rankine de vapor proporciona la potencia requerida para las unidades de bombeo para agua subterránea (30.445 kW). Además, la Figura 14 presenta que las fuentes principales de energía externa que alimentan la carga térmica al ciclo Rankine de vapor son la energía solar (76.1%) y el carbón (14.9%).

El Escenario C presenta un CAT de US\$1,917,581.88/año, donde 20% corresponde al concepto por las nuevas tuberías, 54% para el ciclo Rankine de vapor (se incluye el costo por el colector solar) y 15% para los costos de la planta de desalinización. No obstante, el ciclo Rankine de vapor genera potencia eléctrica de 1000 kW, que es suficiente para proveer la demanda de energía eléctrica en la planta de desalinización (104.47 kW) y para ventas (865.086 kW); esto último produce US\$404,070.00/año de ingresos y genera un CAT neto de US\$1,513,511.88/año. Cabe hacer mención de que el escenario considera como prioridad satisfacer los requerimientos de electricidad en los procesos de mayor consumo, y después la minimización del costo anual total por medio de los ingresos generados por ventas de electricidad.

Figura 13
Solución del Escenario C del caso de estudio

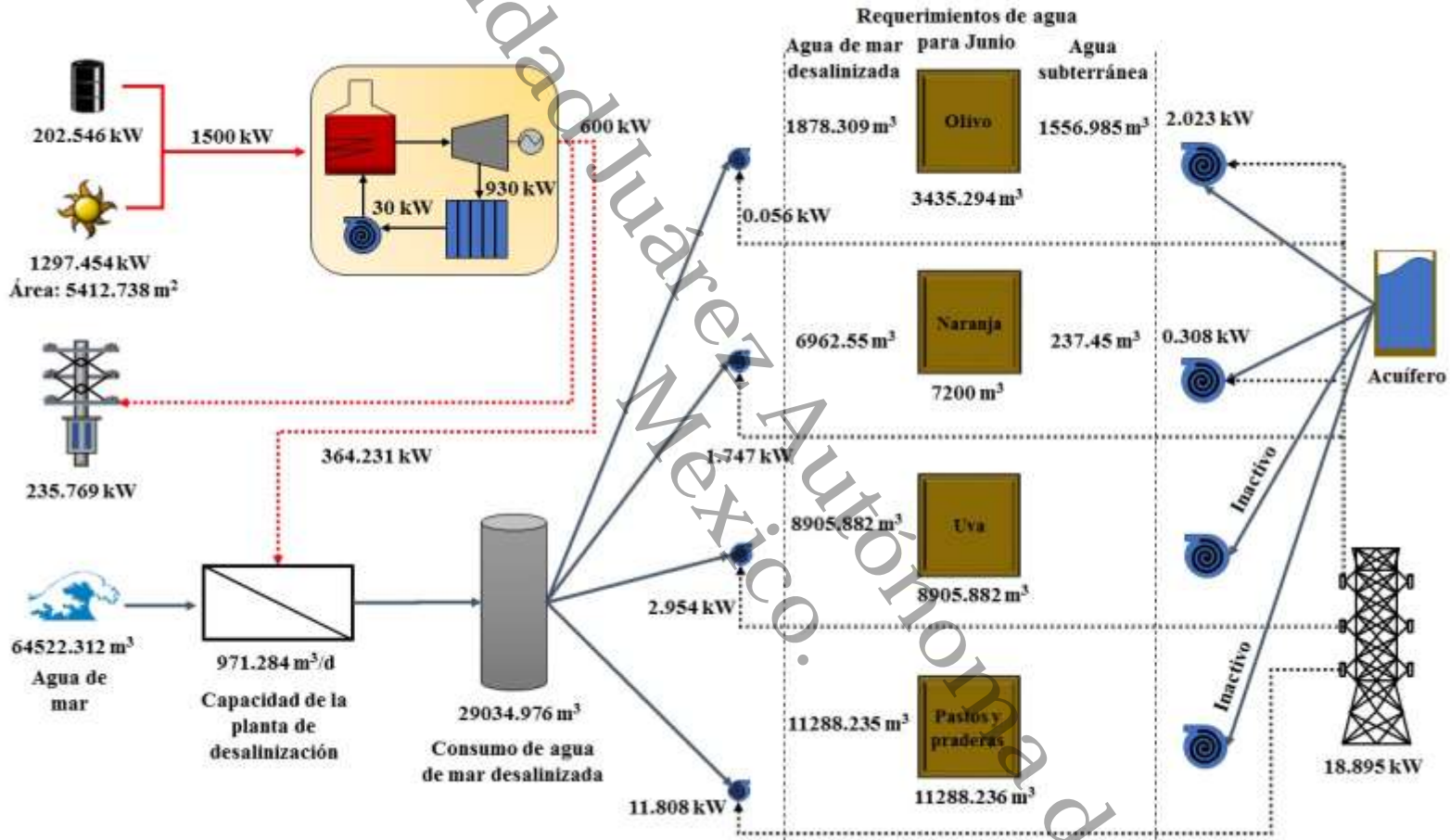
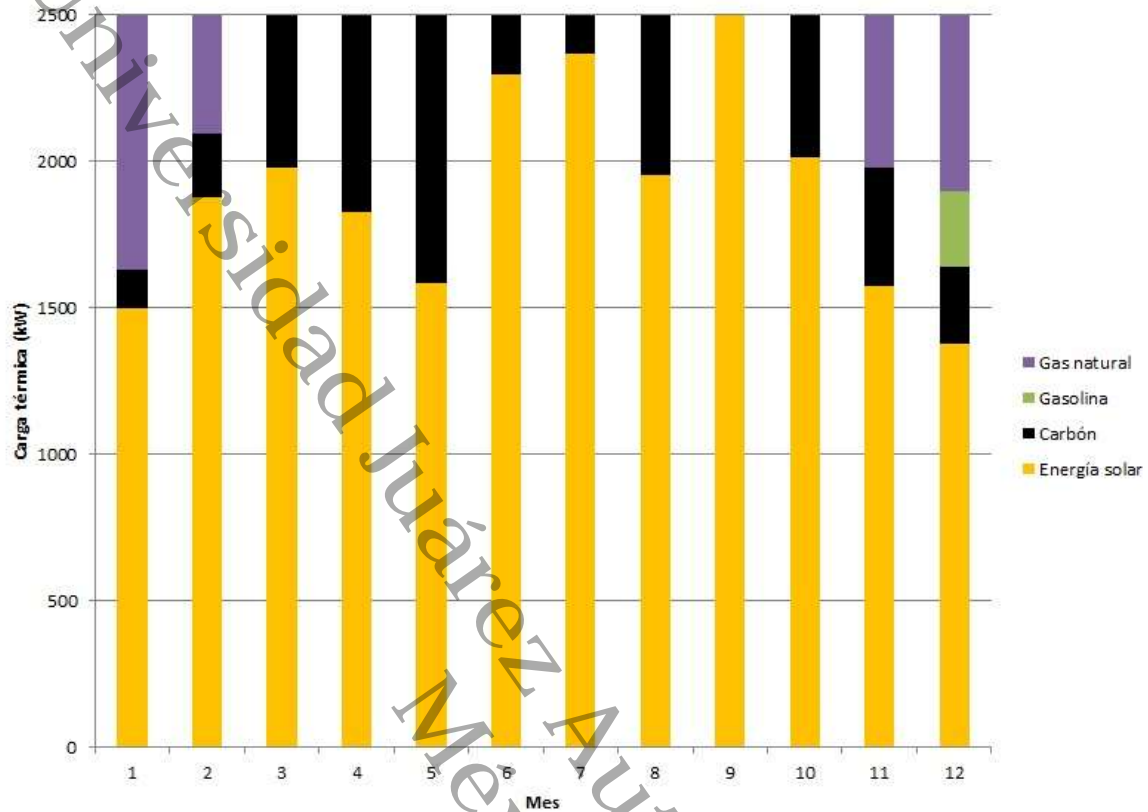


Figura 14

Fuentes de energía externa aplicados en el ciclo Rankine de vapor para el Escenario C



4.4 Comparación entre los diferentes escenarios seleccionados para el caso de estudio

Los datos obtenidos por las soluciones seleccionadas en la Curva de Pareto son mostrados en las Tablas 9, 10 y 11.

La Tabla 9 proporciona datos sobre los requerimientos mensuales de agua para riego sobre cada campo de cultivo en los diferentes escenarios. Esta muestra que la demanda total de agua requerida para irrigación es de 151,482.36 m³/año, donde el 39% corresponde a prados y pastura, 25% para los campos de naranja, 22% para el cultivo de uvas y 13% para los olivos. Así también, el período de junio es el que consume mayor cantidad de agua (20% del volumen total). La Tabla 10 indica la capacidad máxima de cada unidad de bombeo, la capacidad de la planta de desalinización y el consumo anual de agua subterránea para los diferentes escenarios. La Tabla 11 indica los costos asociados para cada escenario.

Tabla 9
Requerimientos mensuales de agua para riego para cada campo de cultivo

	Agua subterránea (m ³)				Agua de mar desalinizada (m ³)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Escenario A								
Enero	-	-	-	-	-	441.176	-	-
Febrero	634.118	-	-	-	-	1,234.118	-	869.412
Marzo	924.706	-	-	-	-	1,948.235	-	2,454.118
Abril	2,443.529	108.428	1,596.471	267.927	-	3,329.219	-	4,957.956
Mayo	4,601.176	2,060.984	5,348.235	3,166.191	-	3,440.193	-	5,123.221
Junio	3,435.294	3,870.781	8,905.882	6,330.280	-	3,329.219	-	4,957.956
Julio	1,141.176	2,012.748	7,405.882	5,012.073	-	3,440.193	-	5,123.221
Agosto	272.941	568.042	4,867.059	2,602.662	-	3,440.193	-	5,123.221
Septiembre	3,878.824	1,379.016	4,202.353	2,620.868	-	3,329.219	-	4,957.956
Octubre	2,247.059	-	1,300.000	-	-	3,129.412	-	4,652.941
Noviembre	518.824	-	-	-	-	1,271.765	-	1,136.471
Diciembre	-	-	-	-	-	69.412	-	-
Escenario B								
Enero	-	255.852	-	-	-	185.325	-	-
Febrero	634.118	248.993	-	869.412	-	985.125	-	-
Marzo	924.706	248.646	-	1,231.401	-	1,699.589	-	1,222.717
Abril	1,556.985	235.567	1,596.471	2,759.595	886.544	3,202.080	-	2,466.287
Mayo	2,286.357	247.527	5,348.235	202.300	2,314.820	5,253.650	-	8,087.112
Junio	1,556.985	237.450	-	-	1,878.309	6,962.550	8,905.882	11,288.235
Julio	1,141.176	247.585	7,301.278	-	-	5,205.356	104.604	10,135.294
Agosto	272.941	341.264	4,867.059	-	-	3,666.971	-	7,725.882
Septiembre	1,556.985	241.488	4,185.488	3,075.690	2,321.838	4,466.747	16.865	4,503.133
Octubre	1,469.064	244.690	1,300.000	2,662.181	777.994	2,884.721	-	1,990.760
Noviembre	518.824	243.045	-	1,136.471	-	1,028.720	-	-
Diciembre	-	69.412	-	-	-	-	-	-
Escenario C								
Enero	-	-	-	-	-	441.176	-	-
Febrero	634.118	-	-	-	-	1,234.118	-	869.412
Marzo	924.706	-	-	-	-	1,948.235	-	2,454.118
Abril	2,443.529	-	1,596.471	3,496.958	-	3,437.647	-	1,728.925
Mayo	4,601.176	2,812.477	5,348.235	2,091.188	-	2,688.699	-	6,198.224
Junio	3,435.294	2,721.752	8,905.882	7,408.901	-	4,478.248	-	3,879.334
Julio	1,141.176	2,812.477	7,405.882	3,059.765	-	2,640.464	-	7,075.529
Agosto	272.941	-	4,867.059	2,650.591	-	4,008.235	-	5,075.291
Septiembre	3,878.824	1,653.293	4,202.353	1,247.687	-	3,054.943	-	6,331.137
Octubre	2,247.059	-	1,300.000	-	-	3,129.412	-	4,652.941
Noviembre	518.824	-	-	-	-	1,271.765	-	1,136.471
Diciembre	-	-	-	-	-	69.412	-	-

Tabla 10*Capacidad máxima de las plantas de desalinización y unidades de bombeo*

	Capacidad de las bombas (kW)								Capacidad de la planta de desalinización (m ³ /d)	Consumo anual de agua subterránea (m ³ /año)
	Para agua subterránea				Para agua de mar desalinizada					
	1	2	3	4	1	2	3	4		
Situación actual	5.827	9.47	12.497	15.687						151,482.356
Escenario A	5.827	5.045	12.497	8.414		0.213		1.106	276.239	83,723.529
Escenario B	2.878	0.429	9.655	4.017	0.102	1.747	2.954	11.808	971.284	51,315.241
Escenario C	6.015	3.54	12.497	9.927		0.496		2.777	313.419	83,678.618

Tabla 11*Costos obtenidos para los diferentes escenarios del caso de estudio*

Concepto (US\$/año)	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Ingresos	-	217,620.00	404,070.00
Agua subterránea	52,745.82	32,328.60	52,809.71
Agua de mar desalinizada	116,550.00	172,680.00	116,620.00
Tuberías que transportan agua subterránea	70,000.00	70,000.00	70,000.00
Tuberías que transportan agua desalinizada	320,000.00	580,000.00	320,000.00
Costo de capital para bombas para agua subterránea	3,445.49	1,840.52	3,466.76
Costo de capital para bombas para agua desalinizada	142.97	1,800.73	354.82
Bombeo de agua subterránea	3,066.28	1,867.31	463.60
Bombeo de agua desalinizada	257.19	1,008.87	305.60
Costo de capital para el ciclo Rankine de vapor		461,760.00	635,410.00
Costo de capital del colector solar		146,439.34	335,940.00
Combustibles fósiles		61,866.08	67,665.12
Costo de capital del proceso de desalinización	223,310.00	785,200.00	253,370.00
Proceso de osmosis inversa	84,397.38	55,774.06	37,669.83
Tanque de almacenamiento para el proceso de desalinización	20,717.94	72,846.28	23,506.44
Costo anual total	894,633.07	2,227,791.79	1,513,511.88

El Escenario A presenta un consumo de electricidad externa, 8.98, 17.41 y 65.09 veces más grande que el problema previo a la integración energética y másica, del Escenario B y del Escenario C, respectivamente. Esto se debe a varias razones, primero, al alto consumo de energía de la planta de desalinización por osmosis inversa y que es alimentado sólo por energía externa. Segundo, el escenario solo consume agua subterránea, por lo que no hay alto consumo de

potencia eléctrica (solo uso de unidades de bombeo) y, por otro lado, para los otros escenarios, hay una fuente alternativa para suministrar los requerimientos energéticos para el proceso de ósmosis inversa, el ciclo Rankine de vapor.

Los Escenarios B y C consumen 48.41% y 86.20% menos de electricidad que el problema abordado, respectivamente. Cabe hacer mención de que los escenarios B y C presentan la planta de desalinización como fuente alterna de agua para irrigación, mientras que el problema abordado solo usa agua de los pozos. El Escenario C consume 73.25% menos de electricidad externa que el Escenario B. Note que el Escenario B usa cuatro tuberías nuevas para transportar agua de mar desalinizada, mientras que el Escenario C no hay existencia de tuberías nuevas que transporten agua de mar desalinizada hacia los campos 1 y 3 (ver la Figuras 11 y la Figura 13). El consumo de agua subterránea en los escenarios A y C es ligeramente diferente (el Escenario A es 0.053% más grande que el Escenario C). Por otra parte, el Escenario B consume 38.70% y 38.67% menos consumo de agua subterránea que en los escenarios C y A, respectivamente.

La Figura 15 muestra que los escenarios A y C consumen grandes cantidades de agua subterránea para los meses con altas demandas de agua (períodos de mayo hasta septiembre); mientras que, en los mismos períodos, el Escenario B usa grandes cantidades de agua de mar desalinizada con respecto a los escenarios A y C (ver la Figura 16). Este comportamiento se debe a que en el periodo mayo-septiembre es donde hay mayor requerimiento de agua para riego ocasionado por el fenómeno de la canícula, donde se carece de precipitaciones, una fuente de agua natural para los cultivos.

Note en la Tabla 9 que los campos de cultivos 2 y 4 (olivo y, prados y pastura) presentan el consumo de agua para riego más alto en los (38 y 59% de la demanda total). Además, se debe hacer mención, que los escenarios A, B y C utilizan tuberías nuevas que transportan agua de mar desalinizada hacia los campos 1 y 3 (requerimientos de agua para riego por 38,402.353 y 59,356.474 m³/año, respectivamente) debido a las limitaciones en la disponibilidad de agua subterránea de los acuíferos (ver la Tabla 10).

Como se hizo mención, el enfoque propuesto considera la integración óptima de la energía solar y de los combustibles fósiles para la operación del ciclo Rankine de vapor; en este sentido, la Figura 12 y la Figura 14 presentan una cierta tendencia, la prioridad en el uso de la energía solar, en segunda instancia el carbón y el gas natural, y al final, el uso de la gasolina. Esta tendencia se debe principalmente a los costos unitarios en los combustibles fósiles y la disponibilidad que tienen para el caso de estudio, así como la disponibilidad en la radiación solar para los períodos. Por tanto, para determinar las fuentes de las cargas térmicas que se utilizarán en el ciclo Rankine de vapor, el modelo utiliza principalmente el costo unitario del carbón (el valor más bajo); y luego la radiación solar necesaria para el período de junio (el valor más alto). Nótese que el costo unitario del colector solar es más bajo que el costo unitario de la gasolina y el gas natural; finalmente, se usa la carga térmica proporcionada por el gas natural y la gasolina.

Los costos de tuberías del Escenario B son 60% más alto que escenarios A y C. El Escenario B presenta un costo de ciclo Rankine de vapor 35.5% más bajo que el Escenario C. Los escenarios A y C muestran costos de plantas de desalinización 63.4 y 65.3% más bajos que el escenario B, respectivamente. El Escenario B obtiene ingresos por ventas de electricidad por US\$217,620.00/año y también presenta ahorros por US\$69,271.313/año, los cuales suman US\$286,891.31/año. Esto último es 36% más bajo que el Escenario C por los mismos conceptos (US\$450,855.91/año). Finalmente, el costo anual total neto de los escenarios A y C son 59% y 32% más bajos que el Escenario B, respectivamente.

De este modo, el Escenario A muestra el CAT más bajo, el Escenario B presenta el consumo de agua subterránea más bajo, y el Escenario C proporciona los ahorros e ingresos más altos por producción de electricidad. Por lo tanto, el tomador de decisiones puede elegir cualquiera de estas soluciones, y la óptima depende de los requisitos específicos establecidos por el proyecto.

Figura 15

Consumo de agua subterránea para los diferentes escenarios analizados en el caso de estudio

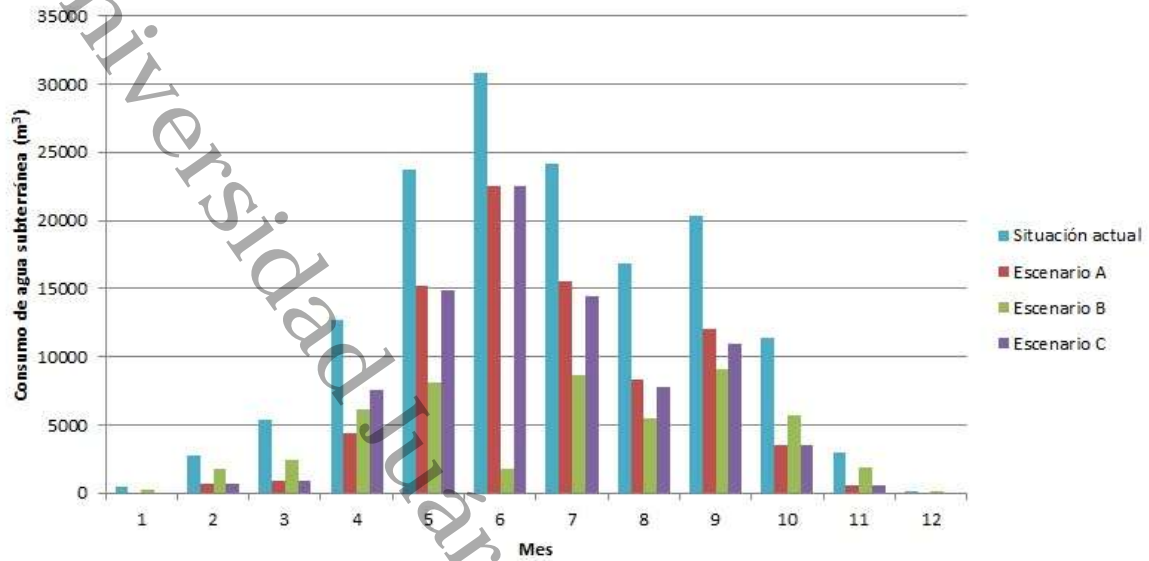
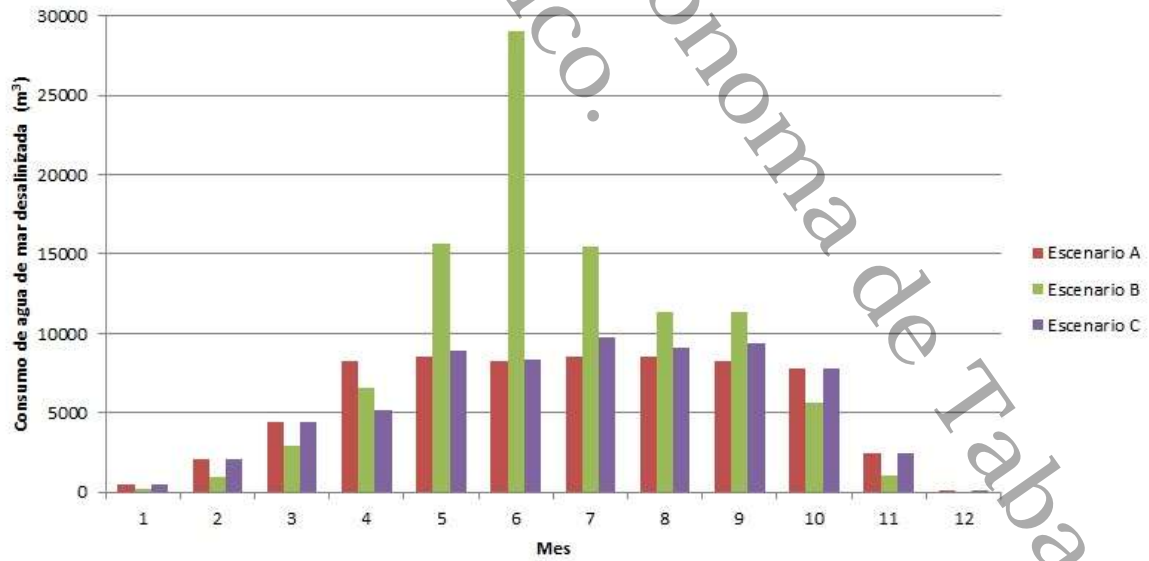


Figura 16

Consumo de agua de mar desalinizada para los diferentes escenarios analizados en el caso de estudio



Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Un modelo de optimización multiperíodo multiobjetivo ha sido formulado para diseñar una red óptima para la distribución de agua para la actividad agrícola, donde una planta de desalinización por ósmosis inversa ha sido incorporada para reducir el consumo de agua subterránea de los acuíferos. El modelo propuesto busca satisfacer la potencia eléctrica y los requerimientos de agua para riego, y simultáneamente, considera la minimización del consumo de agua subterránea y del costo anual total. Cabe hacer mención de que el modelo considera como prioridad satisfacer los requerimientos de electricidad en los procesos de mayor consumo, y después la minimización del costo anual total por medio de los ingresos generados por ventas de electricidad.

Los resultados obtenidos permiten aceptar la hipótesis planteada, ya que la integración de sistemas de desalinización por ósmosis inversa junto con el ciclo Rankine de vapor y el uso de fuentes de energía renovable demostró ser una estrategia eficaz para reducir el consumo de agua fresca y optimizar el costo anual total (CAT), garantizando el abasto de agua para la actividad agrícola.

En particular:

- a. El Escenario B alcanzó la máxima reducción en el consumo de agua subterránea (66.12% respecto a la situación inicial), validando que el uso de agua de mar desalinizada es una alternativa viable para disminuir el consumo de agua de los acuíferos.
- b. El Escenario C logró el mejor balance entre eficiencia energética y viabilidad económica, al integrar la generación de energía mediante el ciclo Rankine de vapor, disminuir el consumo de electricidad externa en 73.25% respecto al Escenario B y generar ingresos por venta de electricidad que redujeron el CAT neto a US\$1,513,511.88/año.

c. Aunque el Escenario A presentó el menor CAT absoluto, dependió principalmente del agua subterránea, lo que compromete la sustentabilidad hídrica a largo plazo.

Por lo tanto, la integración propuesta garantiza la demanda de agua fresca de manera más sustentable, a la vez que reduce los costos operativos mediante la diversificación de fuentes de energía y el aprovechamiento de recursos renovables, cumpliendo con los objetivos establecidos en la hipótesis.

Este trabajo demuestra que la combinación de tecnologías de desalinización, ciclos de potencia y energías renovables puede ser replicada en otras regiones costeras con problemas de escasez hídrica, contribuyendo a la seguridad alimentaria, al uso eficiente de los recursos hídricos y a la transición energética hacia modelos más sostenibles. Se recomienda como trabajo futuro evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida completo del sistema y analizar su escalabilidad para diferentes tipos de cultivos y demandas estacionales.

Finalmente, el enfoque de optimización propuesto es un problema de programación mixto entero no lineal que fue resuelto por el método de restricción. La formulación de optimización propuesta es general y puede ser resuelta para otros casos de estudio.

Recomendaciones

- a. Analizar la viabilidad de integrar ciclos de potencia no convencionales, como el Ciclo Rankine Orgánico (ORC) y sistemas de bomba de calor, así como explorar otras fuentes de energía (fotovoltaica, eólica o híbrida) para el suministro de electricidad a los sistemas de bombeo. Esta diversificación podría incrementar la generación eléctrica a menor costo y reducir la dependencia de combustibles fósiles.
- b. Realizar un análisis agro-hidrológico para seleccionar cultivos perennes de menor consumo hídrico por hectárea, manteniendo la rentabilidad agrícola y priorizando la eficiencia en el uso del agua. Esto permitiría reducir la presión sobre el acuífero y maximizar el aprovechamiento del agua desalinizada.

- c. Cuantificar el volumen de salmuera producida por cada metro cúbico de agua desalinizada y diseñar una estrategia integral de manejo, que incluya opciones de dilución, valorización de sales o descarga controlada, minimizando así el impacto ambiental en el ecosistema marino.
- d. Determinar la huella de carbono asociada al consumo de combustibles fósiles y a la operación del sistema. Posteriormente, implementar medidas de mitigación, como la sustitución parcial de combustibles fósiles por energías renovables o el uso de “*carbon tax*”, contribuyendo a los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Referencias

- Ali, A., Ashu Tufa, R., Macedonio, F., Curcio, E., Drioli, E., 2018. Membrane technology in renewable energy driven desalination. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 81, 1-21.
- Aparicio, J., Tenza-Abril A.J., Borg, M., Galea, J., Candela, L., 2019. Agricultural irrigation of vine crops from desalinated and brackish groundwater under an economic perspective. A case study in Siggiewi, Malta. *Sci. Total Environ.* 650, 734-740.
- Arredondo-Ramírez, K., Rubio-Castro, E., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M., 2015. Optimal design of agricultural water systems with multiperiod collection, storage, and distribution. *Agric. Water Manag.* 152, 161-172.
- Baipayee, A., Luo, T., Muto, A., Chen, G., 2011. Very low temperature membrane-free desalination by directional solvent extraction. *Energy Environ Sci.* 4, 1672-1680.
- Barron, O., Ali R., Hodgson, G., Smith, D., Qureshi, E., McFarlane, D., Campos, E., Zarzo, D., 2015. Feasibility assessment of desalination application in Australian traditional agriculture. *Desalination.* 364, 33-45.
- Bataineh, K.M., 2016. Optimization analysis of solar thermal water pump. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 55, 603-613.
- Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A.; Raman, R. GAMS User's Guide. The Scientific Press, Washington, USA, 2014.
- Chen, S., Chen, B., 2016. Urban energy-water nexus: A network perspective. *Appl. Energy.* 184, 905-914.
- Ching-Fang, S.D., 2018. A practical assessment of aquifer discharge for regional groundwater demand by characterizing leaky confined aquifer overlain on a Mesozoic granitic gneiss basement. *J. Hydrol.* 559, 995-1001.
- Cohen, Y., Semiat, R., Rahardianto, A., 2017. A perspective on reverse osmosis water desalination: Quest for sustainability. *AIChE J.* 63(6), 1771-1784.

- CONAGUA. Aguas subterráneas. 2015. Disponible en: <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/LibreAlumbramiento.html> (Acceso marzo 2019)
- CONAGUA. *Atlas del agua en México* (Primera ed., Vol. 1). Gobierno de la República. México, 2016a. Disponible en: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1> (Acceso marzo 2019)
- CONAGUA. Disponibilidad de acuíferos en México. 2016b. Disponible en <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/tabasco-74832> (Acceso abril 2019)
- Drioli, E., Curcio, E., 2010. Membrane gas separation progresses for process intensification strategy in the petrochemical industry. *Pet Chem.* 50(4), 271-282.
- Duke, M.C., Casañas, A., 2015. Forward for the Special Issue: Desalination for agriculture. *Desalination.* 364, 1.
- Ehsan Shakib, S., Amidpour, M., Aghanajafi, C., 2012. Simulation and optimization of multi effect desalination coupled to a gas turbine plant with HRSG consideration. *Desalination.* 285, 366-376.
- El-Halwagi, M.M., 2006. *Process integration*. 1st ed. New York: Academic Press.
- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., Yuan, L., 2009. A review of renewable energy technologies integrated with desalination system. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13, 2245-2262.
- Fthenakis, V., Atia, A. A., Morin, O., Bkayrat, R., Sihna, P., 2014. New prospects for PV powered water desalination plants case studies in Saudi Arabia. 29 th EU PVSEC, Amsterdam, The Netherlands.
- García-Latorre, F. J., Pérez Báez, S., Gómez Gotor, A., 2015. Energy performance of a reverse osmosis desalination plant operating with variable pressure and flow. *Desalination.* 366, 146-153.
- Gjorgiev, B., Sansavini, G., 2017. Water-energy nexus: Impact on electrical energy conversion and mitigation by smart water resources management. *Energ. Convers. Manage.* 148, 1114-1126.

- Glasnović, Z., Rogošić, M., Margeta, J., 2011. A model for optimal sizing thermal hydroelectric power plant. *J. Sol. Energy*. 85, 794-807.
- Gnanaswar Gude, V., Nirmalakhandan, N., Shuguang, D., 2010. Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 14, 2641-2654.
- González, D., Amigo, J., Suárez, F., 2017. Membrane distillation: Perspectives for sustainable and improved desalination. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 80, 238-259.
- González-Bravo, R., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J.M., El-Halwagi, M., 2015. Involving integrated seawater desalination-power plants in the optimal design of water distribution networks. *Resour. Conserv. Recy.* 104, 181-193.
- González-Bravo, R., Nápoles-Rivera, F., Ponce-Ortega, J.M., 2016. Chapter: Optimal design of macroscopic water and energy networks. *Alternative Energy Sources and Technologies*, Springer International Publishing Switzerland.
- Hamawand, I., Lewis, L., Ghaffour, N., Bundschuh, J., 2017. Desalination of salty water using vacuum spray dryer driven by solar energy. *Desalination*. 404, 182-191.
- Hipólito-Valencia, B.J., Lira-Barragán, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M., 2014a. Multiobjective design of interplant trigeneration systems. *AIChE J.* 60, 213-236.
- Hipólito Valencia, B., Rubio Castro, E., Ponce Ortega, J., Serna Gonzalez, M., Nápoles Rivera, F., El Halwagi, M., 2014b. Optimal design of inter-plant waste energy integration. *Appl. Therm. Eng.* 62, 633-652.
- Howell, T., 2003. *Irrigation Efficiency*. United States Department of Agriculture (USDA), Bushland, Texas, U.S.A.
- Huang, Y., Li, Y.P., Chen, X., Ma, Y.G., 2012. Optimization of the irrigation water resources for agricultural sustainability in Tarim River Basin, China. *Agric. Water Manag.* 107, 74-85.

- INEGI. Aportación al producto interno bruto (PIB) nacional. 2018. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/economia/pib.aspx?tema=me&e=27> (Acceso abril 2019)
- INEGI. PIB y cuentas nacionales. 2019. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/pibe/default.aspx> (Acceso abril 2019)
- Irmak, S., Odhiambo, L., Kranz, W., Eisenhauer, D., 2011. Irrigation efficiency and uniformity, and crop water use efficiency. University of Nebraska-Lincoln Extension, Division of the Institute of Agriculture and Natural Resources at the University of Nebraska–Lincoln cooperating with the Counties and the United States Department of Agriculture.
- Kalogirou, S., 2005. Seawater desalination using renewable energy sources. Prog. Energy Combust. Sci. 31, 242-281.
- Khoshrou, I., Jafari Nasr, M. R., Bakhtari, K., 2017. New opportunities in mass and energy consumption of the Multi-Stage flash distillation type of brackish water desalination process. Sol. Energy. 153, 115-125.
- Kim, J., Park, K., Ryook, Y.D., Hong, S., 2019. A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. Appl. Energy. 254, 113652.
- Lahav, O., Kochva, M., Tarchitzky, J., 2010. Potential drawbacks associated with agricultural irrigation with treated wastewaters from desalinated water origin and possible remedies. Water Sci. Technol. 61, 2451-2460.
- Lira-Barragán, L.F., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M., 2013. Synthesis of integrated absorption refrigeration systems involving economic and environmental objectives and quantifying social benefits. Appl. Therm. Eng. 52, 402-419.
- Martínez-Alvarez, V., Martín-Gorriz, B., Soto-García, M., 2016. Seawater desalination for crop irrigation –A review of current experiences and revealed key issues. Desalination. 381, 58-70.

- Mata-Torres, C., Escobar, R.A., Cardemil, J.M., Simsek, Y., Matute, J.A., 2017. Solar polygeneration for electricity production and desalination: Case studies in Venezuela and northern Chile. *Renew. Energy*. 101, 387-398.
- Miller, S.; Shemer, H.; & Semiat, R. Energy and environmental issues in desalination. *Desalination*, **2015**, 366, 2-8.
- Moguel Ordoñez, E.; Diaz López, H.; Collado Torres, R.; Zequeira Larios, C.; Macías Valadez, M. E.; Pacheco Figueroa. *Programa de ordenamiento ecológico de la región Chontalpa Parte I: Caracterización y diagnóstico*. Villahermosa, Tabasco: SEMARNAT. 2014.
- Moredia-Valek A., Sušnik, J., Grafakos, S., 2017. Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions. *Sci. Total Environ*. 590-591, 258-268.
- Moreno, M.A., Córcoles, J.I., Moraleta, D.A., Martínez, A., Tarjuelo, J.M., 2010. Optimization of underground water pumping. *J. Irrig. Drain. Eng.* 136, 6.
- Morote, A.F., Rico, A.M., Moltó, E., 2017. Critical review of desalination in Spain: a resource for the future? *Geographical Research*. 55 (4), 412-423.
- Mott, R. *Mecánica de Fluidos*. 2006 (6ta ed.). México: Pearson Educación.
- Narváez-Rincón, P.C., Galeano-Paramero, H., 2002. Ecuación de costos y función objetivo para la optimización del diseño de redes de flujo de líquidos a presión. *Ingeniería e Investigación Journal*, Universidad Nacional de Colombia. 49, 23-29.
- Novak, Z., Kravanja, Z., Grossmann, I. E., 1996. Simultaneous synthesis of distillation sequences in overall process schemes using an improved MINLP approach. *Computers Chem. Eng.* 20(12), 1425-1440.
- Padilla Alarcón, D., García Rodríguez, L., Blanco Gálvez, J., 2010. Experimental assessment of connection of an absorption heat pump to a multi-effect distillation unit. *Desalination*. 250, 500-505.
- Panagopoulos, A., Haralambous, K.J., Loizidou M., 2019. Desalination brine disposal methods and treatment technologies –A review. *Sci. Total Environ*. 693, 133545.

- Pérez-Uresti, S.I., Ponce-Ortega, J.M., Jiménez-Gutiérrez, A., 2019. A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. *Comput. Chem. Eng.* 121, 158-173.
- Pujades, E., Orban, P., Bodeux, S., Archambeau, P., Ercicum, S., Dassargues, A., 2017. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency? *Appl. Energy.* 190, 135-146.
- Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J.M., Cervantes-Gaxiola, M.E., Hernández-Calderón, O.M., Ortiz-del-Castillo, J.R., Milán-Carrillo, J., 2016. Optimal design of integrated agricultural water networks. *Comput. Chem. Eng.* 84, 63-82.
- Saccon, P., 2018. Water for agriculture, irrigation management. *Appl. Soil Ecol.* 123, 793-796.
- Saif, Y., Almansoori, A., 2014. Design and operation of water desalination supply chain using mathematical modelling approach. *Desalination.* 351, 184-201.
- Salimi, M.; Amidpour, M. Investigating the integration of desalination units into cogeneration systems utilizing R-curve tool. *Desalination*, **2017**, 419, 49-59.
- Seelen, L.M.S., Flaim, G., Jennings, E., De-Senerpont, D.L.N., 2019. Saving water for the future: Public awareness of water usage and water quality. *J. Environ. Manage.* 242, 246-257.
- Servicio de información alimentaria y pesquera (SIAP). Estadística de producción agrícola (Histórico). 2018. Disponible en <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (Acceso abril 2019)
- Smith, M., 1992. CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Chapter 5, 21-22.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales climatológicas por Estado. 2015. Disponible en https://smn.conagua.gob.mx/es/?option=com_content&view=article%20&id=42&Itemid=75 (Acceso mayo 2019)

- Shatat, M. H., Riffat, S. B., 2010. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalin. Water Treat.* 16, 354-380.
- Shuja Azhar, M., Rizvi, G., Dincer, I., 2017. Integration of renewable energy based multigeneration system with desalination. *Desalination.* 404, 72-78.
- Subramani, A., Jacangelo, J.G., 2015. Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review. *Water Res.* 75, 164-187.
- Sun, J., Li, Y.P., Suo, C., Liu, Y.R., 2019. Impacts of irrigation efficiency on agricultural water-land nexus system management under multiple uncertainties –A case study in Amu Darya River basin, Central Asia. *Agric. Water Manag.* 216, 76-88.
- Swennenhuis, J., 2006. CROPWAT 8.0. Developed by the Land and Water Development Division of FAO, Disponible en: www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html (Acceso junio 2019)
- Vakilifard, N., Anda, M., Bahri, P.A., Ho, G., 2018. The role of water-energy nexus in optimising water supply systems –Review of techniques and approaches. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 82, 1424-1432.
- Wakeel, M., Chen, B., Hayat, T., Alsaedi, A., Ahmad, B., 2016. Energy consumption for water use cycles in different countries: a review. *Appl. Energy*, 178, 868-885.
- Wang, L., Chen, J.P., Hung, Y.T., Shammass, N., 2011. Membrane and desalination technologies. Humana Press, Springer Science, New York.
- Wang, Y., Lior, N., 2006. Performance analysis of combined humidified gas turbine power generation and multi-effect thermal vapor compression desalination systems Part 1: The desalination unit and its combination with a steam-injected gas turbine power system. *Desalination.* 196, 84-104.
- Whittholz, M.K., O'Neil, B.K., Colby, C.B., Lewis, D., 2008. Estimating cost of desalination plants using a cost database. *Desalination.* 10-20.
- World Bank, 2017. Disponible en: <https://blogs.worldbank.org/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture> (Acceso marzo 2019)

Zhou, J.; Chang, V. W.; Fane, A. G. Life Cycle Assessment for desalination: A review on methodology feasibility and reliability. *Water Res.*, **2014**, *61*, 210-223.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

Anexos

Anexo 1-Nomenclatura del modelo

Subíndices

f	Combustibles fósiles
k	Campos de cultivo
t	Períodos

Superíndices

DW	Agua de mar desalinizada
FW	Agua subterránea
RO	Proceso de osmosis inversa
$SOLAR$	Colector solar
SRC	Ciclo Rankine de vapor

Parámetros

A_k^{DW}	Área de corte transversal de la tubería para transporte de agua de mar hacia los campos de cultivo k , m^2
A_k^{FW}	Área de corte transversal de la tubería para transporte de agua subterránea hacia los campos de cultivo k , m^2
A_k^{HW}	Área de los campos de cultivo k , (ha)
B	Porcentaje de los costos de instalación y de los accesorios para nuevas tuberías.
C_H	Coefficiente de Hanzel-Williams
CL_k	Costo unitario para nuevas tuberías, (US\$/m)
C^{DW}	Costo de operación para unidades de bombeo para agua de mar desalinizada, (US\$/ m^3)
C^{FW}	Costo de operación para unidades de bombeo para agua subterránea, (US\$/ m^3)
C^{RO}	Costo de operación para la planta de desalinización, (US\$/ m^3)
C^{SOLAR}	Costo de operación del colector solar, (US\$/kWh)

C^{FOSSIL}	Costo de operación para los combustibles fósiles asociados al ciclo Rankine de vapor, (US\$/kJ)
D_k	Diámetro de la tubería, (m)
D^{RO}	Factor de diseño del proceso de desalinización, (kWh/m ³)
F	Costo fijo para cada unida de proceso, (US\$)
$F^{PUMP-DW}$	Costo fijo para las unidades de bombeo para transporte de agua de mar desalinizada, (US\$)
$F^{PUMP-FW}$	Costo fijo para las unidades de bombeo para transporte de agua subterránea, (US\$)
F^{RO}	Costo fijo para la planta de desalinización, (US\$)
F^{SOLAR}	Costo fijo para el colector solar, (US\$)
F^{ST}	Costo fijo para el tanque de almacenamiento asociado a la planta de desalinización, (US\$)
$FOSSIL_{t,f}^{AVAIL}$	Disponibilidad máxima para los combustibles fósiles f para cada período t , (kg/mes)
FW_k^{AVAIL}	Disponibilidad máxima de agua subterránea para cada campo de cultivo k , (m ³ /año)
$HEATING_f^{POWER}$	Potencial térmico para los combustibles fósiles f , (kJ/kg)
γ	Peso específico, (N/m ³)
H	Factor anualizado para las nuevas tuberías que incluye el costo de mantenimiento.
$HW_{t,k}$	Demandas de agua en cada campo de cultivo k sobre cada período t , (m ³ /mes)
H_Y	Tiempo de operación diaria de los procesos participantes, (h/d)
L_k	Longitud de tubería de las fuentes hídricas hacia los campos de cultivo, (m)
K_F	Factor usado para anualizar la inversión, (1/año)
$\eta^{PUMP-DW}$	Factor de eficiencia para las unidades de bombeo para agua desalinizada.
$\eta^{PUMP-FW}$	Factor de eficiencia para agua subterránea.

$\eta^{PUMP-SRC}$	Factor de diseño para la unidad de bombeo del ciclo de potencia.
η^{RO}	Factor de eficiencia para el proceso de desalinización.
η^{SRC}	Factor de eficiencia del ciclo Rankine de vapor.
η_k^{WR}	Factor de eficiencia del sistema de riego.
P^{ELEC}	Precio de venta para la electricidad generada, (US\$/kW)
q_t^{USEFUL}	Radiación solar específica del lugar establecido para el caso de estudio por cada período t , (kJ/m ² mes)
θ_t	Factor de conversión, d/mes
RW_t	Precipitación de agua de lluvia por cada período t , (m/mes)
V	Costo variable para cada unidad incorporada.
$V^{PUMP-DW}$	Costo variable para unidades de bombeo para agua desalinizada, (US\$/HP)
$V^{PUMP-FW}$	Costo variable para unidades de bombeo para agua subterránea, (US\$/HP)
V^{RO}	Costo variable para el proceso de desalinización, (US\$/m ³ /d)
V^{SOLAR}	Costo variable para el colector solar, (US\$)
V^{ST}	Costo variable para el tanque de almacenamiento asociado a la planta de desalinización, (US\$/m ³)
$WR_{t,k}$	Requerimientos de agua para el sistema de desalinización de cada campo k por cada período t , (m ³ /mes)
ψ_t	Porcentaje de recuperación de agua de lluvia sobre cada período t .
Variables	
A^{SOLAR}	Área óptima del colector solar, (m ²)
$CAPC$	Costo anual de capital, (US\$/año)
$DW_{t,k}$	Consumo de agua desalinizada en cada campo k sobre cada período t , (m ³ /mes)
DW^{TOT}	Consumo anual de agua de mar desalinizada, (m ³ /año)

$E_{t,k}^{BUY-DW}$	Requerimientos de electricidad externa para unidades de bombeo para agua desalinizada para cada campo k sobre cada período t , (kW)
$E_{t,k}^{BUY-FW}$	Requerimientos de electricidad externa para unidades de bombeo para agua subterránea para cada campo k sobre cada período t , (kW)
E_t^{BUY-RO}	Requerimientos de electricidad externa para el proceso de desalinización sobre cada período t , (kW)
$E^{PUMP-SRC}$	Potencia requerida en la unidad de bombeo del ciclo de potencia, (kW)
E_t^{RO}	Electricidad requerida para el funcionamiento del proceso de desalinización en cada período t , (kW)
E_t^{SALE}	Electricidad procedente del ciclo de potencia para ventas en cada período t , (kW)
E^{SRC}	Potencia producida por el ciclo de potencia, (kW)
$E_{t,k}^{SRC-DW}$	Electricidad requerida del ciclo de potencia para unidades de bombeo para agua desalinizada para cada campo k sobre cada período t , (kW)
$E_{t,k}^{SRC-FW}$	Electricidad requerida del ciclo de potencia para unidades de bombeo para agua subterránea para cada campo k sobre cada período t , (kW)
E_t^{SRC-RO}	Electricidad requerida del ciclo de potencia para el proceso de desalinización sobre cada período t , (kW)
F_t^{EXT}	Consumo anual de electricidad externa, (kW)
$FW_{t,k}$	Consumo de agua subterránea en cada campo k sobre cada período t , (m ³ /mes)
FW^{TOT}	Consumo anual de agua subterránea, (m ³ /año)
$HL_{t,k}$	Pérdida de fricción en las tuberías que transportan agua de las fuentes hacia los campos k en cada período t , (m)
$HT_{t,k}$	Carga dinámica total, (m)

$INCOME$	Ingresos por ventas de electricidad del ciclo de potencia, (US\$/año)
$INLET_t^{RO}$	Consumo de agua de mar en el proceso de desalinización en cada período t , (m^3/mes)
$OPEC$	Costo anual de operación, (US\$/año)
$POWER_{t,k}^{DW}$	Potencia requerida en cada unidad de bombeo para agua desalinizada de cada campo k por cada período t , (kW)
$POWER_k^{DWCAP}$	Capacidad de las bombas para agua desalinizada, (kW)
$POWER_{t,k}^{FW}$	Potencia requerida en cada unidad de bombeo para agua subterránea de cada campo k por cada período t , (kW)
$POWER_k^{FWCAP}$	Capacidad de las bombas para agua subterránea, (kW)
$Q_{t,k}$	Flujo de agua en cada tubería, (m^3/s)
q^{COND}	Carga térmica transferida en el condensador del ciclo de potencia, (kW)
q^{EXT}	Electricidad requerida en el ciclo de potencia por el colector solar y combustibles fósiles, (kW)
$q_{t,f}^{FOSSIL}$	Carga térmica producida por los combustibles fósiles f en cada período t , (kW)
q_t^{SOLAR}	Carga térmica producida por el colector solar en cada período t , (kW)
ST_t^{RO}	Demanda total de agua desalinizada por cada período t , (m^3/mes)
ST^{ROCAP}	Capacidad diaria de la planta de desalinización, (m^3/d)
$TLFW$	Costo total para tuberías nuevas para agua subterránea, (US\$/año)
$TLDW$	Costo total para tuberías nuevas para agua desalinizada, (US\$/año)
Z^{COND}	Variable binaria para seleccionar el condensador del ciclo de potencia, (0 o 1)

Z_k^{DW}	Variable binaria para determinar la existencia o no de las unidades de bombeo para agua desalinizada, (0 o 1)
Z_k^{FW}	Variable binaria para determinar la existencia o no de las unidades de bombeo para agua subterránea, (0 o 1)
$Z^{PUMP-SRC}$	Variable binaria para seleccionar la bomba del ciclo de potencia, (0 o 1)
Z^{SOLAR}	Variable binaria para seleccionar el colector solar asociado al ciclo de potencia, (0 o 1)
Z^{SRC}	Variable binaria para seleccionar la turbina del ciclo de potencia, (0 o 1)

Anexo 2-Código

\$TITLE DOCTORADO

OPTION OPTCR = 0;
OPTION OPTCA = 100000;
OPTION ITERLIM = 2147483647;
OPTION RESLIM = 100000;
OPTION LIMCOL = 0;
OPTION LIMROW = 0;

OPTION NLP=CONOPT;
OPTION MINLP=LINDOGLOBAL;

SET

K CAMPOS DE CULTIVO /1*4/
T PERIODOS DEL AÑO /1*12/
F COMBUSTIBLES FOSILES /1*3/;

PARAMETERS

ETAWR EFICIENCIA DEL SISTEMA DE RIEGO,
RW(T) PRECIPITACIÓN DE AGUA DE LLUVIA,
AHW(K) AREA SEMBRADA DE CADA CULTIVO,
PSI(T) PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE LLUVIA,
TETHA(T) FACTOR DE TIEMPO (DIAS QUE COMTEMPLA UN MES),
CHW1(T,K) AGUA REQUERIDA POR HECTAREA SEMBRADA DE CULTIVO,
HW(T,K) AGUA TOTAL REQUERIDA EN CADA CAMPO (TOTAL DE HECTAREAS) POR PERIODO,
RAINWATER(T,K) CANTIDA TOTAL DE AGUA DE LLUVIA SOBRE CULTIVO,
WR(T,K) REQUERIMIENTOS DE AGUA PARA RIEGO,
FWAVAIL(K) DISPONIBILIDAD DE AGUA FRESCA EN CADA RESERVORIO POR PERIODO,
CFW COSTO UNITARIO DEL AGUA FRESCA,
CDW COSTO UNITARIO DEL AGUA DESALINIZADA,

LFW(K) LONGITUD DE LAS TUBERÍAS EMPLEADAS,
LDW(K) LONGITUD DE LAS TUBERÍAS EMPLEADAS,
CLFW(K) COSTO POR METRO LINEAL DE TUBERÍA EN BASE AL DIAMETRO COMERCIAL,
CLDW(K) COSTO POR METRO LINEAL DE TUBERÍA EN BASE AL DIAMETRO COMERCIAL,
B RELACIÓN COSTO DE INSTALACIÓN AL COSTO DE COMPRA DE LA TUBERIA NUEVA,
H CARGOS FIJOS ANUALES DE LA TUBERIA INCLUIDO EL MANTENIMIENTO,

DFW(K) DIAMETRO DE LA TUBERÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL,
CHFW COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS,
AFW(K) AREA DE ENTRADA DE LA TUBERIA,
RFW(K) RADIO HIDRAULICO,
HSP(K) PERDIDA DE FRICCION-CARGA ESTATICA,
GAMMAFW PESO ESPECIFICO DEL AGUA FRESCA,

DDW(K) DIAMETRO DE LA TUBERÍA EN FUNCIÓN DEL CAUDAL,
CHDW COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS,
ADW(K) AREA DE ENTRADA DE LA TUBERIA,
RDW(K) RADIO HIDRAULICO,
HHP(K) PERDIDA DE FRICCION-CARGA ESTATICA,
GAMMADW PESO ESPECIFICO DEL AGUA FRESCA,

CTE1(K) PARAMETRO AUX,
CTE3(K) PARAMETRO AUX,
POWERFWMAX(K) UPPER BOUND DE LA POTENCIA PARA BOMBAS DE AGUA FRESCA,

POWERDWMAX(K) UPPER BOUND DE LA POTENCIA PARA BOMBAS DE AGUA FRESCA,
 HYPUMP FACTOR DE TIEMPO (HORAS QUE TRABAJA EL SISTEMA DE BOMBEO AL DIA),
 ETAPUMP EFICIENCIA DE LA BOMBA,
 M INTERES DADO EN EL PROYECTO,
 N NUMERO DE AÑOS EN EJECUCION DE LA OBRA,
 KF FACTOR DE ANUALIDAD,
 ALFA EXPONENTE QUE CONSIDERA LA ECONOMÍA A ESCALA,

VPUMP COSTO UNITARIO VARIABLE PARA LAS BOMBAS,

QEXT CARGA TERMICA DE ENTRADA AL CICLO RANKINE DE POTENCIA,

QUSEFULL(T) CALOR UTIL DE COLECTOR SOLAR,
 HEATING(F) PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES FOSILES,
 AVAILMAX(T,F) DISPONIBILIDAD MAXIMA DE COMBUSTIBLES FOSILES POR PERIODO,
 ETASRC EFICIENCIA DEL CICLO RANKINE DE VAPOR,
 ETAPUMPSRC EFICIENCIA DE LA BOMBA DEL CICLO RANKINE DE VAPOR,

CSO COSTO UNITARIO PARA ENERGÍA SOLAR,
 CFS(F) COSTO UNITARIO PARA COMBUSTIBLES FOSILES,
 CEC COSTO UNITARIO POR KW-H QUE SE COMPRA,
 PEV PRECIO UNITARIO DE ENERGIA ELECTRICA PARA VENTA,

VSO COSTO VARIABLE DE COLECTORES SOLARES,
 VCOND COSTO VARIABLE DEL CONDENSADOR,
 VTURB COSTO VARIABLE DE LA TURBINA,
 VBOILER COSTO VARIABLE DEL BOILER,
 HYSRC FACTOR DE TIEMPO (HORAS QUE TRABAJA EL SISTEMA SRC),

VOS COSTO VARIABLE DE LA PLANTA DE DESALINIZACIÓN,
 HYOS FACTOR DE TIEMPO (HORAS QUE TRABAJA EL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN),
 COS COSTO DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE DESALINIZACIÓN,
 DOS CONSUMO DE ENERGÍA DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN KW M-3,
 ETAOS EFICIENCIA DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN;

ETAWR=0.85;

*PRECIPITACION PLUVIAL MEDIA POR ESTACIÓN M

*ENERO-DICIEMBRE

RW('1')=0.026;
 RW('2')=0.0129;
 RW('3')=0.0181;
 RW('4')=0.0067;
 RW('5')=0.0011;
 RW('6')=0.0015;
 RW('7')=0.061;
 RW('8')=0.0722;
 RW('9')=0.0282;
 RW('10')=0.018;
 RW('11')=0.0221;
 RW('12')=0.0334;

*PLATANO,CACAO,LIMON,PIÑA; HECTAREAS (K)

AHW('1')=5;
 AHW('2')=5;

AHW('3')=5;
AHW('4')=5;

*FACTOR AGUA DE LLUVIA UTIL

PSI(T)=(ETR(T)/RW(T))/(1.53+0.8(ETR(T)/RW(T)));
PSI(T)=0.8;

*OTOÑO, INVIERNO, PRIMAVERA, VERANO DIAS POR ESTACIÓN

TETHA('1')=31;
TETHA('2')=28;
TETHA('3')=31;
TETHA('4')=30;
TETHA('5')=31;
TETHA('6')=30;
TETHA('7')=31;
TETHA('8')=31;
TETHA('9')=30;
TETHA('10')=31;
TETHA('11')=30;
TETHA('12')=31;

*HW(T,K) M³/MES DE AGUA POR HECTAREA DE PLANTA

CHW1('1','1')=202;
CHW1('2','1')=211;
CHW1('3','1')=302;
CHW1('4','1')=469;
CHW1('5','1')=791;
CHW1('6','1')=596;
CHW1('7','1')=682;
CHW1('8','1')=624;
CHW1('9','1')=885;
CHW1('10','1')=526;
CHW1('11','1')=265;
CHW1('12','1')=199;

CHW1('1','3')=26;
CHW1('2','3')=36;
CHW1('3','3')=90;
CHW1('4','3')=325;
CHW1('5','3')=918;
CHW1('6','3')=1526;
CHW1('7','3')=1747;
CHW1('8','3')=1405;
CHW1('9','3')=940;
CHW1('10','3')=365;
CHW1('11','3')=107;
CHW1('12','3')=41;

CHW1('1','2')=283;
CHW1('2','2')=313;
CHW1('3','2')=476;
CHW1('4','2')=638;
CHW1('5','2')=944;
CHW1('6','2')=1236;
CHW1('7','2')=1415;
CHW1('8','2')=1259;
CHW1('9','2')=1026;
CHW1('10','2')=676;
CHW1('11','2')=393;
CHW1('12','2')=279;

CHW1('1','4')=154;
CHW1('2','4')=251;
CHW1('3','4')=562;
CHW1('4','4')=942;
CHW1('5','4')=1418;
CHW1('6','4')=1931;
CHW1('7','4')=2211;
CHW1('8','4')=1891;
CHW1('9','4')=1514;
CHW1('10','4')=935;
CHW1('11','4')=370;
CHW1('12','4')=237;

*CULTIVOS

HW(T,K)=CHW1(T,K)*AHW(K);

*AGUA FRESCA NECESARIA

RAINWATER(T,K)= RW(T)*10000*AHW(K)*PSI(T);

*EC 5

WR(T,K)= (HW(T,K)-RAINWATER(T,K))*(1/ETAWR);

*FWAVAIL(J) M^3 DE AGUA:(2702)LA CHONTALPA:1,580,863,690

FWAVAIL('1')=25000;

FWAVAIL('2')=10000;

FWAVAIL('3')=40000;

FWAVAIL('4')=20000;

CFW=0.63;

CDW=1.72;

*METROS DE PVC (K)

LFW('1')=150;

LFW('2')=100;

LFW('3')=400;

LFW('4')=225;

*METROS DE PVC (K)

LDW('1')=2000;

LDW('2')=1500;

LDW('3')=1250;

LDW('4')=2500;

CLFW(K)=50;

CLDW(K)=50;

B=0.4;

H=0.2;

*DIAMETRO DE LA TUBERIA (J,K)

DFW(K)=0.1524;

*COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS

CHFW=140;

*AREA DE LA TUBERIA M^2

AFW(K)=(3.14159*DFW(K)**2)/4;

*RADIO HIDRAULICO DE LA TUBERIA M

RFW(K)=DFW(K)/4;

*ELEVACIÓN BROCAL

HSP(K)=40;

*PESO ESPECIFICO (N/M^3)

GAMMAFW=9810;

*DIAMETRO DE LA TUBERIA (J,K)

DDW(K)=0.1524;

*COEFICIENTE DE HAZEN-WILLIAMS

CHDW=140;

*AREA DE LA TUBERIA M^2

ADW(K)=(3.14159*DFW(K)**2)/4;

*RADIO HIDRAULICO DE LA TUBERIA M

RDW(K)=DFW(K)/4;

*ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO

HHP(K)=0;

*PESO ESPECÍFICO (N/M³)

GAMMADW=9810;

CTE1(K)=LFW(K)/(0.85*AFW(K)*CHFV*(RFW(K)**0.63))**1.852;

CTE3(K)=LDW(K)/(0.85*ADW(K)*CHDW*(RDW(K)**0.63))**1.852;

POWERFWMAX(K)=80;

POWERDWMAX(K)=80;

HYPUMP=4;

*EFICIENCIA DE LA BOMBA

ETAPUMP=0.7;

*FACTOR ANUALIDAD

M=0.05;

N=5;

KF=(M*(1+M)**N)/(((1+M)**N)-1);

ALFA=1;

VPUMP=350;

QEXT=2100;

QUSEFULL('1')=306900;

QUSEFULL('2')=347200;

QUSEFULL('3')=483600;

QUSEFULL('4')=570000;

QUSEFULL('5')=657200;

QUSEFULL('6')=666000;

QUSEFULL('7')=669600;

QUSEFULL('8')=613800;

QUSEFULL('9')=504000;

QUSEFULL('10')=412300;

QUSEFULL('11')=312000;

QUSEFULL('12')=282100;

HEATING('1')=35000;

HEATING('2')=45200;

HEATING('3')=54000;

AVAILMAX('1','1')=10000;

AVAILMAX('1','2')=10000;

AVAILMAX('1','3')=80000;

AVAILMAX('2','1')=15000;

AVAILMAX('2','2')=70000;

AVAILMAX('2','3')=30000;

AVAILMAX('3','1')=40000;

AVAILMAX('3','2')=60000;

AVAILMAX('3','3')=25000;

AVAILMAX('4','1')=50000;

AVAILMAX('4','2')=65000;

AVAILMAX('4','3')=35000;

AVAILMAX('5','1')=70000;

AVAILMAX('5','2')=65000;

AVAILMAX('5','3')=23000;

AVAILMAX('6','1')=15000;

AVAILMAX('6','2')=10000;

AVAILMAX('6','3')=23000;

AVAILMAX('7','1')=10000;
AVAILMAX('7','2')=10000;
AVAILMAX('7','3')=15000;
AVAILMAX('8','1')=50000;
AVAILMAX('8','2')=10000;
AVAILMAX('8','3')=15000;

AVAILMAX('9','1')=40000;
AVAILMAX('9','2')=10000;
AVAILMAX('9','3')=20000;

AVAILMAX('10','1')=40000;
AVAILMAX('10','2')=70000;
AVAILMAX('10','3')=25000;

AVAILMAX('11','1')=30000;
AVAILMAX('11','2')=65000;
AVAILMAX('11','3')=25000;

AVAILMAX('12','1')=20000;
AVAILMAX('12','2')=90000;
AVAILMAX('12','3')=30000;

ETASRC=0.4;

ETAPUMPSRC=0.05;

CSO=0.012/3600;

CFS('1')=1.5559E-6;
CFS('2')=18.244E-6;
CFS('3')=5.8349E-6;

PEV=0.15;

VSO=45;

VCOND=350;

VTURB=80000;

CEC=0.23;

VBOILER=160;

HYSRC=8;

VOS=3500;

HYOS=8;

COS=0.25;

DOS=3;

ETAOS=0.45;

POSITIVE VARIABLES

FW(T,K)	CAUDAL DE AGUA FRESCA HACIA LOS CULTIVOS,
DW(T,K)	CANTIDAD TOTAL DE AGUA GRESCA CONSUMIDA,
STAVAIL(T)	DISPONIBILIDAD DE AGUA DESALINIZADA EN EL TANQUE DEL OS,
FWTOT	CANTIDAD USADA DE AGUA FRESCA,
DWTOT	CANTIDAD DE AGUA DESALINIZADA,

QFW(T,K)	CAUDAL EM M ³ POR S,
CTE2(T,K)	VARIABLE AUX,
HLFW(T,K)	PERDIDA DE ENERGIA POR FRICCION DEL FLUJO EN TUBERIAS-CARGA POR LONGITUD,
SFW(T,K)	RELACION PERDIDA DE ENERGIA-LONGITUD DE LA TUBERIA,

HTFW(T,K)	CARGA DINAMICA TOTAL,
VFW(T,K)	VELOCIDAD PROMEDIO DEL CAUDAL,
POWERFW(T,K)	POTENCIA DE BOMBA REQUERIDA,
POWERFWCAP(K)	POTENCIA MAXIMA EN LA BOMBA EMPLEADA,
HPFWCAP(K)	POTENCIA EN HORSE POWER,
POWERFWTOT	CONSUMO ANUAL DE ENERGIA ELECTRICA,
QDW(T,K)	CAUDAL EM M ³ POR S,
CTE4(T,K)	VARIABLE AUX,
HLDW(T,K)	PERDIDA DE ENERGIA POR FRICCION DEL FLUJO EN TUBERIAS-CARGA POR LONGITUD,
SDW(T,K)	RELACION PERDIDA DE ENERGIA-LONGITUD DE LA TUBERIA,
HTDW(T,K)	CARGA DINAMICA TOTAL,
VDW(T,K)	VELOCIDAD PROMEDIO DEL CAUDAL,
POWERDW(T,K)	POTENCIA DE BOMBA REQUERIDA,
POWERDWCAP(K)	POTENCIA MAXIMA EN LA BOMBA EMPLEADA,
HPDWCAP(K)	POTENCIA EN HORSE POWER,
POWERDWTOT	CONSUMO ANUAL DE ENERGIA ELECTRICA,
*QEXT	CARGA TERMICA DE ENTRADA AL CICLO RANKINE DE POTENCIA,
QSOLAR(T)	CARGA TERMICA PROCEDENTE DEL COLECTOR SOLAR,
ASOLAR	AREA OPTIMA DEL COLECTOR SOLAR,
QFOSSIL(T,F)	CARGA TERMICA DE LOS COMBUSTIBLES FOSILES,
ESRC	ENERGIA QUE SE PRODUCE EN EL ORC,
EPUMPSRC	ENERGIA QUE CONSUME LA BOMBA DEL SRC,
QCOND	CARGA TERMICA QUE CONSUME EL CONDENSADOR,
ESRCFW(T,K)	ENERGIA QUE SE ENVIA DEL ORC A LAS BOMBAS,
ESRCDW(T,K)	ENERGIA QUE SE ENVIA DEL ORC A LAS BOMBAS,
ESRCOS(T)	ENERGIA QUE SE ENVIA DEL ORC A LAS BOMBAS,
ESALE(T)	EXCEDENTE DE ENERGIA DEL ORC QUE SE VENDE,
ECONSFW(T,K)	FALTANTE DE ENERGIA QUE REQUIERE LA BOMBA,
ECONSDW(T,K)	FALTANTE DE ENERGIA QUE REQUIERE LA BOMBA,
ECONSOS(T)	FALTANTE DE ENERGIA QUE REQUIERE LA BOMBA,
EOS(T)	ENERGIA QUE ALIMENTA AL SISTEMA RO,
FEXT(T)	FUENTE EXTERNA DE ENERGIA,
STOSCAP	CAP MAX PARA TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN,
INLET(T)	INGESTA DE AGUA DE MAR,
TCFW	COSTO TOTAL POR AGUA FRESCA,
TCDW	COSTO TOTAL POR AGUA DESALINIZADA,
TLFW	COSTO DE TUBERIA AGUA FRESCA,
TLDW	COSTO DE TUBERIA AGUA DESALINIZADA,
TVFW	COSTO VARIABLE POR BOMBAS DE AGUA FRESCA,
TVDW	COSTO VARIABLE POR BOMBAS DE AGUA DESALINIZADA,
TBE1	COSTO DE OPERACION BOMBA FW,
TBE2	COSTO DE OPERACION BOMBA DW,
TVSR	COSTO VARIABLE DEL SRC,
TCVA	COSTO VARIABLE DE COLECTOR SOLAR,
TCOA	COSTO DE OPERACIÓN DE COLECTOR SOLAR,
TCOF	COSTO DE OPERACION COMBUSTIBLES FOSILES,
REVERSE1	COSTO DE CAPITAL DEL RO,
REVERSE2	COSTO DE OPERACION DE LA PLANTA DE DESALINIZACION SIN CONSIDERAR CONSUMO ELECTRICO TOTAL DEL RO,
TBE3	COSTO DE OPERACION RO,
TTST	COSTO DE CAPITAL DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO,

TBE COSTO DE OPERACION POR COMPRA DE ENERGIA ELECTRICA,
 PROFIT INGRESOS POR VENTA DE ENERGIA ELECTRICA;

BINARY VARIABLES

ZFW(K) VARIABLE BINARIA PARA BOMBAS EN RESERVORIOS NATURALES HACIA CAMPO,
 ZDW(K) VARIABLE BINARIA PARA BOMBAS EN RESERVORIOS NATURALES HACIA CAMPO;

VARIABLE
 TAC COSTO TOTAL ANUAL;

EQUATIONS

E1(T,K),	E22(T,K),	E47(T),
E2(K),	E23(T,K),	Z1,
E3(T),	E24(T,K),	Z2,
E4,	E25(T,K),	Z3,
E5,	E26(T,K),	Z4,
E6(T,K),	E27(K),	Z5,
E7(T,K),	E28(K),	Z6,
E8(T,K),	E29,	Z7,
E9(T,K),	E34(T),	Z8,
E10(T,K),	E35(T,F),	Z9,
E11(T,K),	E36(T),	Z10,
E12(T,K),	E37,	Z11,
E13(T,K),	E38,	Z12,
E14(T,K),	E39,	Z13,
E15(K),	E40(T),	Z14,
E16(K),	E41(T,K),	Z15,
E17,	E42(T,K),	Z16,
E18(T,K),	E43(T),	Z17,
E19(T,K),	E44(T),	Z18,
E20(T,K),	E45(T),	Z0;
E21(T,K),	E46(T),	

E1(T,K).. FW(T,K)+ DW(T,K) =G= WR(T,K);
 E2(K).. SUM(T,FW(T,K)) =L= FWAVAIL(K);
 E3(T).. SUM(K,DW(T,K)) =L= STAVAIL(T);
 E4.. FWTOT =E= SUM((T,K),FW(T,K));
 E5.. DWTOT =E= SUM((T,K),DW(T,K));

E6(T,K).. QFW(T,K) =E= FW(T,K)*(1/(TETHA(T)*HYPUMP*3600));
 E7(T,K).. CTE2(T,K) =E= QFW(T,K)**1.852;
 E8(T,K).. HLFW(T,K) =E= CTE1(K)*CTE2(T,K);
 E9(T,K).. HLFW(T,K) =E= LFW(K)*SFW(T,K);
 E10(T,K).. HTFW(T,K)=E= HLFW(T,K)+HSP(K);
 E11(T,K).. VFW(T,K) =E= 0.85*CHFV*(RFW(K)**0.63)*(SFW(T,K)**0.54);
 E12(T,K).. QFW(T,K) =E= AFW(K)*VFW(T,K);
 E13(T,K).. POWERFW(T,K)*ETAPUMP =E= GAMMAFW*HTFW(T,K)*QFW(T,K)*0.001;
 E14(T,K).. POWERFW(T,K) =L= POWERFWCAP(K);
 E15(K).. POWERFWCAP(K)-POWERFWMAX(K)*ZFW(K) =L= 0;
 E16(K).. HPFWCAP(K) =E= POWERFWCAP(K)*1.34102;
 E17.. POWERFWTOT =E= SUM((T,K),POWERFW(T,K)*HYPUMP*TETHA(T));

E18(T,K).. QDW(T,K) =E= DW(T,K)*(1/(TETHA(T)*HYPUMP*3600));
 E19(T,K).. CTE4(T,K) =E= QDW(T,K)**1.852;
 E20(T,K).. HLDW(T,K) =E= CTE3(K)*CTE4(T,K);
 E21(T,K).. HLDW(T,K) =E= LDW(K)*SDW(T,K);
 E22(T,K).. HTDW(T,K)=E= HLDW(T,K)+ HHP(K);
 E23(T,K).. VDW(T,K) =E= 0.85*CHDW*(RDW(K)**0.63)*(SDW(T,K)**0.54);

E24(T,K).. QDW(T,K) =E= ADW(K)*VDW(T,K);
 E25(T,K).. POWERDW(T,K)*ETAPUMP =E= GAMMADW*HLDW(T,K)*QDW(T,K)*0.001;
 E26(T,K).. POWERDW(T,K) =L= POWERDWCAP(K);
 E27(K).. POWERDWCAP(K)-POWERDWMAX(K)*ZDW(K) =L= 0;
 E28(K).. HPDWCAP(K) =E= POWERDWCAP(K)*1.34102;
 E29.. POWERDWTOT =E= SUM((T,K),POWERDW(T,K)*HYPUMP*TETHA(T));

 E34(T).. QSOLAR(T) =L= QUSEFULL(T)*ASOLAR*(1/(3600*24*TETHA(T)));
 E35(T,F).. QFOSSIL(T,F) =L= (HEATING(F)*AVAILMAX(T,F))*(1/(3600*24*TETHA(T)));
 E36(T).. QSOLAR(T)+SUM(F,QFOSSIL(T,F)) =E= QEXT;

 E37.. ESRC =E= QEXT*ETASRC;
 E38.. EPUMPSRC =E= ESRC*ETAPUMPSRC;
 E39.. QCOND =E= QEXT+EPUMPSRC-ESRC;

 E40(T).. SUM(K,ESRCFW(T,K))+SUM(K,ESRCDW(T,K))+ESRCOS(T)+ESALE(T) =L= ESRC;
 E41(T,K).. ECONSFW(T,K)+ESRCFW(T,K) =E= POWERFW(T,K);
 E42(T,K).. ECONSDW(T,K)+ESRCDW(T,K) =E= POWERDW(T,K);
 E43(T).. ECONSOS(T)+ESRCOS(T) =E= EOS(T);
 E44(T).. SUM(K,ECONSFW(T,K))+SUM(K,ECONSDW(T,K))+ECONSOS(T) =L= FEXT(T);
 E45(T).. EOS(T) =E= DOS*(1/(HYOS*TETHA(T)))*(STAVAIL(T));

 E46(T).. STAVAIL(T)*(1/TETHA(T)) =L= STOSCAP;
 E47(T).. INLET(T)*ETAOS =E= STAVAIL(T);

 Z1.. TCFW =E= CFW*SUM((T,K),FW(T,K));
 Z2.. TCDW =E= CDW*SUM((T,K),DW(T,K));
 Z3.. TLFW =E= (1+B+H)*SUM(K,LFW(K)*CLFW(K)*ZFW(K));
 Z4.. TLDW =E= (1+B+H)*SUM(K,LDW(K)*CLDW(K)*ZDW(K));
 Z5.. TVFW =E= KF*SUM(K,VPUMP*HPFCAP(K)**ALFA);
 Z6.. TVDW =E= KF*SUM(K,VPUMP*HPDWCAP(K)**ALFA);
 Z7.. TBE1 =E= CEC*HYPUMP*SUM((T,K),ECONSFW(T,K)*TETHA(T));
 Z8.. TBE2 =E= CEC*HYPUMP*SUM((T,K),ECONSDW(T,K)*TETHA(T));
 Z9.. TVSR =E= KF*(VCOND*QCOND**ALFA+VTURB*ESRC**0.45+VPUMP*EPUMPSRC**ALFA+
 VBOILER*QEXT**ALFA);
 Z10.. TCVA =E= KF*VSO*ASOLAR**ALFA;
 Z11.. TCOA =E= CSO*SUM(T,QSOLAR(T)*3600*24*TETHA(T));
 Z12.. TCOF =E= SUM((T,F),(QFOSSIL(T,F)*3600*24*TETHA(T)*CFS(F)));

 Z13.. REVERSE1 =E= KF*(VOS*STOSCAP**ALFA);
 Z14.. REVERSE2 =E= COS*SUM(T,INLET(T));
 Z15.. TBE3 =E= CEC*HYOS*SUM(T,ECONSOS(T)*TETHA(T));
 Z16.. TTST =E= 75*(STOSCAP)**ALFA;

 Z17.. TBE =E= TBE1+TBE2+TBE3;
 Z18.. PROFIT =E= PEV*SUM(T,ESALE(T)*HYSRC*TETHA(T));

 Z0.. TAC =E= TCFW+TCDW+TLFW+TLDW+TVFW+TVDW+TVSR+TCVA+TCOA+TCOF
 +REVERSE1+REVERSE2+TTST+TBE-PROFIT;

*TCFW.FX=0;

MODEL TESIS /ALL/;

SOLVE TESIS USING MINLP MINIMIZING TAC;

FW.LO(T,K)=0;

FW.UP(T,K)=WR(T,K);

SFV.LO(T,K)=0;

DW.LO(T,K)=0;
DW.UP(T,K)=WR(T,K);
SDW.LO(T,K)=0;

*QEXT.LO=0;
*QEXT.UP=1000;

FW.L(T,K)=HW(T,K);
SFW.L(T,K)=DFW(K)/RFW(K);

DW.L(T,K)=HW(T,K);
SDW.L(T,K)=DDW(K)/RDW(K);

POWERFWCAP.L(K)=0.75*SUM(T,HW(T,K))**(1/3);
POWERDWCAP.L(K)=0.75*SUM(T,HW(T,K))**(1/3);

*QEXT.L=400;

DISPLAY
HW,
RAINWATER,
WR,
CTE1,
CTE3;

Agricultural Water Management 244 (2021) 106552



Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural Water Management

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




Incorporating a seawater desalination scheme in the optimal water use in agricultural activities

Brígido J. Hipólito-Valencia^a, Francisco Waldemar Mooqueda-Jiménez^a,
Juan Barajas-Fernández^a, José M. Ponce-Ortega^{b,*}

^a División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carre. Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco 86960, Mexico

^b Chemical Engineering Dept., Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Av. Francisco J. Mújica 58, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán 58060, Mexico



ARTICLE INFO

Handling Editor - Dr. B.E. Clothier

Keywords:
Energy integration
Reverse osmosis
Water integration
Agricultural activities
Irrigation systems

ABSTRACT

Seawater desalination process is analyzed in this paper as an option for reducing the groundwater usage of overexploited aquifers in irrigated agriculture. The proposed approach is based on a new superstructure formulated as a multiobjective mixed integer nonlinear programming model, where power requirements of the desalination process and agriculture activity are supplied by an integrated steam Rankine cycle fed of solar energy and fossil fuels. The multiobjective function includes the minimization of the groundwater consumption and the minimization of the total annual cost; this cost is divided into the capital cost which consists of the catchment area, desalination process, power cycle and pumps, as well as the operating costs for pumping, fossil fuels, groundwater and desalinated seawater. A case study for the state of Sonora in Mexico was considered to show the applicability of the proposed approach. Results show that the maximum saving for groundwater consumption is about 66% with the proposed method.

1. Introduction

Large quantities of water are required in many parts of the world for agricultural, industrial and domestic uses (Chen and Chen, 2016; Vakiliifard et al., 2018). However, in many regions where water availability is low, due to climate and/or concentration of population in big cities, the natural supply of water rarely satisfies the full demands (Seelen et al., 2019). Water scarcity in these regions has led to an increase in the extraction of water from aquifers, dams, and lakes (Morales-Valek et al., 2017). This has created serious problems in the overexploitation of ground and surface water resources (Pérez-Uresti et al., 2019). Various regions around the world have underground water as the main water source (about 65% of irrigation and urban water) (Moreno et al., 2010; OONAGUA, 2015). Water is extracted by using submersible pumps, and the water can be stored in a reservoir or injected directly into the irrigation system (Ching-Fang, 2018).

Agriculture is the activity with the highest water demand in the world; it consumes approximately 70% of the water withdrawn per year (World Bank, 2017). Only about 17% of the world's cropland is irrigated, but this irrigated land produces 40% of the world's food (Saecon,

2018). Irrigation is one of the sectors of agriculture that is increasing its energy consumption because of the modernization of irrigation water-distribution systems (Sun et al., 2019). Pumping for water distribution and underground water extraction are the main energy consumers in pressurized water networks (Moreno et al., 2010). Also, seasonal changes in river flows and temperatures have large impacts on the scheduling of electrical energy generation; these variations directly affect the availability and reliability of electric power generation (Huang et al., 2012; Gjorgiev and Sanavini, 2017).

For these reasons, innovative technologies and methodologies have been developed to increase water resource availability for irrigated agriculture, as such water conservation, infrastructure modernization, implementation of smart irrigation systems, local water transfers, treatment of low-quality local water sources, etc. (Duke and Casañas, 2015). Additionally, finding optimal solutions to satisfy water demands has been studied by several authors. For example, Arredondo-Ramírez et al. (2015) presented an optimization approach for water use in agriculture that includes collection, storage, reuse, and dispatch water. Bataineh (2016) presented the performance of solar thermal irrigation pump using a steam Rankine cycle integrated with a parabolic trough collector (PTC). Rubio-Castro et al. (2016) proposed a mathematic

* Corresponding author.
E-mail address: jponce@umich.mx (J.M. Ponce-Ortega).

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106552>
Received 17 June 2020; Received in revised form 19 September 2020; Accepted 22 September 2020
0378-3774/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.



Implementing genetic algorithms for optimizing integrated oil production systems

Francisco Waldemar Mosqueda-Jiménez¹ · Brígido Jesús Hipólito-Valencia¹ · Juan Barajas-Fernández¹ · José María Pardo-Ortega¹

Received: 21 June 2021 / Revised: 12 October 2021 / Accepted: 13 October 2021 / Published online: 22 October 2021
 © Associação Brasileira de Engenharia Química 2021

Abstract

This paper presents an optimization model based on an oil production system. The objective function is the Net Present Value (NPV) of the profits from hydrocarbon sales, considering the operation costs. The economic objective function is subject to constraints on the reservoir, fluid properties, and multiphase flow in the well. The main variables within the model are the well diameter, reservoir skin factor, rock permeability and gas–oil ratio. This work is presented as an optimization model, because traditionally the production system models are solved by simulation, not ensuring the optimal system solution. Genetic Algorithms are implemented for solving the optimization model because they solve problems with non-convex terms. To obtain the results, the mathematical model was coded in Matlab and was solved with the Genetic Algorithms optimization tool implemented in the software. Four case studies were analyzed. The results indicate that there is an economic improvement in the profits from the sale of hydrocarbon, compared to the solution of the traditional technique by means of Nodal Analysis.

Keywords Oil production system · Nodal analysis · Optimization · Genetic algorithm

List of Symbols

γ_{API}	API gravity of stock tank oil	$f_{2\phi}$	Fanning friction factor for two-phase flow
B_o	Formation volume factor of oil, m^3/m^3	G^1	Cumulative gas production per stb of oil at the beginning of the interval, m^3
B_{oi}	Initial formation volume factor of oil, m^3/m^3	GOR	Producing gas oil ratio, m^3/m^3
B_w	Formation volume factor of water, m^3/m^3	h	Reservoir thickness, m
B_g	Formation volume factor of gas, m^3/m^3	$K_{e,h}$	Effective horizontal permeability, m^2
c	Compressibility of oil, MPa^{-1}	K_{ro}	Relative permeability to oil
D	Tubing inner diameter, m	K_{rg}	Relative permeability to gas
ΔG_p^1	Production increment, m^3	M	Total mass associated with 1 m^3 of oil
ΔN_p^1	Production increment, m^3	N	Original oil in place, m^3
ΔN_p^2	Production increment, m^3	N_p	Cumulative production, m^3
Δh	Depth increment, m	N_p^1	Cumulative oil production per m^3 of oil in place at the beginning of the interval
Δp	Pressure drop, MPa	NPV	Net present value, USD
Δt	Incremental production time, days	P	Pressure, MPa
		PV_{cost}	Cost present value, USD/ m^3
		PV_{oper}	Operating cost, USD/ m^3
		$PV_{revenue}$	Revenue present value, USD/ m^3
		PV_{tax}	Tax payments, USD/ m^3
		P_b	Bubble point pressure, MPa
		P_i	Reservoir initial pressure, MPa
		PI	Index productivity, $m^3/d \cdot MPa$
		P_{sep}	Separator pressure, MPa
		P_{wf}	Flowing bottom hole pressure, MPa
		P_{wh}	Wellhead pressure, MPa
		P_{ws}	Reservoir static pressure, MPa

✉ Juan Barajas-Fernández
 juan.barajas@uniat.mx

José María Pardo-Ortega
 jrpardo@uniat.mx

¹ División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Comalcalco-Jalpa de Méndez Km 1, Comalcalco, Tabasco CP 86600, México

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México

Anexo 4-Presentaciones en congresos

AMIDIO
Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C.

XLI Encuentro Nacional de Ingenieros Químicos del Centro Nacional de Profesiones de Ingeniería Social

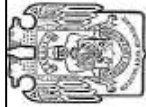
Otorga el presente
RECONOCIMIENTO
a:
BRÍGIDO JESÚS HIPÓLITO VALENCIA, JEAN BARAJAS FERNÁNDEZ

Por la presentación del trabajo:
ANÁLISIS DE UNA PLANTA DESALINIZADORA PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA FRESCA EN ACTIVIDADES AGRÍCOLAS
ID: 896

Dr. María del Socorro Jiménez Ruelas
PRESIDENTE DEL AMBIENTE DEL COMITÉ ORGANIZADOR

Dr. Efraim García
PRESIDENTE DEL COMITÉ TÉCNICO

Evento virtual del 22 al 24 de octubre 2020



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



8º SNIQBA 2019

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: Brígido Jesús Hipólito Valencia, Juan Barajas Fernández, José María Ponce Ortega.

Por la presentación oral del trabajo

"ANÁLISIS DE UNA PLANTA DESALINIZADORA PARA REDUCIR EL CONSUMO DE AGUA FRESCA EN ACTIVIDADES AGRÍCOLAS"

Durante el 8º Simposio Nacional de Ingeniería Química y Bioquímica Aplicada – 2º Foro de Procesos de Transformación de Hidrocarburos, que se llevó a cabo en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco del 4 al 6 de septiembre de 2019.



DIVISIÓN ACADÉMICA
MULTIDISCIPLINARIA DE
JALISCO DE MENDOZA

Dr. José Manuel Vázquez Rodríguez
Director



CONACYT



EDUCACIÓN



OTORGAN LA PRESENTE

CONSTANCIA

A: **Mtro. Brígido Hipólito Valencia**

Por su participación en la impartición del curso
"Introducción a la ingeniería asistida por computadora"
que se llevó a cabo del 13 al 17 de diciembre de 2021, con duración de 30 horas.

Mtra. Viridiana Sánchez Hernández
Directora de proyectos de FUNCODE AC



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Química

División de Estudios de Posgrado

A través de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo hace patente su

RECONOCIMIENTO

A:

M.C. Brígido Jesús Hipólito Valencia

Por su valiosa exposición con la Plática:

"Análisis de una planta desalinizadora para reducir el consumo de agua fresca en la agricultura"

Morelia, Mich. México
01 de Junio de 2021

ATENTAMENTE


Dr. José María Ponce Ortega

Jefe de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química



La Universidad Tecnológica de Querétaro otorga el presente

DIPLOMA

A:

BRIGIDO JESUS HIPOLITO VALENCIA

Por haber acreditado el Diplomado en el área de acceso al conocimiento de las matemáticas, impartido en el marco del Programa de Actualización y Capacitación Docente en la Nueva Escuela Mexicana de la Educación Media Superior. Realizado en línea del 09 de agosto de 2021 al 28 de noviembre de 2021, con una duración de 120 horas y una calificación final de 9.63

Folio: UTEQ-DAACM-2021-180
Querétaro, 3 de diciembre del 2021

 M. en C. José Carlos Arredondo Velázquez Rector de la UTEQ	 Dr. Alejandro Javier Díaz Barriga Casales Director del proyecto
 Mat. Andrés Alonso Flores Marín Coordinador académico	 Dra. Ma. Rosa Hernández Mondragón Coordinadora de facilitadores



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Química
División de Estudios de Posgrado



Constancia de Estancia virtual de Investigación

Por medio de la presente, se hace constar que el C. Brígido Jesús Hipólito Valencia estudiante de posgrado de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco con matrícula 172D20002 participó en la Estancia de Investigación Virtual, desarrollada en la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo con el grupo de trabajo liderado por el Dr. José María Ponce Ortega.

La estancia se llevó a cabo en modalidad 100% virtual, en respuesta a las disposiciones sanitarias implementadas durante la contingencia por COVID-19, en el periodo comprendido del 10 de agosto al 10 de diciembre del 2020.

Durante esta estancia, el estudiante desarrolló actividades de investigación tales como:

- Revisión y análisis de literatura científica en bases de datos especializadas.
- Procesamiento y análisis de información mediante herramientas digitales.
- Colaboración en reuniones virtuales de trabajo y seminarios académicos.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para los fines que estime convenientes.

Morelia, Mich. México
14 de diciembre 2020

ATENTAMENTE

Dr. José María Ponce Ortega
Jefe de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química



FLEXSIM

Flexsim México otorga el presente diploma a

HIPOLITO VALENCIA BRIGIDO JESUS

por haber completado exitosamente las 20 horas del

Curso Básico de Simulación con FlexSim

27 y 28 de junio de 2018. Villahermosa Tabasco, México.

Jpg. Julio Rosell Brufau.
Consultor Especialista FLEXSIM MEXICO

www.flexsim.com.mx



UNIVERSIDAD OLMECA

Raíz de Sabiduría

La Universidad Olmeca A. C. otorga la presente

Constancia

A: BRIGIDO JESUS HIPOLITO VALENCIA

Por su asistencia al

1er Encuentro Internacional sobre Energías Renovables y Sustentabilidad,
llevado a cabo del 25 al 27 de abril de 2018.

Ing. Naur Ávila Estrada

Director Académico de Ingenierías y Tecnologías

Villahermosa, Tabasco, abril de 2018

Alojamiento de la Tesis en el Repositorio Institucional	
Título de la Tesis:	Integración energética para una planta desalinizadora
Autor de la Tesis:	Brígido Jesús Hipólito Valencia
ORCID:	0009-0004-2553-2297
Resumen de la Tesis:	<p>El agua es un recurso esencial para la actividad agrícola, considerada la principal fuente de producción de alimentos que sustentan la vida humana. Sin embargo, los requerimientos de agua se han incrementado en todo el mundo originando sobreexplotación de los acuíferos. En este trabajo se analiza la desalinización del agua de mar como una opción para reducir el consumo de agua subterránea en zonas agrícolas con alta demanda hídrica. Se propone un modelo de programación no lineal entera mixta multiobjetivo multiperíodo basado en una superestructura que integra diversas configuraciones del sistema, empleando los solvers Lindoglobal, Conopt y CPLEX para su solución. En la superestructura se considera un ciclo Rankine integrado con sistemas energéticos, energía solar y combustibles fósiles, para satisfacer los requerimientos energéticos del proceso de desalinización y de la agricultura. La función multiobjetivo busca minimizar simultáneamente el consumo de agua subterránea y el costo anual total, que incluye los costos de capital y de operación. El costo de capital abarca los costos del área de captación, proceso de desalinización, ciclo de potencia y bombas. Los costos operativos.</p>

	<p>consideran los costos de bombeo, y el consumo de combustibles fósiles, del agua subterránea y del agua desalinizada. El modelo de optimización se aplicó a un caso de estudio del estado de Sonora, México, donde se evaluaron tres escenarios económicos y ambientales mediante una curva Pareto, mostrando un ahorro máximo de hasta 60% en el consumo de agua subterránea. La formulación es general y adaptable a otros contextos con escasez hídrica.</p>
Palabras claves de la Tesis:	Optimización, Desalinización, Reúso de Agua
Referencias citadas:	Ver páginas de la 78 a 85.