



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DEL NEXO AGUA-ENERGÍA-
ALIMENTOS EN LOS SECTORES INDUSTRIA, AGRICULTURA Y
USO DOMÉSTICO EN SONORA CON DIFERENTES ESQUEMAS DE
JUSTICIA DE REPARTICIÓN DE BIENES”**

TESIS presentada por:

I.Q. ISAAC CASTRO MACIEL

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

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

ASESOR:

Dr. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA

COASESOR:

Dr. RAMÓN GONZÁLEZ BRAVO

Resumen

Debido al crecimiento de la población constante, así como al moderno estilo de vida, el satisfacer las necesidades de agua, energía y alimentos representa uno de los principales problemas de la sociedad actual alrededor del mundo. Tomando en cuenta el pronóstico del crecimiento poblacional global, así como los nuevos desarrollos tecnológicos que alteran el estilo de vida y demandan una mayor necesidad de energía, saciar la demanda de agua, energía y alimentos será cada vez más difícil. Estos tres recursos son indispensables para la sociedad moderna, sin embargo no son ilimitados. Es así, que la interacción entre los procesos involucrados en estos sectores es contundente, y los cambios en uno tiene un impacto significativo en los demás. Es por esto que el Nexo Agua-Energía-Alimentos representa uno de los retos más importantes que la sociedad moderna enfrenta. De igual modo, los tomadores de decisiones deben considerar múltiples entes involucrados. Por lo tanto, para resolver este sistema complejo es necesario desarrollar una planificación estratégica a través de un modelo de optimización multiobjetivo considerando distintos esquemas de justicia para la repartición de los bienes, acotándolo a un nivel macroscópico, lo cual es el propósito de esta tesis.

Palabras clave: Zona macroscópica, Recursos, Justo, Simulación, Crecimiento poblacional

Abstract

Due to exponential population growth and the modern lifestyle it is difficult to satisfy our needs such as water, food, and energy. Therefore satisfying these needs is a major problem for the society around the earth. The current tech development and gadgets which modify our lifestyle, but most important the transport industry demand more energy which derives in a major scarcity of resources to fulfill everyone's demand. Besides this, water, energy and food are not an unlimited source. There is a strong link among these three resources. Producing and transporting these sources impact severely on the environment. Therefore the Water-Energy-Food Nexus is one of the most important challenges that we have to deal with in the upcoming years. Likewise, stakeholders must consider multiples entities involved. So be it, to solve this complex system it is necessary to develop a thorough strategy through a multiobjective optimization model considering different approaches (asset distribution justice schemes) limiting it to a macroscopic level, which is the purpose of this thesis.

ÍNDICE

Resumen	III
Abstract	IV
Índice de tablas	VII
Índice de figuras	VIII
Agradecimientos	X
Capítulo 1.-Introducción	1
1.1 Justificación de la investigación	3
1.2 Definición del problema	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivos	4
1.4.1 Objetivo general	4
1.4.2 Objetivos particulares	4
Capítulo 2.-Marco teórico	5
2.1 Nexo agua-energía-alimentos	5
2.2 Superestructura	6
2.3 Simulación	6
2.4 Optimización	6
2.5 Optimización multiobjetivo	7
2.6 GAMS®	7
2.7 Desarrollo sostenible	7
2.8 Esquema de justicia de Nash	7

2.9 Esquema de justicia de Rawlsian	8
2.10 Esquema de justicia <i>Social Welfare</i>	8
Capítulo 3.-Metodología	9
3.1 Nomenclatura	10
3.1.1 Subíndices	10
3.1.2 Parámetros	11
3.1.3 Variables positivas	17
3.1.4 Variables	22
3.1.5 Variables binarias	24
3.1.6 Funciones objetivo	27
3.1.7 Ecuaciones más representativas	28
Capítulo 4.-Resultados	36
4.1.-Caso de estudio	36
4.1.1 Caso 1	39
4.1.2 Caso 2	48
4.1.3 Caso 3	56
Conclusiones	65
Bibliografía	66

Índice de tablas

Tabla 4.1. Resultados máximos y mínimos de las funciones objetivo.	37
Tabla 4.2. Resultados de la optimización del Caso 1.	39
Tabla 4.3. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 1-Nash.	45
Tabla 4.4. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 1-Rawlsian.	46
Tabla 4.5. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 1- <i>Social Welfare</i> .	47
Tabla 4.6. Valores obtenidos en el Caso 2.	48
Tabla 4.7. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 2-Nash.	54
Tabla 4.8. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 2-Rawlsian.	55
Tabla 4.9. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 2- <i>Social Welfare</i> .	55
Tabla 4.10. Valores obtenidos en el Caso 3.	56
Tabla 4.11. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 3-Nash.	62
Tabla 4.12. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 3-Rawlsian.	63
Tabla 4.13. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 3- <i>Social Welfare</i> .	64

Índice de figuras

Figura 2.1. Interrelación del nexo Agua-Energía-Alimentos.	5
Figura 2.2. Ejemplo de una superestructura.	6
Figura 3.1. Representación de la superestructura del caso de estudio.	9
Figura 4.1. Mapa de la región de Sonora donde se ubica el caso de estudio.	36
Figura 4.2. Representación 3D de los valores del Caso 1.	39
Figura 4.3. Vista 2D del Caso 1 con ejes ONJOBS y WEFPROFIT.	40
Figura 4.4. Vista 2D del Caso 1 con los ejes OGHGE y WEFPROFIT.	40
Figura 4.5. Vista en 2D del Caso 1 con ejes ONJOBS y OGHGE.	41
Figura 4.6. Estructura resultante de la optimización del Caso 1 mediante el esquema de Nash.	42
Figura 4.7. Estructura del Caso 1-Rawlsian.	43
Figura 4.8. Estructura del Caso 1- <i>Social Welfare</i> .	44
Figura 4.9. Representación en 3D del Caso 2.	48
Figura 4.10. Valores del Caso 2 en 2D con los ejes en FNPROFIT y WNPROFIT.	49
Figura 4.11. Representación 2D del Caso 2 con ejes en ENPROFIT y WNPROFIT.	49
Figura 4.12. Valores del Caso 2 vistos en 2D con ejes en FNPROFIT y ENPROFIT.	50
Figura 4.13. Estructura resultante del Caso 2-Nash.	51
Figura 4.14. Estructura del Caso 2-Rawlsian.	52
Figura 4.15. Estructura del Caso 2- <i>Social Welfare</i> .	53
Figura 4.16. Representación 3D del Caso 3.	57
Figura 4.17. Representación 2D del Caso 3 con los ejes FNPROFIT y WNPROFIT.	57
Figura 4.18. Representación del Caso 3 en 2D con ejes en ENPROFIT y WNPROFIT.	58
Figura 4.19. Valores del Caso 3 en 2D con ejes en FNPROFIT y ENPROFIT.	58

Figura 4.20. Estructura resultante del Caso 3-Nash.	59
Figura 4.21. Estructura del Caso 3-Rawlsian.	60
Figura 4.22. Estructura resultante del Caso 3- <i>Social Welfare</i> .	61

Agradecimientos

Quiero agradecer primero a Dios, por las personas que ha puesto en mi camino. Por lo que me ha dado y lo que me ha quitado.

En segunda instancia, mi familia nuclear, Victoria Asai Vargas Ponce de León, mi amor, gracias por todo el apoyo incondicional que me has brindado para llevar a cabo este proyecto, gracias por confiar en mí, gracias por tus apapachos y reproches. Ariadna Eugenia Castro Vargas, hija mía, eres mi combustible para seguir día a día, tu bella sonrisa es reconfortante para mi cansancio y estoy muy agradecido con la vida por la familia que me dio y que poco a poco con sacrificios hemos formado. Gracias familia. ¡Las amo! (También a ti Fulanillo (a)).

Mis padres, María Eugenia Maciel Cornejo y Juan Bosco Gerardo Castro Aguilar, se merecen mi total agradecimiento también por su ardua labor como guías, confidentes y base sólida desde la cual he podido escalar. Sé que han hecho todo lo que ha estado en sus manos para ayudarnos (a los tres) y estoy infinitamente agradecido por ello. Son mis héroes. ¡Los amo!

A mis hermanos, Aarón Castro Maciel y Amós Castro Maciel, por su apoyo, aún en la distancia, sé que están presentes conmigo, mientras no los olvide, viven en mi corazón y mi mente. Gracias por lo que hacen por mi familia.

A mi asesor, Dr. José María Ponce Ortega, por su esmero en ayudarme y guiarme a través de estos dos años. Por su comprensión y paciencia ¡muchas gracias! Puedo decir con total certeza que escogí adecuadamente a mi asesor y mentor.

Finalmente, pero no por eso menos importante, quiero agradecer a Ulises Carranza Nuñez (así, sin tilde) y a Iris Rojas Sandoval porque fueron un apoyo durante toda la maestría, supieron comprender mi situación familiar y estar allí cuando más necesitaba un amigo. Y por eso, les estoy muy agradecido por siempre.

Capítulo 1.-Introducción

El aumento poblacional, la globalización y la demanda excesiva de agua, energía y alimentos en los últimos años han logrado disminuir la existencia de éstos. Actualmente la mayoría de las regiones en el mundo carecen de alguno de estos recursos y se prevé que esta problemática se intensifique en los próximos años (Taniguchi, Masuhara, & Burnett, 2017). La satisfacción de la demanda será un gran reto debido al incremento acelerado de la población, al desarrollo económico, la urbanización y los efectos del cambio climático (Gurdak, Geyer, Nanus, Taniguchi, & Corona, 2017). Veamos como ejemplo a la Ciudad del Cabo en Sudáfrica que podría convertirse en la primer ciudad del mundo sin agua (BBC, 2018). Por esto es de suma importancia analizar la interconexión que hay entre estos recursos y su demanda, que principalmente es la agricultura, la industria y la sociedad, para poder proponer una forma óptima del aprovechamiento de los mismos.

El nexo Agua-Energía-Alimentos (AEA) es un concepto relativamente nuevo que considera que la producción y el consumo de estos recursos están íntimamente ligados (Miralles-Wilhelm, 2016; Zheng & Zecchin, 2014). Por ejemplo, la agricultura es el consumidor más grande de agua fresca en el mundo y representa un poco más de un cuarto de la energía usada en la producción de alimentos. Las conexiones entre estos tres recursos requieren una solución integral que garantice la satisfacción de la demanda de agua, energía y alimentos globalmente.

La importancia del nexo AEA es comprender la interconexión, dependencias y compensaciones asociadas a cada sector. Por lo tanto, debido a su complejidad la implementación del nexo no ha sido incorporada adecuadamente para el desarrollo sustentable, ya hay versiones básicas que evalúan el nexo AEA (FAO, 2018).

Hay algunos trabajos de optimización elaborados anteriormente como: nexo agua-energía (Dahdah & Mitsos, 2014; Gao & You, 2015; Lira-Barragán, Ponce-Ortega, Serna-González, & El-Halwagi, 2013; Yang, Grossmann, Mauter, & Dilmore, 2015), nexo energía-alimentos (D. J. Garcia & F. You, 2015; Gebreslassie, Waymire, & You, 2013; Martínez-Guido, Betzabe González-Campos, Ponce-Ortega, Nápoles-Rivera, & El-Halwagi, 2016; Yue, Pandya, & You, 2016) y nexo agua-alimentos (Arredondo-Ramírez et al., 2015; Li & Guo, 2014; Morankar, Srinivasa Raju, & Nagesh Kumar, 2013), pero poco estudio que involucre los tres recursos como

un solo ente. Recientemente Kursun et al. (Kursun, Bakshi, Mahata, & Martin, 2015) presentaron un análisis de un nexo AEA para abastecer energía en una zona rural considerando diferentes opciones de generación como: celdas fotovoltaicas, biomasa y formas convencionales. El análisis considera el uso de agua y tierra tanto como sus emisiones. Su estudio demostró que incrementos futuros en la demanda de energía requerirán el uso de fuentes alternativas. García y You (D. Garcia & F. You, 2015) propusieron una optimización del ciclo de vida de los procesos basados en energía, su metodología se basó en la evaluación del impacto en el agua de distintos caminos en el proceso de energía. Sus resultados muestran que la tecnología de bioconversión es crucial para reducir el consumo de agua. Damerou et al. (Damerou, Patt, & van Vliet, 2016) mostraron un estudio del uso de agua en el sector agrícola y energético desde el enfoque de optimización lineal. El objetivo de dicho modelo fue determinar la variación de la demanda del agua asociada a la producción de energía y alimentos. Se obtuvo que de seguir con la tendencia actual de producción de alimentos y energía reducirán el consumo de agua a menos que la producción de energía tenga un 7% de biocombustibles, en cuyo caso se duplicaría el consumo de agua. Zhang et al. (Zhang et al., 2017) evaluaron el impacto de las sequías en la producción de alimento, su estrategia se basó en una combinación de un modelo de simulación de cosecha y un modelo de optimización de energía. El estudio multiobjetivo reveló que el punto óptimo no es en el que se obtiene la mayor cantidad de cosecha. Jalilov et al. (Jalilov, Amer, & Ward, 2018) analizaron el nexo AEA en Asia central, donde hay competencia y conflictos de intereses entre los países circundantes por las actividades económicas de energía e irrigación y la protección ambiental, se usó un modelo empírico de optimización para mejorar el bienestar de Tayikistán, Uzbekistán, Afganistán y Turkmenistán. González-Bravo et al. (González-Bravo, Saucedo-Valenzuela, Mahlkecht, Rubio-Castro, & Ponce-Ortega, 2018) estudiaron el nexo agua-energía-alimentos en una región de Sonora usando una optimización multiobjetivo y un esquema de reparto (*Social Welfare*). Sampat y Zavala (Sampat & Zavala, 2019) hicieron un análisis de varios esquemas de repartición de las utilidades, donde demostraron que el esquema de *Social Welfare* puede ser muy injusto a la hora de repartir o darle preferencia a algún participante. Munguía-López et al. (Munguía-López, Sampat, Rubio-Castro, Ponce-Ortega, & Zavala, 2019) hicieron uso de tres esquemas de repartición de utilidades enfocados a un sistema representativo de un campo de agricultura en Sonora, donde se aprecia que aunque el esquema de *Social Welfare* tiene las mejores utilidades, es deficiente en el sentido de que hay múltiples configuraciones que dan ese

resultado, sin embargo los esquemas de Nash y Rawlsian tienen utilidades decentes y una sola configuración.

Como se aprecia en lo arriba mencionado ha habido varios intentos o acercamientos para modelar la interacción del nexo Agua-Energía, Agua-Alimentos, Energía-Alimentos y los tres juntos AEA, ninguno ha usado varios esquemas de repartición de justicia. En este trabajo se analiza un nexo AEA y se optimiza con varios objetivos y usando tres esquemas de repartición de utilidades: *Social Welfare*, Nash y Rawlsian.

1.1 Justificación de la investigación

El aumento en la población y la industrialización está generando crisis en el abastecimiento de agua, energía y alimentos, por ello es necesario optimizar su producción, distribución y consumo. El problema principal al tratar de optimizar este nexo es que una alterativa para satisfacer alguna de estas necesidades puede afectar los recursos y la posibilidad para satisfacer otra de estas demandas, más aún una solución atractiva respecto de un criterio específico puede ser mala o pésima respecto de otro criterio, ya que prácticamente en cualquier cadena de valor están altamente relacionadas. En este contexto, es muy importante desarrollar una metodología de optimización que permita considerar todas las interacciones del nexo para buscar satisfacer las necesidades futuras diversos criterios de sustentabilidad. El nexo AEA presenta oportunidades de estudio altamente prometedoras y, hasta el momento, la integración de los tres recursos ha sido escasamente estudiada a pesar de que son consumidos diariamente.

1.2 Definición del problema

Este proyecto propondrá un sistema óptimo de generación, distribución y destino final de agua, energía y alimentos para la industria, agricultura y uso doméstico de acuerdo a sus demandas, los diferentes aspectos de la sustentabilidad a través de un modelo de optimización multiobjetivo con diferentes esquemas de justicia de repartición de bienes.

1.3 Hipótesis

Si se establecen diferentes esquemas de justicia de repartición de bienes al nexo AEA, tomando en cuenta las funciones objetivos, se obtendrán las redes óptimas para cada esquema de repartición, donde se podrá comparar la diferencia entre cada esquema y satisfacer las necesidades de la industria, la agricultura y los usuarios domésticos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Proponer una metodología para determinar las redes óptimas para conocer la cantidad de energía, agua y alimentos a producir, a distribuir y a desechar para satisfacer las demandas entre industrias, agricultura y uso doméstico en una región macroscópica considerando una distribución justa de los recursos.

1.4.2 Objetivos particulares

- Determinar los factores que permitan satisfacer las necesidades de los sectores involucrados.
- Obtener diferentes perspectivas de análisis de la región de estudio para evaluar su viabilidad mediante distintos esquemas de justicia.
- Desarrollar una metodología para la evaluación del sistema por diferentes esquemas de justicia.
- Analizar las soluciones obtenidas por los diferentes esquemas de justicia.

Capítulo 2.-Marco teórico

2.1 Nexo agua-energía-alimentos

La relación que existe entre los recursos agua, energía y alimentos es muy estrecha. Para producir alimentos se requiere una cantidad inmensa de agua para irrigar el campo, cerca del 70% del agua dulce a nivel mundial es usado para fines de agricultura y en algunos países en vías de desarrollo ese porcentaje puede aumentar hasta un 90% (WWAP, 2017b). De la misma manera para generar electricidad se requieren cantidades cercanas al 15% del agua dulce para enfriamiento de plantas de poder, extracción de gas shale y otros combustibles, además de la producción de biomasa (Tsolas, Karim, & Hasan, 2018; WWAP, 2017a). Por otra parte para llevar el agua dulce hasta los usuarios se requiere de 3% de la energía generada (Martinez-Hernandez, Leach, & Yang, 2017), hasta el 20% de la energía a nivel mundial es generada a partir de la industria hidroeléctrica (WWAP, 2017a). También en la situación actual se usa energía para desalinizar el agua de mar, lo que aumenta la demanda de energía hasta el 8% (Tsolas et al., 2018). Esta agua que es llevada hasta los usuarios para el uso cotidiano representa entre el 10 y 20% del agua dulce total (WWAP, 2017b). Por otra parte, cerca del 30% de la energía es requerida para la producción y distribución de la comida. La comida cultivada representa cerca del 70% del consumo humano y hoy cada vez más se usan los alimentos para generar energía como biocombustibles, alrededor del 2% de los cultivos (Paschalidou, Tsatiris, & Kitikidou, 2016). El uso de la biomasa para generar energía representa un 14% de la energía global (Paschalidou et al., 2016). Como se puede apreciar, los tres bienes están íntimamente ligados. (Ver **Figura 2.1**)



Figura 2.1. Interrelación del nexo Agua-Energía-Alimentos.

2.2 Superestructura

Una superestructura (ver **Figura 2.2**) es la representación gráfica de la interacción entre las partes que se analizarán, se debe detallar bien la interacción ya que de eso depende que el resultado de la optimización sea la adecuada. Una superestructura contempla una cantidad “infinita” de soluciones, pero es importante definir los parámetros adecuados para obtener el resultado óptimo.

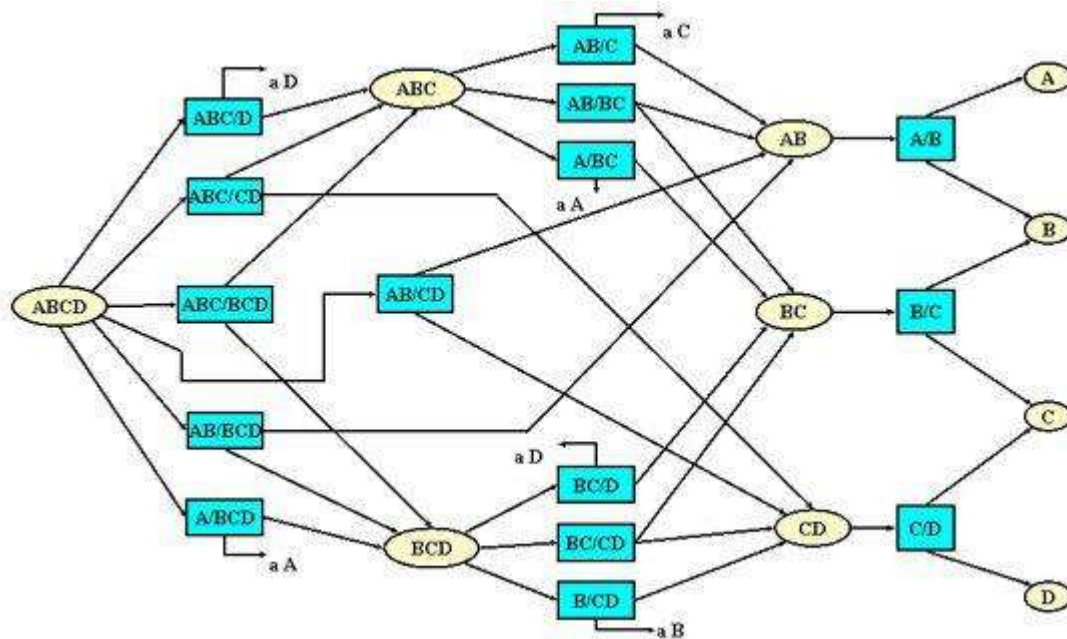


Figura 2.2. Ejemplo de una superestructura.

2.3 Simulación

La simulación es la experimentación teórica de un fenómeno modelado. Cuando un fenómeno se ha modelado, es decir, transportado a ecuaciones matemáticas, se puede experimentar teóricamente para ver el comportamiento del fenómeno cuando se alteran algunas variables, eso es simular.

2.4 Optimización

Optimización es el análisis de varias opciones para llevar a cabo una tarea y elegir la que genera los mejores resultados con base a los parámetros preestablecidos. Esta tarea no siempre genera el mismo escenario óptimo, todo depende de lo que se desea optimizar. Cuando se habla de optimización hablamos de minimizar y/o maximizar el sistema. La optimización es de suma

importancia como indicador para la toma de decisiones, ya que su principal objetivo es el de definir la mejor opción.

2.5 Optimización multiobjetivo

La optimización multiobjetivo corresponde a un problema de optimización donde intervienen simultáneamente varias funciones objetivo, dado que se tiene más de una función que optimizar, se suelen generar problemas tales como que, si se minimiza o maximiza una función, otra función se ve afectada. Es por eso que cuando se usa este tipo de optimización es necesario definir una situación de compromiso que genere una situación aceptable para todas las funciones involucradas. No siempre se llega a un balance, hay casos en las que no conviene llegar a la situación de compromiso sino omitir una función objetivo, eso depende de los tomadores de decisiones.

2.6 GAMS®

General Algebraic Modeling System (GAMS) es un software de optimización de alto nivel para el modelado de sistemas para la optimización matemática, está diseñado para modelar y resolver problemas lineales, no lineales y optimización entera mixta. Fue el primer lenguaje de modelado algebraico comercial.

2.7 Desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible se define como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCED, 1987). De este artículo (WCED, 1987) se han derivado cuatro lineamientos: Proteger a largo plazo la sustentabilidad ecológica, satisfacer las necesidades humanas básicas y la fomentación de equidad intrageneracional e intergeneracional. Estos lineamientos básicos son inapelables. En adición a éstos, Høyer (Høyer, 2000) presentó unos lineamientos secundarios que incluyen: Preservar el valor intrínseco de la naturaleza, fomentar la protección del medio ambiente, impulsar la participación pública y satisfacer las aspiraciones para tener una mejor calidad de vida (Holden, Linnerud, & Banister, 2014).

2.8 Esquema de justicia de Nash

El esquema de justicia de Nash viene de la teoría de juegos de economía. Busca el equilibrio de una transacción, de manera que sea lo más justa posible. Recientemente se ha incorporado este

concepto a la optimización. La ubicación del punto de Nash se encuentra al optimizar el producto de las funciones objetivo, ya que su definición matemática es la media geométrica. La media geométrica es la raíz “n” de los productos de “n” números, por ejemplo: la media geométrica de 1, 3 y 9 sería $\sqrt[3]{1 * 3 * 9} = 3$. Y esto se modela como un productorio de los elementos. $NJS = \prod_z f_z$ (Sampat & Zavala, 2019). Nash ofrece algunas ventajas con respecto a otros esquemas, por ejemplo, es una función monótona, esto quiere decir que crece o decrece pero no ambas, lo que genera máximos y mínimos absolutos. Es una función cóncava, lo que da simetría también.

2.9 Esquema de justicia de Rawlsian

De acuerdo a Rawls (Rawls, 1971) la repartición de bienes debe ser tal que, el mayor beneficio se le otorgue al que menos tenga. Rawls propone maximizar la menor utilidad. Es probable que no haya una única solución. Y no es un esquema simétrico, pero busca beneficiar al más necesitado. Este esquema se modela haciendo que la función Rawlsian sea mayor que las funciones objetivo (después de normalizar las funciones, sí y sólo si, 0 es el mejor escenario y 1 el peor), de esta manera se obtienen valores alejados del óptimo pero, es una forma de acercarse al menos favorecido.

2.10 Esquema de justicia *Social Welfare*

Este esquema es el más usado actualmente (Sampat & Zavala, 2019), el esquema suma las funciones objetivo y optimiza la suma de las funciones. Dentro de sus propiedades tiene que es monótona ascendente, pero por ser una función afín (es decir, que tiene traslaciones lineales) no tiene una única solución (Munguía-López, Sampat, Rubio-Castro, Ponce-Ortega, & Zavala, 2019) lo que lleva a ambigüedad a la hora de repartir los bienes.

Capítulo 3.-Metodología

La **Figura 3.1** presenta la superestructura que incluye 5 presas: El novillo, Álvaro Obregón, Ignacio L.A., Abelardo L. Rodríguez y El molinito, varios pozos acuíferos distribuidos por las ciudades de Hermosillo, Valle Yaqui y Guaymas. Hay dos plantas de potencia desaladoras existentes (Guaymas y Puerto Libertad) y dos posibles localizaciones para construir otras plantas de potencia (La costa de Hermosillo y el Valle de Yaqui). Tenemos estaciones donde se concentran los recursos para distribuirlos después a su sector específico, así hay: estación doméstica, agrícola e industrial. El sector doméstico incluye tres ciudades: Hermosillo, Obregón y Guaymas, a estas hay que suministrarles agua, energía y alimentos. El sector agrario está conformado por cuatro campos de cultivo: DR-51, DR-41, DR-18 y DR-84, este sector necesita agua y energía y provee de alimentos. El último sector es el industrial y está formado por: Hermosillo, Obregón y Guaymas, este sector requiere agua y energía.

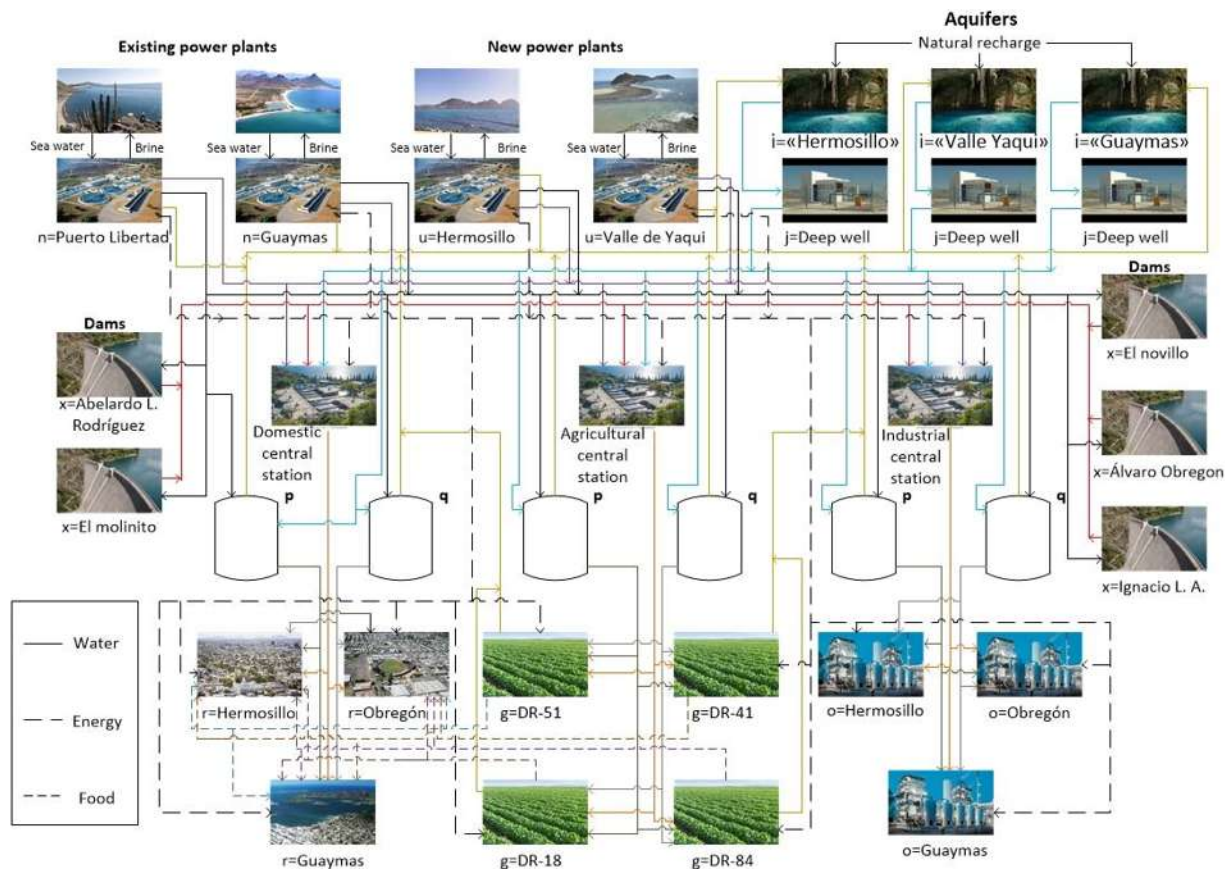


Figura 3.1. Representación de la superestructura del caso de estudio.

El modelo que representa esta superestructura es bastante complejo, en la siguiente sección se enlista el modelo matemático.

3.1 Nomenclatura

3.1.1 Subíndices

b	Biocombustibles. (Biomasa, biogás, biodiesel y bioetanol).
c	Cultivos. (Maíz, trigo y uva).
f	Combustibles fósiles. (Carbón, petróleo y gas natural).
g	Región agrícola. (DR-18, DR-41, DR-51, DR-84).
i	Representa los acuíferos existentes. (Hermosillo, Valle de Yaqui y Guaymas).
j	Son los pozos de cada región.
n	Ubicación de las plantas de potencia desaladoras existentes. (Puerto Libertad y Guaymas).
o	Región industrial. (Hermosillo, Obregón y Guaymas).
p	Ubicación existente para tanques de almacenamiento de agua.
q	Ubicación posible para tanques de almacenamiento de agua.
r	Región doméstica. (Hermosillo, Obregón y Guaymas).
s	Energía solar.
t	El tiempo distribuido en meses.
u	Posible ubicación para nuevas plantas de potencia desaladoras. (Hermosillo y Valle de Yaqui).
x	Presas de agua existentes. (Abelardo L. Rodríguez, El molinito, El novillo, Álvaro Obregón, Ignacio L. A.).
z	Función objetivo normalizada.

3.1.2 Parámetros

α	Factor de depreciación.
AEC_t	Costo de la energía para el sector agrícola en el tiempo “t”. (MD/GW).
$APC1_g$	Costo de las tuberías para la estación agrícola “g” (MD).
$ATot_u^{\max}$	Área máxima del colector solar “u” (m ²).
$ATot_u^{\min}$	Área mínima del colector solar “u” (m ²).
β	Factor de producción de concentrado en las plantas de potencia.
$B_{n,i}^{E,des,max}$	Valor máximo del flujo de agua de la planta de potencia existente “n” hacia el acuífero “i” (Mm ³ /año).
$B_{u,i}^{N,des,max}$	Valor máximo del flujo de agua de la planta de potencia posible “u” hacia el acuífero “i” (Mm ³ /año).
$d_{g,j}^{agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua del pozo “j” a la estación agrícola “g” (Mm ³ /año).
$d_{r,j}^{dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua del pozo “j” a la estación doméstica “r” (Mm ³ /año).
DEC_t	Costo de la energía para el sector doméstico en el tiempo “t” (MD/GW).
$D_{n,p}^{E,Esto,max}$	Valor máximo de flujo de agua al tanque de almacenamiento existente “p” desde la planta de potencia existente “n” (Mm ³ /año).

$D_{n,q}^{E,Nsto,max}$	Valor máximo de flujo de agua al tanque de almacenamiento posible “q” desde la planta de potencia existente “n” (Mm ³ /año).
$d_{o,j}^{ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua del pozo “j” a la estación industrial “o” (Mm ³ /año).
$D_{u,p}^{N,Esto,max}$	Valor máximo de flujo de agua al tanque de almacenamiento existente “p” desde la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$D_{u,q}^{N,Nsto,max}$	Valor máximo de flujo de agua al tanque de almacenamiento posible “q” desde la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$DPC1_r$	Costo de tubería para la estación doméstica “r” (MD).
ε_c^{Fcrop}	Factor de consumo de fertilizantes por el cultivo “c” (ton fertilizante/ton cultivo).
$FCV_{c,g,t}$	Valor del cultivo “c” del campo “g” en el tiempo “t” (MD/ton cultivo).
FCF	Factor de consumo de combustible (GJ/Gm ³).
γ	Factor de depreciación del área de colección solar.
GEP	Factor de producción de energía eléctrica (GW/Mm ³).
$G_{n,x}^{E,rel,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la presa “x” desde la planta de potencia existente “n” (Mm ³ /año).
$GHGE_b^B$	Costo del biocombustible “b” (MD/GJ).
$GHGE_f^F$	Costo del combustible “f” (MD/GJ).
$GHGES$	Emisiones de CO ₂ del colector solar (ton CO ₂).

$G_{u,x}^{N,rel,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la presa “x” desde la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$h_g^{agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación agrícola “g”.
$h_r^{dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación doméstica “r”.
$h_o^{ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación industrial “o”.
H_y	Tiempo de operación.
IEC_t	Costo de la energía en el sector industrial en el tiempo “t” (MD/GW).
$IPC1_o$	Costo de tubería para la estación industrial “o” (MD).
KF	Factor para anualizar el costo (1/año).
$\Lambda_{c,g}^{food,max}$	Requerimientos de tierra máximo por cultivo “c” en el distrito “g” (ha).
$\Lambda_{c,g}^{food,min}$	Requerimientos de tierra mínimo por cultivo “c” en el distrito “g” (ha).
$\lambda_{c,g}^{food}$	Factor de producción de la tierra para el cultivo “c” en el distrito “g” (ha/ton).
$M_x^{Dam,zero}$	Estado inicial de la presa “x” (Mm ³)
$NJob_b^B$	Número de empleos generados por el uso del biocombustible “b”.
$NJob_f^F$	Número de empleos generados por el uso del combustible “f”.
$NJob^{Solar}$	Número de empleos generados por el uso del colector solar.

pca	Porcentaje de filtración agrícola.
$\Phi_{c,g,t}^{food,max}$	Producción máxima del cultivo “c” en el distrito “g” en el tiempo “t” (ton).
$\Phi_{c,g,t}^{food,min}$	Producción mínima del cultivo “c” en el distrito “g” en el tiempo “t” (ton).
$\Phi_{c,g,t}^{food}$	Factor de consume de agua por el cultivo “c” en el distrito “g” en el tiempo “t” (Mm ³ /ton).
$R_{i,t}^{aq}$	Recarga natural del acuífero “i” en el tiempo “t” (Mm ³).
$R_{x,t}^{Dam}$	Recarga natural de la presa “x” en el tiempo “t” (Mm ³).
$S_{p,g}^{E,agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación agrícola “g” desde el tanque de almacenamiento existente “p” (Mm ³ /año).
$S_{p,i}^{E,aq,max}$	Valor máximo de flujo de agua al acuífero “i” desde el tanque de almacenamiento existente “p” (Mm ³ /año).
$S_{p,r}^{E,dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación doméstica “r” desde el tanque de almacenamiento existente “p” (Mm ³ /año).
$S_{p,o}^{E,ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación industrial “o” desde el tanque de almacenamiento existente “p” (Mm ³ /año).
$S_{q,g}^{N,agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación agrícola “g” desde el tanque de almacenamiento posible “q” (Mm ³ /año).
$S_{q,i}^{N,aq,max}$	Valor máximo de flujo de agua al acuífero “i” desde el tanque de almacenamiento posible “q” (Mm ³ /año).

$S_{q,r}^{N,dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación doméstica “r” desde el tanque de almacenamiento posible “q” (Mm ³ /año).
$S_{q,o}^{N,ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua a la estación industrial “o” desde el tanque de almacenamiento posible “q” (Mm ³ /año).
$Sto_p^{E,max}$	Capacidad de almacenamiento máxima de los tanques existentes (Mm ³).
$Sto_p^{E,zero}$	Estado inicial de los tanques de almacenamiento existentes (Mm ³).
$Sto_q^{N,zero}$	Estado inicial de los tanques de almacenamiento posibles (Mm ³).
$\Theta_u^{pdes,max}$	Capacidad máxima de la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$\Theta_u^{pdes,min}$	Capacidad mínima de la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$\Theta_q^{Sto,max}$	Capacidad máxima del tanque de almacenamiento posible “q” (Mm ³).
$\Theta_q^{Sto,min}$	Capacidad mínima del tanque de almacenamiento posible “q” (Mm ³).
UCF_c	Costo unitario de los fertilizantes para el cultivo “c” (MD/ton fertilizante).
$UTC_{c,g}^{food}$	Costo unitario de transportación para el cultivo “c” del distrito “g” (MD/ton).
VCL_c	Costo unitario de mano de obra para el cultivo “c” (MD/ha).

$V_{n,g}^{E,agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación agrícola “g” desde la planta de potencia existente “n” (Mm ³ /año).
$V_{n,r}^{E,dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación doméstica “r” desde la planta de potencia existente “n” (Mm ³ /año).
$V_{n,o}^{E,ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación industrial “o” desde la planta de potencia existente “n” (Mm ³ /año).
$V_{u,g}^{N,agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación agrícola “g” desde la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$V_{u,r}^{N,dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación doméstica “r” desde la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
$V_{u,o}^{N,ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación industrial “o” desde la planta de potencia posible “u” (Mm ³ /año).
WAC_t	Costo de agua para el sector agrícola en el tiempo “t” (MD/Mm ³).
$W_{x,g}^{agr,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación agrícola “g” desde la presa “x” (Mm ³ /año).
$W_i^{aq,zero}$	Estado inicial del acuífero “i” (Mm ³).
WDC_t	Costo de agua para el sector doméstico en el tiempo “t” (MD/Mm ³).
$W_{x,r}^{dom,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación doméstica “r” desde la presa “x” (Mm ³ /año).
WIC_t	Costo de agua para el sector industrial en el tiempo “t” (MD/Mm ³).

$W_{x,o}^{ind,max}$	Valor máximo de flujo de agua hacia la estación industrial “o” desde la presa “x” (Mm ³ /año).
Z_3	Costo fijo de instalación 3 para la planta de potencia desaladora (MD).
Z_4	Costo fijo de instalación 4 para la planta de potencia desaladora (MD).
Z_5	Costo fijo de operación 5 para la planta de potencia desaladora posible (MD).
Z_6	Costo fijo de operación 6 para la planta de potencia desaladora existente (MD).
Z_1^{Solar}	Costo fijo de instalación del colector solar 1 (MD).
Z_2^{Solar}	Costo fijo de instalación del colector solar 2 (MD).
Z_3^{Solar}	Costo fijo de instalación del colector solar 3 (MD).

3.1.3 Variables positivas

$a_{i,j,t}^{dw}$	Agua extraída del pozo profundo “j” que proviene del acuífero “i” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$B_{n,i,t}^{E,des}$	Recarga del acuífero “i” de agua proveniente de las plantas de potencia desaladoras existentes “n” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$B_{u,i,t}^{N,des}$	Recarga del acuífero “i” de agua proveniente de las nuevas plantas de potencia desaladoras “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).

$B_{u,t}^{N,rej}$	Agua enviada al mar como concentrado proveniente de las plantas de potencia desaladoras nuevas “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{g,j,t}^{agr}$	Agua enviada a la estación de distribución agrícola “g” desde el pozo “j” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{r,j,t}^{dom}$	Agua enviada a la estación de distribución doméstica “r” desde el pozo “j” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{n,p,t}^{E,Esto}$	Agua proveniente de las plantas de potencia desaladoras existentes “n” hacia los tanques de almacenamiento existentes “p” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{n,q,t}^{E,Esto}$	Agua proveniente de las plantas de potencia desaladoras existentes “n” hacia los tanques de almacenamiento posibles “q” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{o,j,t}^{ind}$	Agua enviada a la estación de distribución industrial “o” desde el pozo “j” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{u,p,t}^{N,Esto}$	Agua proveniente de las plantas de potencia desaladoras posibles “u” hacia los tanques de almacenamiento existentes “p” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$d_{u,q,t}^{N,Esto}$	Agua proveniente de las plantas de potencia desaladoras posibles “u” hacia los tanques de almacenamiento posibles “q” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$E Production_{u,t}^N$	Energía generada en las plantas de potencia desaladoras posibles “u” en el tiempo “t” (GW).

$F_{i,t}^{agr}$	Recarga de agua de los mantos acuíferos “i” debido a la filtración de la zona agrícola en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$G_{n,x,t}^{E,rel}$	Recarga de agua de las presas “x” desde las plantas de potencia desaladoras existentes “n” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$G_{u,x,t}^{N,rel}$	Recarga de agua de las presas “x” desde las plantas de potencia desaladoras posibles “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$h_{g,t}^{agr}$	Agua total en la estación de distribución agrícola “g” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$h_{r,t}^{dom}$	Agua total en la estación de distribución doméstica “r” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$h_{o,t}^{ind}$	Agua total en la estación de distribución industrial “o” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$InstCost_u^{pdes}$	Costo de instalación de las posibles plantas de potencia desaladoras “u” (MD).
$InstCost_q^{sto}$	Costo de instalación de nuevos tanques de almacenamiento de agua “q” (MD).
$M_{x,t}^{Dam}$	Agua en la presa “x” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$OpCost_{n,t}^{pdes}$	Costo de operación de la planta de potencia existente “n” en el tiempo “t” (MD).
$OpCost_{u,t}^{Npdes}$	Costo de operación de la planta de potencia posible “u” en el tiempo “t” (MD).

$S_{g,p,t}^{E,agr}$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento existentes “p” de la zona agrícola “g” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{p,i,t}^{E,aq}$	Recarga del acuífero “i” de agua proveniente de los tanques de almacenamiento existentes “p” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{r,p,t}^{E,dom}$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento existentes “p” de la zona doméstica “r” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{o,p,t}^{E,ind}$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento existentes “p” de la zona industrial “o” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{g,q,t}^{N,agr}$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento posibles “q” de la zona agrícola “g” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{i,q,t}^{N,aq}$	Recarga del acuífero “i” de agua proveniente de los tanques de almacenamiento posibles “q” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{r,q,t}^{N,dom}$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento posibles “q” de la zona doméstica “r” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$S_{o,q,t}^{N,ind}$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento posibles “q” de la zona industrial “o” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$Sto_{p,t}^E$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento existentes “p” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$Sto_{q,t}^N$	Agua contenida en los tanques de almacenamiento posibles “q” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).

$Sto_q^{N,max}$	Capacidad máxima de almacenamiento para los tanques de almacenamiento de agua posibles “q” (Mm ³).
$SW_{u,t}^{in,N}$	Capacidad de la planta de potencia desaladora posible “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
SW_u^{max}	Capacidad máxima de la planta de potencia desaladora posible “u” (Mm ³ /año).
$TEnergy_T$	Energía total producida en el tiempo “t” (GW).
$V_{g,n,t}^{E,agr}$	Recarga de agua a la estación agrícola “g” proveniente de la planta de potencia desaladora existente “n” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$V_{r,n,t}^{E,dom}$	Recarga de agua a la estación doméstica “r” proveniente de la planta de potencia desaladora existente “n” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$V_{o,n,t}^{E,ind}$	Recarga de agua a la estación industrial “o” proveniente de la planta de potencia desaladora existente “n” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$V_{g,u,t}^{N,agr}$	Recarga de agua a la estación agrícola “g” proveniente de la planta de potencia desaladora posible “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$V_{r,u,t}^{N,dom}$	Recarga de agua a la estación doméstica “r” proveniente de la planta de potencia desaladora posible “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$V_{o,u,t}^{N,ind}$	Recarga de agua a la estación industrial “o” proveniente de la planta de potencia desaladora posible “u” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).

$W_{g,x,t}^{agr}$	Recarga de agua a la estación agrícola “g” proveniente de la presa “x” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$W_{i,t}^{aq}$	Agua en el acuífero “i” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$W_{r,x,t}^{dom}$	Recarga de agua a la estación doméstica “r” proveniente de la presa “x” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).
$W_{o,x,t}^{ind}$	Recarga de agua a la estación industrial “o” proveniente de la presa “x” en el tiempo “t” (Mm ³ /año).

3.1.4 Variables

$AREA_{u,t}^{solar}$	Área del colector solar posible “u” en el tiempo “t” (m ²).
$AREA_u^{solar,max}$	Valor máximo del área del colector solar “u” (m ²).
$C_{g,c,t}^{food}$	Cantidad de agua usada por el campo de cultivo “g” por la cosecha “c” en el tiempo “t” (Mm ³ /ton).
<i>DistributionCost</i>	Costos de distribución (MD).
<i>EnergySales</i>	Venta total de energía (MD).
<i>EPOpCost</i>	Costo de operación de las plantas de potencia desaladora existentes (MD).
<i>FertilizarsCost</i>	Costo de los fertilizantes (MD).
<i>FoodSales</i>	Venta de alimentos (MD).
$InstCost_u^{solar}$	Costo de instalación del colector solar “u” (MD).

$Land_{c,g}^{food}$	Tierra requerida por el cultivo “c” en cada campo de cultivo “g” (ha).
$NPDEnergyCost$	Costo de energía de la planta de potencia desaladora posible (MD).
$NPDInstCost$	Costo de instalación de la planta de potencia desaladora posible (MD).
$NPDOpCost$	Costo de operación de la planta de potencia desaladora posible (MD).
$OpCostLand$	Costo de operación de la tierra (MD).
$OpCost_{u,t}^{Solar}$	Costo de operación del colector solar “u” en el tiempo “t” (MD).
$P_{c,g,t}^{food}$	Producción del cultivo “c” en el campo de cultivo “g” en el tiempo “t” (ton).
$PipingCost$	Costo de tuberías (MD).
$PumpingCost$	Costo de bombeo (MD).
$Q_{b,u,t}^B$	Calentamiento en la planta de potencia desaladora posible “u” mediante biocombustibles “b” en el tiempo “t” (GJ/Gg)
$Q_{f,u,t}^F$	Calentamiento en la planta de potencia desaladora posible “u” mediante combustibles fósiles “f” en el tiempo “t” (GJ/Gg)
$Q_{u,t}^{Solar}$	Calentamiento en la planta de potencia desaladora posible “u” en el tiempo “t” mediante colectores solares (GJ)
$SInstCost$	Costo de instalación del sistema de colector solar (MD).
$SOpCost$	Costo de operación del sistema de colector solar (MD).

<i>StorageCost</i>	Costo del almacenamiento de agua (MD).
<i>TAC</i>	Costo total anual (MD).
$TER_{u,t}^{N,pdes}$	Cantidad de energía requerida por la planta de potencia desaladora posible “u” en el tiempo “t” (MD).
<i>WaterSales</i>	Venta total de agua (MD).

3.1.5 Variables binarias

w_u^S	Existencia del sistema de colección solar “u”.
$y_{i,j}^{a,dw}$	Existencia de tubería del acuífero “i” y del pozo “j” al tanque de almacenamiento.
$y_{n,i}^{B,E,des}$	Tubería de la planta de potencia existente “n” para recargar el acuífero “i”.
$y_{u,i}^{B,N,des}$	Tubería de la planta de potencia posible “u” para recargar el acuífero “i”.
$y_{g,j}^{d,agr}$	Tubería del pozo profundo “j” a la estación agrícola “g”.
$y_{r,j}^{d,dom}$	Tubería del pozo profundo “j” a la estación doméstica “r”.
$y_{n,p}^{D,E,Esto}$	Tubería de la planta de potencia desaladora existente “n” hacia el tanque de almacenamiento existente “p”.
$y_{n,q}^{D,E,Nsto}$	Tubería de la planta de potencia desaladora existente “n” al posible tanque de almacenamiento “q”.
y_u^{des}	Existencia de la planta de potencia desaladora “u”.

$y_{o,j}^{d,ind}$	Tubería del pozo profundo “j” a la estación industrial “o”.
$y_{u,p}^{D,N,Esto}$	Tubería de la planta desaladora posible “u” al tanque de almacenamiento existente “p”.
$y_{u,q}^{D,N,Nsto}$	Tubería de la planta desaladora posible “u” al tanque de almacenamiento posible “q”.
$y_{n,x}^{G,E,rel}$	Tubería de la planta de potencia existente “n” para recargar la presa “x”.
$y_{u,x}^{G,N,rel}$	Tubería de la planta de potencia posible “u” para recargar la presa “x”.
$y_g^{h,agr}$	Existencia de tubería de la estación agrícola “g” al usuario.
$y_r^{h,dom}$	Existencia de tubería de la estación doméstica “r” al usuario.
$y_o^{h,ind}$	Existencia de tubería de la estación industrial “o” al usuario.
$y_{p,g}^{s,E,agr}$	Tubería del tanque de almacenamiento existente “p” hacia el usuario agrícola “g”.
$y_{p,i}^{s,E,aq}$	Tubería del tanque de almacenamiento existente “p” para recargar el acuífero “i”.
$y_{p,r}^{s,E,dom}$	Tubería del tanque de almacenamiento hacia el usuario doméstico “r”.
$y_{p,o}^{s,E,ind}$	Tubería del tanque de almacenamiento hacia el usuario industrial “o”.

$y_{q,g}^{s,N,agr}$	Tubería del tanque de almacenamiento posible “q” hacia el usuario agrícola “g”.
$y_{q,i}^{s,N,aq}$	Tubería del tanque de almacenamiento posible “q” para recargar el acuífero “i”.
$y_{q,r}^{s,N,dom}$	Tubería del tanque de almacenamiento posible “q” hacia el usuario doméstico “r”.
$y_{q,o}^{s,N,ind}$	Tubería del tanque de almacenamiento posible hacia el usuario industrial “o”.
y_q^{Sto}	Existencia de nuevo tanque de almacenamiento “q”.
$y_{n,g}^{v,E,agr}$	Tubería de la planta de potencia existente “n” hacia la estación agrícola “g”.
$y_{n,r}^{v,E,dom}$	Tubería de la planta de potencia existente “n” hacia la estación doméstica “r”.
$y_{n,o}^{v,E,ind}$	Tubería de la planta de potencia existente “n” hacia la estación industrial “o”.
$y_{u,g}^{v,N,agr}$	Tubería de la planta de potencia posible “u” hacia la estación agrícola “g”.
$y_{u,r}^{v,N,dom}$	Tubería de la planta de potencia posible “u” hacia la estación doméstica “r”.
$y_{u,o}^{v,N,ind}$	Tubería de la planta de potencia posible “u” hacia la estación industrial “o”.

$y_{x,g}^{w,agr}$	Tubería de la presa “x” a la estación agrícola “g”.
$y_{x,r}^{w,dom}$	Tubería de la presa “x” a la estación doméstica “r”.
$y_{x,o}^{w,ind}$	Tubería de la presa “x” a la estación industrial “o”.

3.1.6 Funciones objetivo

<i>OGHGE</i>	Emisiones de gases de efecto invernadero (ton CO ²).
<i>ONJOBS</i>	Cantidad de trabajos generados.
<i>WNPROFIT</i>	Beneficio de la red de agua (MD).
<i>ENPROFIT</i>	Beneficio de la red de energía (MD).
<i>FNPROFIT</i>	Beneficio de la red de alimentos (MD).
<i>WEFPROFIT</i>	Beneficio total de los tres recursos (MD).
<i>OMEGA</i>	Normalización de WNPROFIT.
<i>ETA</i>	Normalización de ENPROFIT.
<i>FI</i>	Normalización de FNPROFIT.
<i>PI</i>	Normalización de WEFPROFIT.
<i>GAMTH</i>	Normalización de OGHGE.
<i>XI</i>	Normalización de ONJOBS.
<i>SWJS</i>	Esquema de justicia <i>Social Welfare</i> .
<i>NJS</i>	Esquema de justicia Nash.
<i>RJS</i>	Esquema de justicia Rawlsian.

3.1.7 Ecuaciones más representativas

Balance de masa del acuífero “i” en el tiempo “t”: Balance de los acuíferos que incluye el agua proveniente de las plantas desaladoras existentes y posibles, además de la filtración de agua de los distritos de cultivo y la recarga natural, así como la extracción de agua del acuífero.

$$W_{i,t}^{aq} - W_{i,t-1}^{aq} = \sum_p S_{p,i,t}^{E,aq} + \sum_q S_{q,i,t}^{N,aq} + \sum_n B_{n,i,t}^{E,des} + \sum_u B_{u,i,t}^{N,des} + F_{i,t}^{agr} + R_{i,t}^{aq} - \sum_j a_{j,i,t}^{dw} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Balance de masa del pozo profundo “j” en el tiempo “t”: El balance de masa considera la cantidad de agua que se destina a cada estación central.

$$\sum_i a_{j,i,t}^{dw} = \sum_r d_{r,j,t}^{dom} + \sum_g d_{g,j,t}^{agr} + \sum_o d_{o,j,t}^{ind} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Balance de masa en la estación agrícola “g” en el tiempo “t”: El agua en la estación agrícola es la proveniente de las plantas de potencia y de los acuíferos, así como de las presas.

$$h_{g,t}^{agr} = \sum_n v_{g,n,t}^{E,agr} + \sum_u v_{g,u,t}^{N,agr} + \sum_j d_{g,j,t}^{agr} + \sum_x w_{g,x,t}^{agr} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Balance de masa en la estación doméstica “r” en el tiempo “t”: El agua en la estación doméstica es la proveniente de las plantas de potencia y de los acuíferos, así como de las presas.

$$h_{r,t}^{dom} = \sum_n v_{r,n,t}^{E,dom} + \sum_u v_{r,u,t}^{N,dom} + \sum_j d_{r,j,t}^{dom} + \sum_x w_{r,x,t}^{dom} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Balance de masa en la estación industrial “o” en el tiempo “t”: El agua en la estación industrial es la proveniente de las plantas de potencia y de los acuíferos, así como de las presas.

$$h_{o,t}^{ind} = \sum_n v_{o,n,t}^{E,ind} + \sum_u v_{o,u,t}^{N,ind} + \sum_j d_{o,j,t}^{ind} + \sum_x w_{o,x,t}^{ind} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Balance de masa de la presa “x” en el tiempo “t”: El balance de masa de las presas es igual a la recarga proveniente de las plantas de potencia, la recarga natural menos el agua que se destina a cada estación central.

$$M_{x,t}^{Dam} - M_{x,t-1}^{Dam} = \sum_n G_{n,x,t}^{E,rel} + \sum_u G_{u,x,t}^{N,rel} + R_{x,t}^{Dam} - \sum_r W_{r,x,t}^{dom} - \sum_g W_{g,x,t}^{agr} - \sum_o W_{o,x,t}^{ind} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Balance de masa en el tanque de almacenamiento existente “p” en el tiempo “t”: El agua en los tanques de almacenamiento es igual al agua proveniente de las plantas de potencia y de los acuíferos.

$$Sto_{p,t}^E - Sto_{p,t-1}^E = \sum_n D_{n,p,t}^{E,Esto} + \sum_u D_{u,p,t}^{N,Esto} - \sum_r S_{r,p,t}^{E,dom} - \sum_g S_{g,p,t}^{E,agr} - \sum_o S_{o,p,t}^{E,ind} - \sum_i S_{i,p,t}^{E,aq} \quad \text{Ec. 3.7}$$

Balance de masa en el tanque de almacenamiento posible “q” en el tiempo “t”: El agua en los tanques de almacenamiento es igual al agua proveniente de las plantas de potencia y de los acuíferos.

$$Sto_{q,t}^N - Sto_{q,t-1}^N = \sum_n D_{n,q,t}^{E,Nsto} + \sum_u D_{u,q,t}^{N,Nsto} - \sum_r S_{r,q,t}^{N,dom} - \sum_g S_{g,q,t}^{N,agr} - \sum_o S_{o,q,t}^{N,ind} - \sum_i S_{i,q,t}^{N,aq} \quad \text{Ec. 3.8}$$

Balance de masa en la planta de potencia existente “n” en el tiempo “t”: El balance de la planta de potencia considera el agua que se manda a los tanques de almacenamientos existentes, posibles, a las estaciones, a los acuíferos y a las presas, así como la que se regresa al mar.

$$SW_{n,t}^{in,E} * (1 - \beta) = \sum_p D_{n,p,t}^{E,Esto} + \sum_q D_{n,q,t}^{E,Nsto} + \sum_r v_{r,n,t}^{E,dom} + \sum_g v_{g,n,t}^{E,agr} + \sum_o v_{o,n,t}^{E,ind} + \sum_i B_{i,n,t}^{E,des} + \sum_x G_{x,n,t}^{E,rel} + b_{n,t}^{E,rej} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Balance de masa en la planta de potencia posible “u” en el tiempo “t”: El balance de la planta de potencia considera el agua que se manda a los tanques de almacenamientos existentes, posibles, a las estaciones, a los acuíferos y a las presas, así como la que se regresa al mar.

$$SW_{u,t}^{in,N} * (1-\beta) = \sum_p D_{u,p,t}^{N,Esto} + \sum_q D_{u,q,t}^{N,Nsto} + \sum_r v_{r,u,t}^{N,dom} + \sum_g v_{g,u,t}^{N,agr} + \sum_o v_{o,u,t}^{N,ind} + \sum_i B_{i,u,t}^{N,des} + \sum_x G_{x,u,t}^{N,rel} + b_{u,t}^{N,rej} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Energía total producida: Es la cantidad de energía que producen las plantas existentes y las posibles.

$$TEnergy_t = \sum_u EPr oduction_{u,t}^N + \sum_n EPr oduction_{n,t}^E \quad \text{Ec. 3.11}$$

Energía producida en la planta de potencia existente “n”: Es la energía que se manda a cada estación central.

$$TEnergy_t = \sum_r E_{r,t}^{dom} + \sum_g E_{g,t}^{agr} + \sum_o E_{o,t}^{ind} \quad \text{Ec. 3.12}$$

Costo de instalación del tanque de almacenamiento posible “q”: El costo de los tanques de almacenamiento incluye la cantidad máxima de almacenamiento y varios factores de costos.

$$InstCost_q^{Sto} = KF * [Z_1 * y_q^{Sto} + Z_2 * (Sto_q^{max})^\alpha] \quad \text{Ec. 3.13}$$

Costo de instalación de la planta de potencia posible “u”: El costo de la planta de potencia está dado por la capacidad máxima de la planta y otros factores de costos.

$$InstCost_u^{pdes} = KF * [Z_3 * y_u^{pdes} + Z_4 * (SW_u^{max})^\alpha] \quad \text{Ec. 3.14}$$

Costo de operación de la planta de potencia posible “u”: Este costo depende de la capacidad de la planta posible y factores económicos.

$$OpCost_{u,t}^{pdes} = HY * [Z_5 * (1-\beta) * (SW_{u,t}^{in,N})] \quad \text{Ec. 3.15}$$

Costo de operación de la planta de potencia existente “n”: Este costo depende de la capacidad de la planta existente y factores económicos.

$$OpCost_{n,t}^{E,des} = HY * [Z_6 * (1-\beta) * (SW_{n,t}^{in,E})] \quad \text{Ec. 3.16}$$

Requerimientos de energía para la planta de potencia posible “u”: La planta de potencia necesita energía de acuerdo a la capacidad que se destine a la hora de instalarla.

$$TER_{u,t}^{N,pdes} = FCF * SW_{u,t}^{in,N} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$TER_{u,t}^{N,pdes} = \sum_f Q_{f,u,t}^F + \sum_b Q_{b,u,t}^B + Q_{u,t}^{Solar} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Costo de la energía requerida para la plata de potencia posible “u”: Los costos de energía viene dado dependiendo del tipo de combustible que use y factores de compra.

$$NPDEnergyCost = HY * \sum_u \sum_t \left[\sum_f FFC_f * Q_{f,u,t}^F + \sum_b BFC_b * Q_{b,u,t}^B \right] \quad \text{Ec. 3.19}$$

Costo de instalación del colector solar de la planta “u”: El costo depende del área del colector solar y factores monetarios.

$$InstCost_u^{Solar} = KF * \left[Z_1^{Solar} * w_1^{Solar} + Z_2^{Solar} * \left(AREA_u^{Solar,max} \right)^\alpha \right] \quad \text{Ec. 3.20}$$

Costo de operación del colector solar de la planta “u”: El costo de operación viene dado dependiendo del área del colector y factores económicos.

$$OpCost_{u,t}^{Solar} = HY * \left[Z_3^{Solar} * AREA_{u,t}^{Solar} \right] \quad \text{Ec. 3.21}$$

Venta de agua: Las ventas de agua son proporcionales a la cantidad de agua que se destina a la estación central y a los tanques de almacenamiento de cada sector, por un factor de venta.

$$WaterSales = H_Y * \sum_t \left[\begin{aligned} & \left(\sum_r h_{r,t}^{dom} + \sum_p \sum_r s_{p,r,t}^{E,dom} + \sum_q \sum_r s_{q,r,t}^{N,dom} \right) * WDC_t + \\ & \left(\sum_g h_{g,t}^{agr} + \sum_p \sum_g s_{p,g,t}^{E,agr} + \sum_q \sum_g s_{q,g,t}^{N,agr} \right) * WAC_t + \\ & \left(\sum_o h_{o,t}^{ind} + \sum_p \sum_o s_{p,o,t}^{E,ind} + \sum_q \sum_o s_{q,o,t}^{N,ind} \right) * WIC_t \end{aligned} \right] \quad \text{Ec. 3.22}$$

Venta de energía: Es el dinero obtenido de la venta a cada sector.

$$EnergySales = H_Y * \sum_t \left[\sum_r E_{r,t}^{dom} * DEC_t + \sum_g E_{g,t}^{agr} * AEC_t + \sum_o E_{o,t}^{ind} * IEC_t \right] \quad \text{Ec. 3.23}$$

Costo de almacenamiento del tanque de almacenamiento posible “q”: El costo de almacenamiento depende del costo de instalación del tanque.

$$StorageCost = H_Y * \sum_q InstCost_q^{Sto} \quad \text{Ec. 3.24}$$

Costo de instalación de la planta de potencia posible “u”: Es la suma de la instalación de las plantas de potencia.

$$NPDIInstCost = \sum_u InstCost_u^{pdes} \quad \text{Ec. 3.25}$$

Costo de operación de la planta de potencia posible “u”: Es la suma de los costos de operación de las plantas de potencia posibles.

$$NPDOpCost = \sum_u \sum_t OpCost_{u,t}^{N,pdes} \quad \text{Ec. 3.26}$$

Costo de operación de la planta de potencia existente “n”: Es la suma de los costos de operación de las plantas de potencia existentes.

$$EPDOpCost = \sum_n \sum_t OpCost_{n,t}^{E,pdes} \quad \text{Ec. 3.27}$$

Costo total de instalación del colector solar: Es lo que cuesta instalar cada panel solar, uno por cada planta de potencia posible.

$$SInstCost = \sum_u InstCost_u^{Solar} \quad \text{Ec. 3.28}$$

Costo total de operación del colector solar: Es la suma de los costos de operación de los colectores solares de las plantas de potencia posibles.

$$SOpCost = \sum_u \sum_t OpCost_{u,t}^{Solar} \quad \text{Ec. 3.29}$$

Cantidad total de agua consumida por los usuarios agrícolas: La cantidad de agua que necesitan los usuarios agrícolas depende de la cantidad de alimentos cultivados.

$$AgrDem_{g,t} = \sum_c c_{c,g,t}^{food} \quad \text{Ec. 3.30}$$

Consumo de agua por cada cultivo: Es la cantidad de agua que se consume por cada tipo de cultivo.

$$C_{c,g,t}^{food} = P_{c,g,t}^{food} * \Phi_{c,g,t} \quad \text{Ec. 3.31}$$

Requerimientos de tierra: Es la cantidad de tierra que necesitan los cultivos.

$$Land_{c,g}^{food} = \Lambda_{c,g}^{food} * \sum_t P_{c,g,t}^{food} \quad \text{Ec. 3.32}$$

Costo de labrar la tierra: El costo de labrar la tierra está dado por la cantidad que se necesita para la producción de los cultivos y un factor de paga.

$$OpCostLand = \sum_c \sum_g Land_{c,g}^{food} * VCL_c \quad \text{Ec. 3.33}$$

Costo del fertilizante: El costo de fertilizante depende de la cantidad de alimentos que se cultivan.

$$FertilizersCost = \sum_c \sum_g \sum_t UFC_c * \varepsilon_c^{Fcrop} * P_{c,g,t}^{food} \quad \text{Ec. 3.34}$$

Costo de distribución: Los costos de distribución dependen de la cantidad que se cultiva y un factor de distribución.

$$DistributionCost = \sum_c \sum_g \sum_t UTC_{c,g,t}^{food} * P_{c,g,t}^{food} \quad \text{Ec. 3.35}$$

Ventas de alimentos: La ganancia de los alimentos está dado por la cantidad de alimentos cultivados y un valor unitario de venta.

$$FoodSales = \sum_c \sum_g \sum_t FCV_{c,g,t} * P_{c,g,t}^{food} \quad \text{Ec. 3.36}$$

Emisiones de gases de efecto invernadero totales: Aquí se calculan las emisiones de CO₂ tomando en consideración el tipo de producción energético.

$$\begin{aligned} OGHGE = & \sum_f \sum_u \sum_t GHGEF_f * QF_{f,u,t} + \sum_b \sum_u \sum_t GHGEB_b * QB_{b,u,t} + \\ & \sum_u \sum_t GHGES * QSOLAR_{u,t} \end{aligned} \quad \text{Ec. 3.37}$$

Número de trabajos generados: Aquí se calculan los trabajos generados con base a la cantidad de energía que se genera por combustibles fósiles, biocombustibles y energía solar.

$$\begin{aligned} \text{ONJOBS} = & \sum_f \sum_u \sum_t \text{NJOB}F_f * QF_{f,u,t} + \sum_b \sum_u \sum_t \text{NJOB}B_b * QB_{b,u,t} \\ & + \sum_u \sum_t \text{NJOBSOLAR} * QSOLAR_{u,t} \end{aligned}$$

Ec. 3.38

Beneficio de la red de agua: Esta ecuación contempla las ventas de agua a los tres sectores de acuerdo a sus demandas, el agua que se manda a los tanques de almacenamiento existentes y posibles y los costos de almacenamiento, bombeo y de tuberías.

$$\text{WNPROFIT} = \text{WaterSales} - \text{StorageCost} - \text{PipingCost} - \text{PumpingCost}$$

Ec. 3.39

Beneficio de la red de energía: Involucra las ventas de energía a los tres sectores menos los costos de operación de las plantas existentes y las posibles, instalación de nuevas plantas desaladoras y su mano de obra, además de la posible instalación y mano de obra de un colector solar.

$$\begin{aligned} \text{ENPROFIT} = & \text{EnergySales} - \text{NPDI}nstCost - \text{NPDO}pCost - \\ & \text{EPDO}pCost - \text{NPDE}nergyCost - \text{S}InstCost - \text{SO}pCost \end{aligned}$$

Ec. 3.40

Beneficio de la red de alimentos: Incluye las ventas de alimentos al sector doméstico y los gastos de agua, energía, fertilizantes, distribución, el costo de la tierra también.

$$\begin{aligned} \text{FNPROFIT} = & \text{FoodSales} - \text{OpCostLand} - \\ & \text{FertilizersCost} - \text{DistributionCost} - H_Y \left[\sum_g \sum_t E_{g,t}^{agr} * \text{AEC}_t \right] - \\ & H_Y \left[\sum_g \sum_t agrdem_{g,t} * \text{WAC}_t \right] \end{aligned}$$

Ec. 3.41

Beneficio de los tres recursos: Es la suma de los beneficios de cada recurso.

$$\text{WEFPROFIT} = \text{WNPROFIT} + \text{ENPROFIT} + \text{FNPROFIT}$$

Ec. 3.42

Social Welfare

Este esquema de justicia considera el promedio algebraico de las funciones objetivo, suma los valores de las funciones normalizadas y se optimiza el valor, buscando el mínimo o máximo, dependiendo de la normalización.

$$SWJS = \sum_z f_z \quad \text{Ec. 3.43}$$

Multistakeholder

Es un esquema parecido a *Social Welfare* que busca darle importancia a una o varias de las funciones objetivo involucradas, para eso se agregan valores que modifican la ecuación llamados pesos.

$$MH = \sum_z w_z * f_z \quad \text{Ec. 3.44}$$

Los valores de los pesos son tomados aleatoriamente, considerando que entre mayor sea el peso de una función, ésta tenderá a su valor utópico.

Nash

Este esquema penaliza las funciones grandes ya que utiliza suma de logaritmos o lo que es igual una productoria de las funciones. Nash se basa en el promedio geométrico de los valores.

$$NJS = \prod_z f_z \quad \text{Ec. 3.45}$$

Nash tiene una particularidad en la que sólo se puede encontrar una combinación que dé el mismo resultado.

Rawlsian

Este método busca el mejor peor escenario, es decir que esta variable será siempre peor que los valores de las funciones objetivo, pero se busca el menor peor valor.

$$RJS \geq f_z \quad \text{Ec. 3.46}$$

Capítulo 4.-Resultados

4.1.-Caso de estudio

El modelo propuesto fue aplicado a una zona de Sonora, México en la cual hay escasez de agua y es una región que genera mucha energía. La precipitación de lluvia anual es de 75-400 mm. La zona incluye tres ciudades: Hermosillo, Obregón y Guaymas, cuyas poblaciones son: 984.342, 386.966 y 153.579, respectivamente. Cerca de las ciudades se encuentran los ríos Sonora, Matape y Yaqui, gracias a ellos fue posible la construcción de presas (Abelardo L. Rodríguez, El novillo, El molinito, Ignacio R.A. y Álvaro Obregón). La región es bien conocida por su producción agrícola, los distritos: 084 Guaymas, 051 Costa de Hermosillo, 041 Río Yaqui y 018 Colonias Yaquis). En total hay 62 acuíferos reconocidos a través de Sonora, 19 de los cuáles están sobreexplotados. Los más importantes están en la costa de Hermosillo, valle de Yaqui, Guaymas, Río Mayo y el valle de Sonora. El modelo propuesto considera las demandas industriales, agrícolas y domésticas, las presas y acuíferos existentes en la región y las plantas de potencia con posibilidad de generar agua. En la **Figura 4.1** se puede apreciar un mapa de la región del caso de estudio.

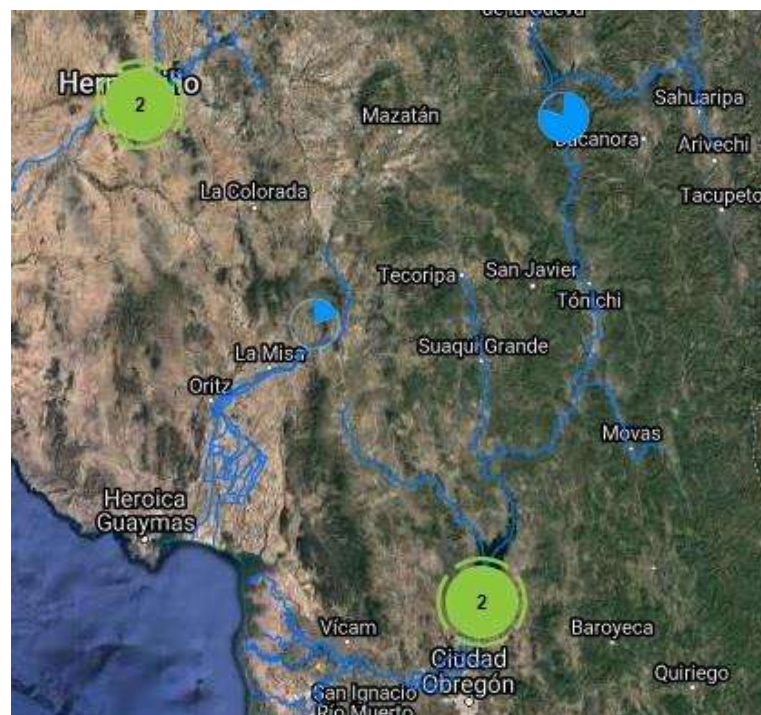


Figura 4.1. Mapa de la región de Sonora donde se ubica el caso de estudio.

La optimización de la superestructura se realizó bajo tres esquemas de justicia para repartir los recursos: *Social Welfare*, Nash y Rawlsian. Además se analizó la superestructura considerando los beneficios de los tres recursos individualmente.

Las 6 funciones objetivo se evaluaron minimizándolas y maximizándolas para obtener los valores Nadir y Utópico como se puede ver en la **Tabla 4.1**:

Tabla 4.1. Resultados máximos y mínimos de las funciones objetivo.

Variable	Región utópica	Región Nadir
WEFPROFIT (MD)	-529.614	-1103.036
OGHGE (ton CO ₂)	12619000	14575000
ONJOBS	57168.147	8878.98
WNPROFIT (MD)	1485.233	1369.287
ENPROFIT (MD)	211.964	-332.129
FNPROFIT (MD)	-2226.812	-2226.812

Luego de obtener estos valores se normalizó el valor neto para cada función de la siguiente manera:

$$N_z = \frac{|N_z^{max} - N_z^t|}{|N_z^{max} - N_z^{min}|} \quad \text{Ec. 4.1}$$

Donde: N_z representa la función z.

N_z^{ax} es el valor utópico de la función z.

N_z^{min} es el valor Nadir de la función z.

N_z^t es el valor t de la función z.

A las funciones obtenidas se les denominó: Pi, Gamth, Xi, Omega, Eta y Fi, respectivamente al orden de la tabla.

Para analizar las funciones se dividieron en tres casos: el primer caso incluye la función que involucra los tres recursos (WEFPROFIT), las emisiones de gases de efecto invernadero (OGHGE) y los trabajos generados (ONJOBS), aquí se analizan los sectores económico, ambiental y social; el segundo caso analiza las funciones objetivo de los recursos (WNPROFIT,

ENPROFIT y FNPROFIT) esto deja de lado el pilar ambiental y social, aunque de todas formas se analizó el comportamiento de las funciones OGHGE y ONJOBS cuando el objetivo es meramente económico; finalmente, en el tercer caso se hizo la optimización considerando las funciones de los recursos (WNPROFIT, ENPROFIT, FNPROFIT) y añadimos las emisiones de gases de efecto invernadero (OGHGE) y los trabajos generados (ONJOBS) esto para ver la diferencia con el caso 2. Cada caso se analizó mediante los tres esquemas de repartición de bienes.

4.1.1 Caso 1

Para el Caso 1 las funciones objetivo son: WEFPROFIT, OGHGE y ONJOBS. Los valores obtenidos por la optimización se pueden apreciar en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Resultados de la optimización del Caso 1.

Función	Utópico	Nadir	<i>Social Welfare</i>	Nash	Rawlsian
WEFPROFIT (MD)	-529.614	-1103.036	-646.618	-663.503	-616.43
OGHGE (ton CO ₂)	12619000	14575000	12619000	12621000	12899000
ONJOBS	57168.147	8878.98	57168.092	57119.858	50257.313

Estos valores junto con los obtenidos por el *Multistakeholder* se pueden apreciar en la **Figura 4.2**:

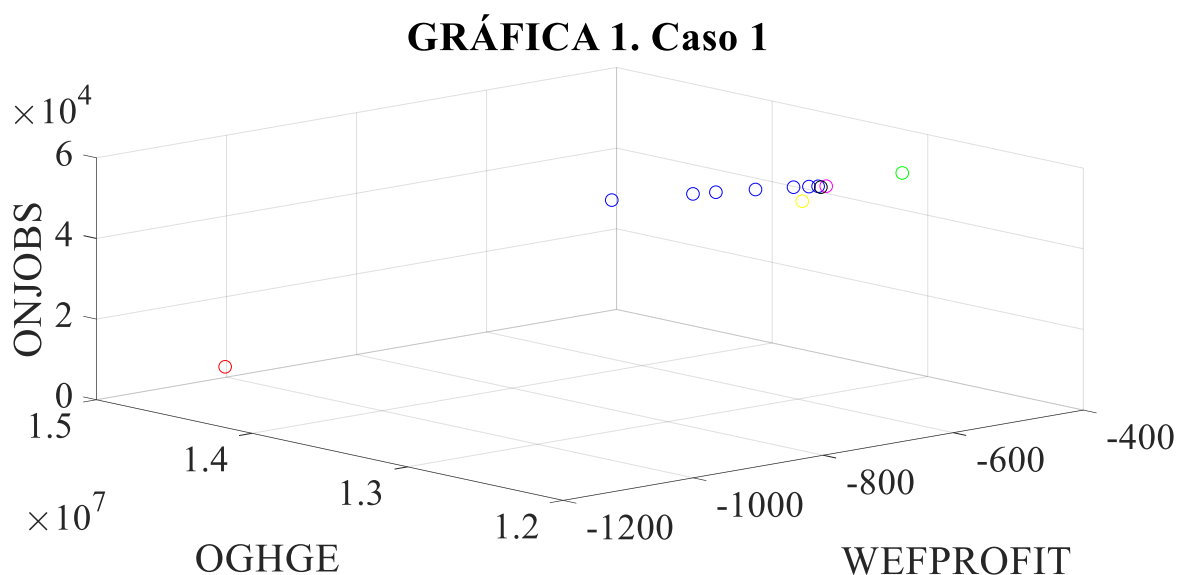


Figura 4.2. Representación 3D de los valores del Caso 1.

En verde tenemos el punto utópico. El punto rojo es el punto Nadir. Magenta es el punto de *Social Welfare*. Los puntos azules son los puntos obtenidos por el *Multistakeholder*. El valor negro es el punto de Nash y el punto amarillo es el valor obtenido con Rawlsian. En la **Figura 4.3** se aprecian los valores del Caso 1 pero desde un punto 2D con los ejes enfocados a la función ONJOBS y WEFPROFIT.

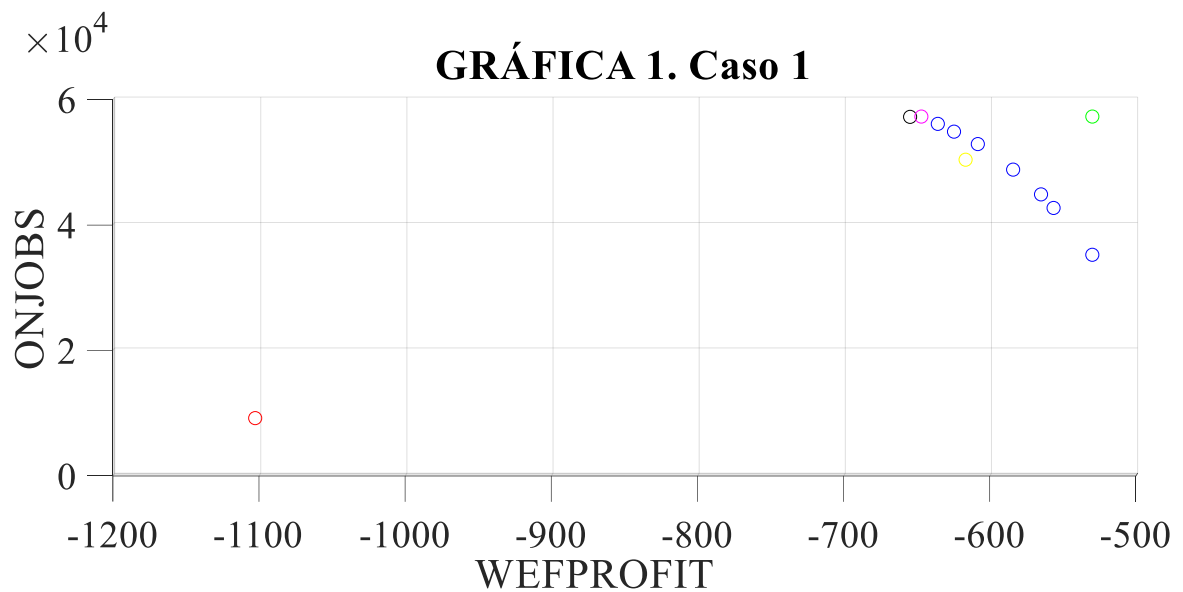


Figura 4.3. Vista 2D del Caso 1 con ejes ONJOBS y WEFPROFIT.

Dado que es un caso en 3D vale la pena revisar las demás vistas 2D con los otros ejes, eso se puede apreciar la cercanía de los esquemas de justicia con el punto utópico en las **Figuras 4.4 y 4.5.**

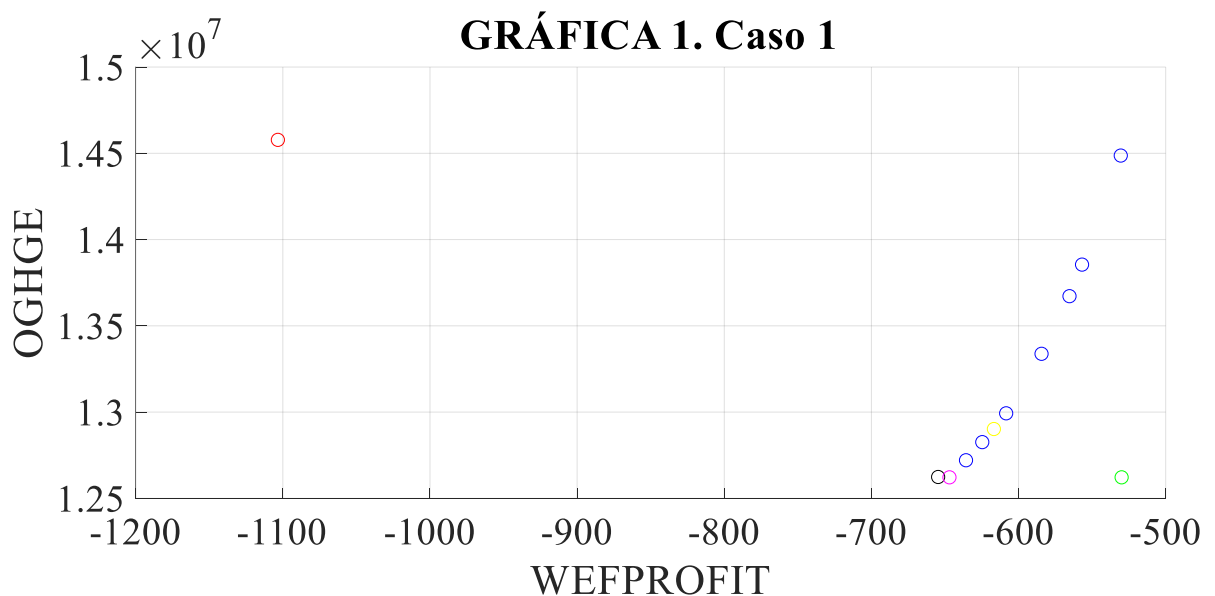


Figura 4.4. Vista 2D del Caso 1 con los ejes OGHGE y WEFPROFIT.

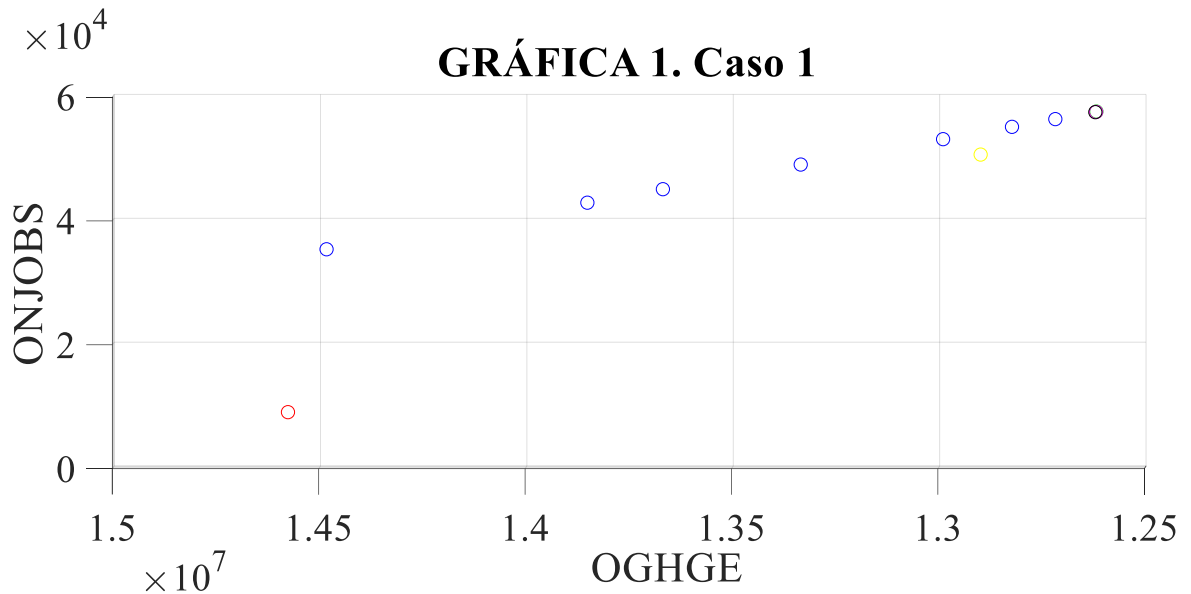


Figura 4.5. Vista en 2D del Caso 1 con ejes ONJOBS y OGHGE.

Las estructuras resultantes del Caso 1 de los tres esquemas de justicia de repartición de bienes Nash, Rawlsian y *Social Welfare* están en las **Figuras 4.6-4.8**, respectivamente. En el Caso 1 los tres esquemas de justicia de repartición de bienes usan un colector solar para las plantas de potencia nuevas, lo que disminuye el uso de combustibles fósiles y biocombustibles.

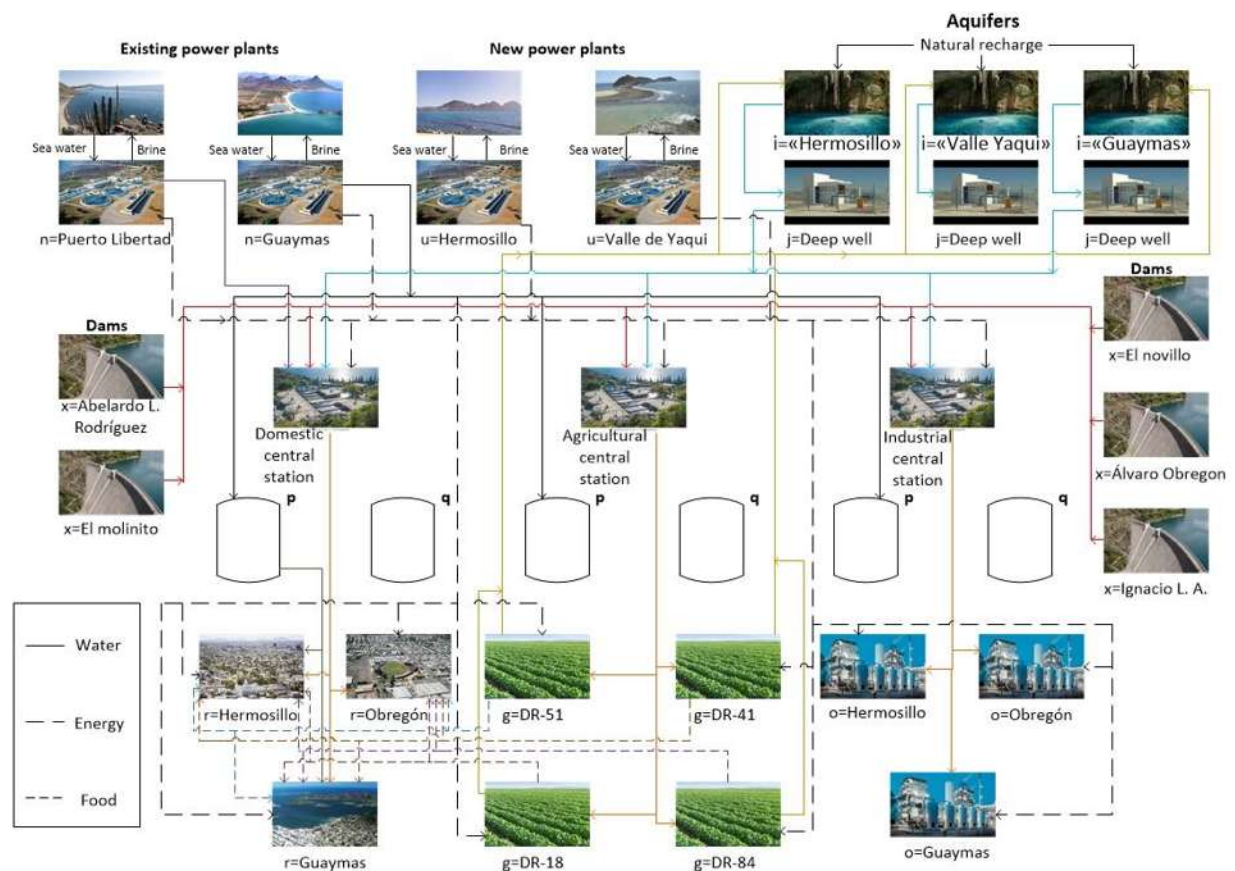


Figura 4.6. Estructura resultante de la optimización del Caso 1 mediante el esquema de Nash.

Referente a la **Figura 4.6** se destaca la construcción de las dos plantas de potencia desaladoras posibles tanto en la costa de Hermosillo como en el valle Yaqui, también se aprecia que la principal recargar de agua de las estaciones centrales proviene principalmente de las presas (líneas rojas) y de los acuíferos (líneas azules). Curiosamente la optimización opta por construir algunos tanques de almacenamiento “q” pero los deja de almacén y los “p” sólo abastecen al usuario doméstico de Hermosillo y Guaymas. La recarga de los acuíferos se logra por la filtración del agua en los distritos de cultivo y la recarga natural.

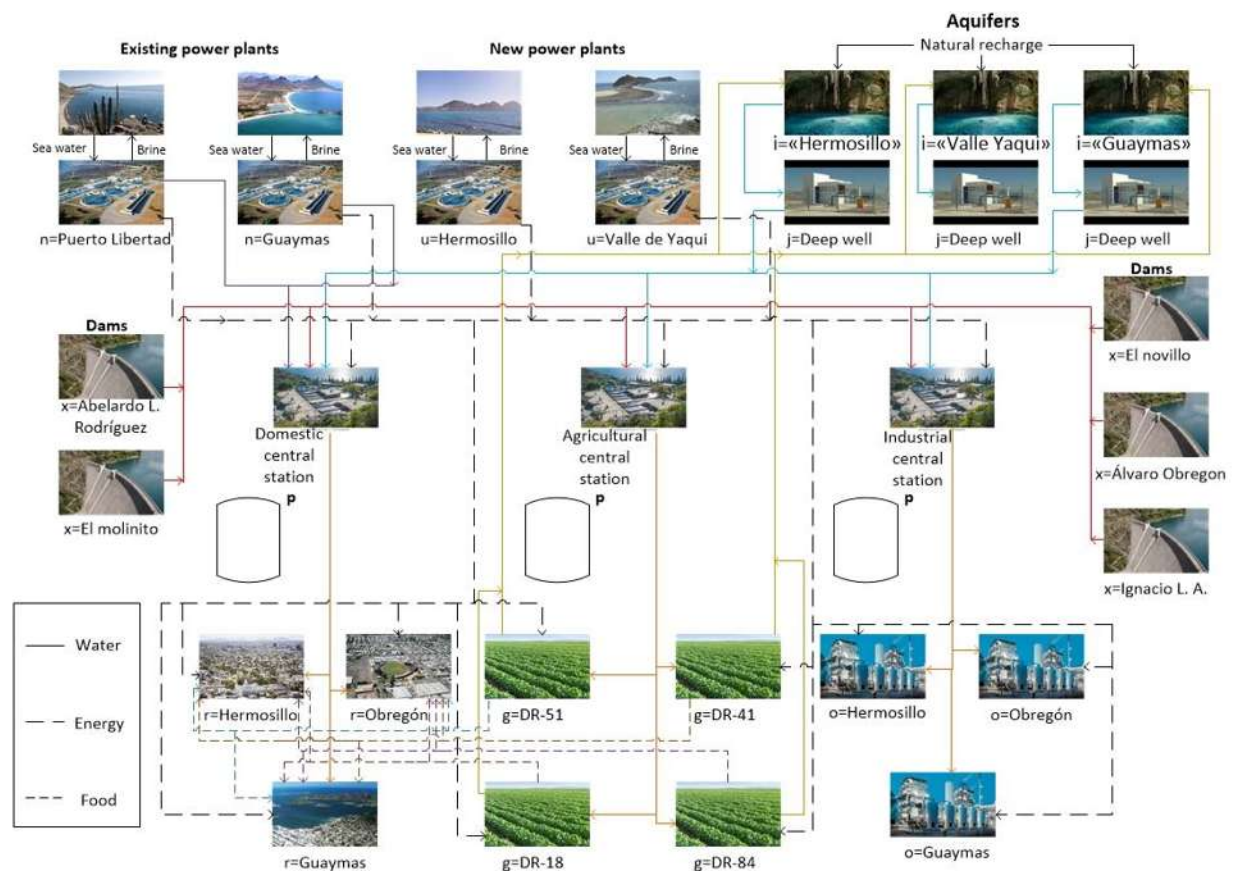


Figura 4.7. Estructura del Caso 1-Rawlsian.

En la **Figura 4.7** vemos que el esquema de Rawlsian también decide la construcción de las dos plantas de potencia nuevas y similarmente, la recarga de las estaciones centrales proviene principalmente de las presas y los acuíferos. A diferencia del esquema de Nash, el esquema de Rawlsian no decide la construcción de nuevos tanques de almacenamiento “q” y los existentes “p” los usa sólo de almacén ya que el abastecimiento de los usuarios agrícolas, domésticos e industriales proviene de la estación central. La recarga de los acuíferos se hace únicamente con la filtración de los distritos de cultivo y a recarga natural.

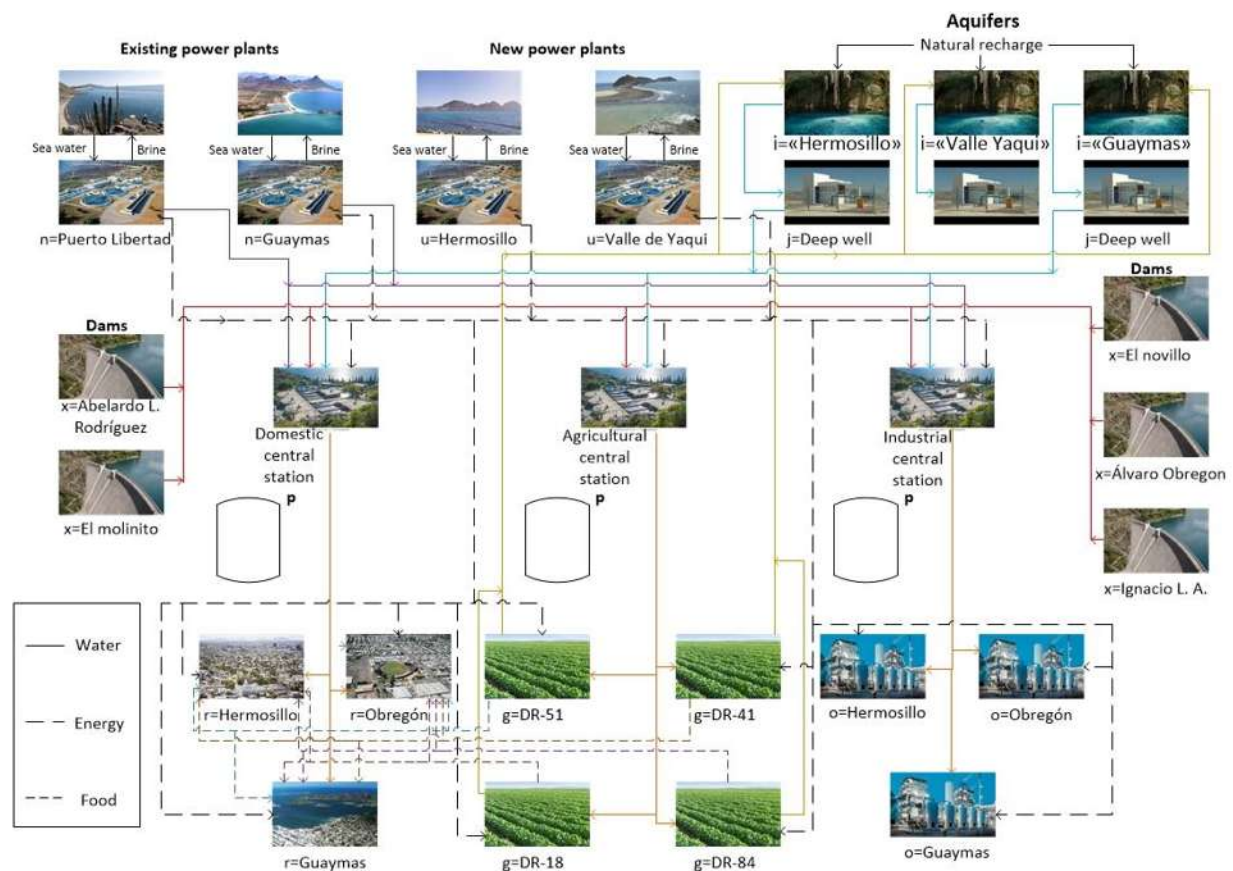


Figura 4.8. Estructura del Caso 1-Social Welfare.

En la **Figura 4.8** se aprecia que, a diferencia de los esquemas pasados, hay flujo de agua de las plantas de potencia desaladoras hacia las estaciones centrales (líneas moradas) al igual que de las presas y los acuíferos. No se hace empleo de los tanques “q”.

Uno de los resultados de la optimización más relevante es el uso del combustible para las plantas de potencia posibles dependiendo del esquema de justicia de repartición de bienes. Para el Caso 1 los resultados de los combustibles usados se muestran en las **Tablas 4.3-4.5**. Como se puede apreciar, el esquema de *Social Welfare* es el que más biocombustibles utiliza, hasta 6% más que el esquema de Rawlsian y un 0.03% más que Nash. En cuanto a combustibles fósiles Rawlsian es el que más utiliza; 2.16% más que Nash y 3.36% más que *Social Welfare*. Finalmente en cuanto a la energía solar Nash es el que más recurre a este tipo de energía; 14.92% más que Rawlsian y 10.82% más que *Social Welfare*. A pesar de que en el esquema de Nash emplea más energía solar (libre de emisiones de CO₂) el hecho de que emplee más combustibles fósiles que el esquema de

Social Welfare le impide acercarse al punto utópico del parámetro ambiental mientras que *Social Welfare* sí lo logra incluso al ser el único que emplea carbón.

Tabla 4.3. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 1-Nash.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	260	201	288.0844689	-	-	860022.3489	623472.3256
172	260	221.1	296	-	-	1417451.14	624907.683
344	260	241.2	325.6	-	-	1714050.771	661843.1465
516	312	241.2	355.2	-	-	1899296.187	663366.8412
688	312	281.4	355.2	-	-	4446367.009	673188.7714
688	338	281.4	325.6	-	-	5035769.259	674738.586
688	338	321.6	384.8	-	-	5237379.771	768096.1824
860	364	361.8	414.4	-	-	5594717.745	769864.4928
860	416	402	444	-	-	6678122.477	857681.9284
1204	520	402	444	-	-	10009136.9	859656.483
1720	520	402	444	-	-	10015163.33	931708.2826
2580	520	402	444	-	-	10287619.14	933853.2606
-	-	-	-	-	-	10485788.52	1028377.062
-	-	-	-	-	-	10525557.38	1030744.591
-	-	-	-	-	-	10599726.73	1079347.875
-	-	-	-	-	-	10666021.71	1081832.749
-	-	-	-	-	-	10705523.47	1154219.235
-	-	-	-	-	-	10744188.09	1156876.477
-	-	-	-	-	-	10793013.59	1295218.952
-	-	-	-	-	-	10889904.92	1298200.804
-	-	-	-	-	-	10963413.7	1333180.415
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1357084.718
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
10492	4420	3758.7	4520.884469	0	0	159568234.2	23553919.52

Tabla 4.4. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 1-Rawlsian.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	260	58.9785	296	2.15E-08	-	10598179.52	384759.4983
172	260	281.4	296	-	-	10790887.26	769864.4928
344	260	361.8	325.6	-	-	10978524.28	769864.4928
516	312	402	325.6	-	-	11999407.46	859656.483
688	312	402	355.2	-	-	12852831.65	859656.483
688	338	402	355.2	-	-	12861056.93	933853.2606
688	338	402	384.8	-	-	13448184.6	933853.2606
860	364	-	414.4	-	-	15334126.96	1030744.591
860	416	-	444	-	-	15558344.79	1030744.591
1204	520	-	444	-	-	15900744.24	1081832.749
1720	520	-	444	-	-	16077437.02	1081832.749
2580	520	-	444	-	-	16684135.09	1156876.477
-	-	-	-	-	-	-	1156876.477
-	-	-	-	-	-	-	1298200.804
-	-	-	-	-	-	-	1298200.804
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
10492	4420	2310.1785	4528.8	2.15415E-08	0	163083859.8	20039734.53

Tabla 4.5. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 1-Social Welfare.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	260	201	296	7.53E-08	-	59620.1928	624907.683
172	260	221.1	296	1307.81252	-	276541.6478	624907.683
344	260	241.2	325.6	-	-	327868.0058	663366.8412
516	312	241.2	325.6	-	-	589365.8042	663366.8412
688	312	281.4	355.2	-	-	684541.411	674738.586
688	338	281.4	355.2	-	-	9329064.191	674738.586
688	338	321.6	384.8	-	-	10008592.62	769864.4928
860	364	361.8	414.4	-	-	10462778.06	769864.4928
860	416	402	444	-	-	11602775.08	859656.483
1204	520	402	444	-	-	11722643.39	859656.483
1720	520	402	444	-	-	12121450.91	933853.2606
2580	520	402	444	-	-	12860735.33	933853.2606
-	-	-	-	-	-	15334126.96	1030744.591
-	-	-	-	-	-	15498724.59	1030744.591
-	-	-	-	-	-	15900744.24	1081832.749
-	-	-	-	-	-	16077437.02	1081832.749
-	-	-	-	-	-	16682827.28	1156876.477
-	-	-	-	-	-	-	1156876.477
-	-	-	-	-	-	-	1298200.804
-	-	-	-	-	-	-	1298200.804
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
10492	4420	3758.7	4528.8	1307.81252	0	157601899.7	21004452.21

4.1.2 Caso 2

Para este caso las funciones objetivo son las de los tres recursos (WNPROFIT, ENPROFIT y FNPROFIT) y veremos cómo impacta a las emisiones y a los trabajos generados. En la **Tabla 4.6** se compilan los valores obtenidos en este caso.

Tabla 4.6. Valores obtenidos en el Caso 2.

Función	Utópico	Nadir	Social Welfare	Nash	Rawlsian
WNPROFIT (MD)	1485.233	1369.287	1485.233	1485.233	1485.215
ENPROFIT (MD)	211.964	-332.129	211.964	206.873	211.885
FNPROFIT (MD)	-2226.812	-2226.812	-2226.812	-2226.812	-2226.812
OGHGE (ton CO ₂)	12619000	14575000	14544000	14485000	14544000
ONJOBS	57168.147	8878.98	10307.455	9623.024	10307.455

En las **Figuras 4.9-4.12** se ven los valores obtenidos en 3D y 2D. En el Caso 2 en particular se aprecia que prácticamente no importa el esquema de repartición, todos están en el valor utópico (en cuanto a las funciones objetivo), pero la generación de empleos y emisión de gases de efecto invernadero prácticamente están en el valor Nadir.

GRÁFICA 2. Caso 2

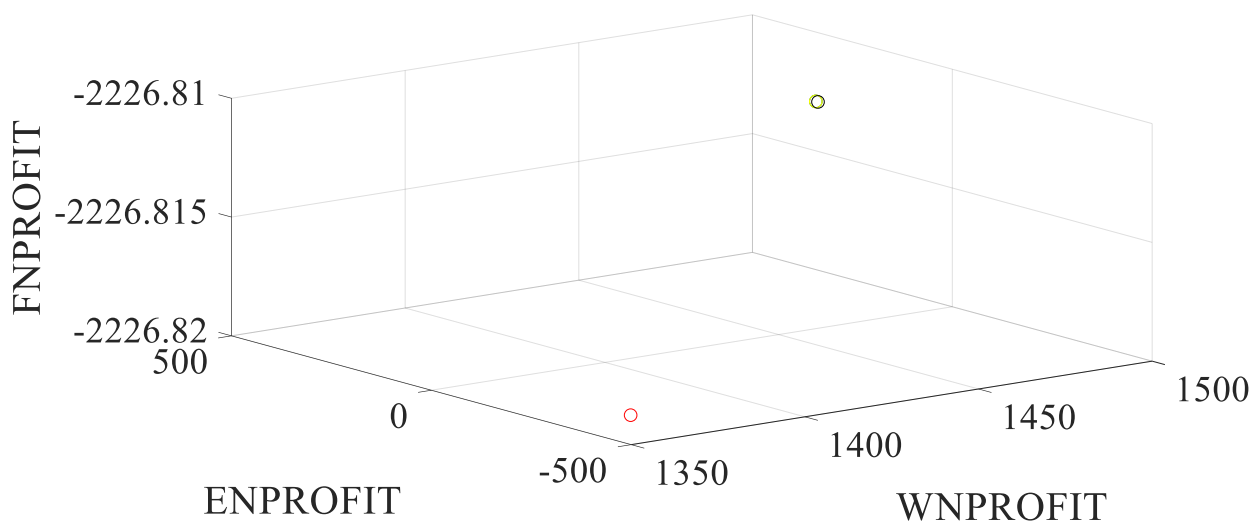


Figura 4.9. Representación en 3D del Caso 2.

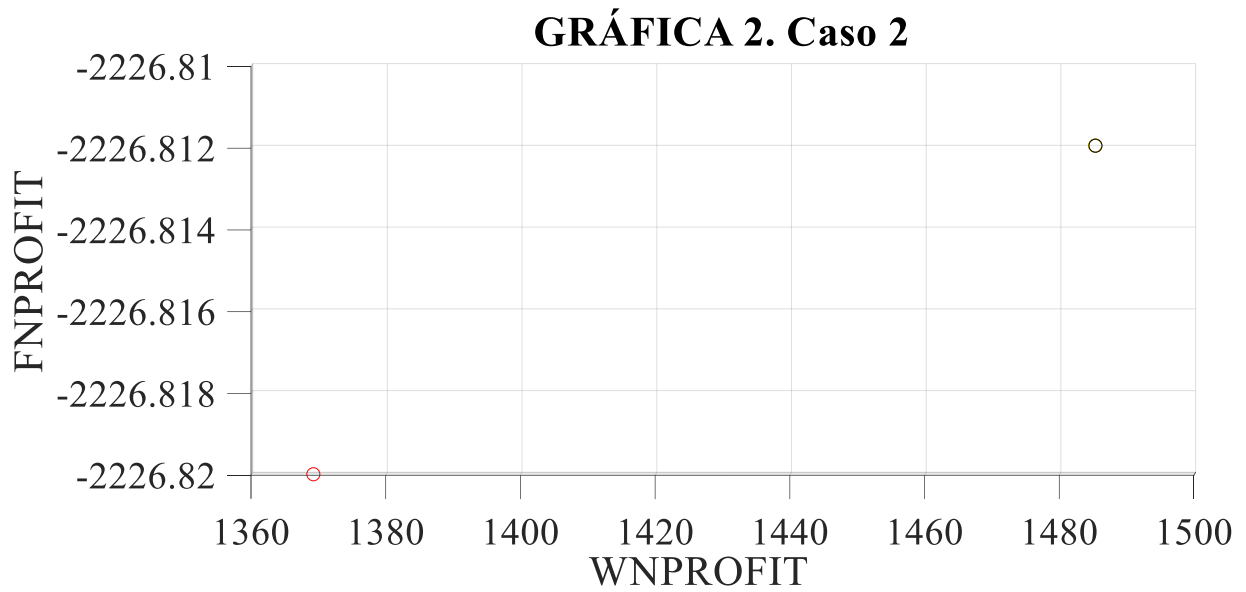


Figura 4.10. Valores del Caso 2 en 2D con los ejes en FNPROFIT y WNPROFIT.

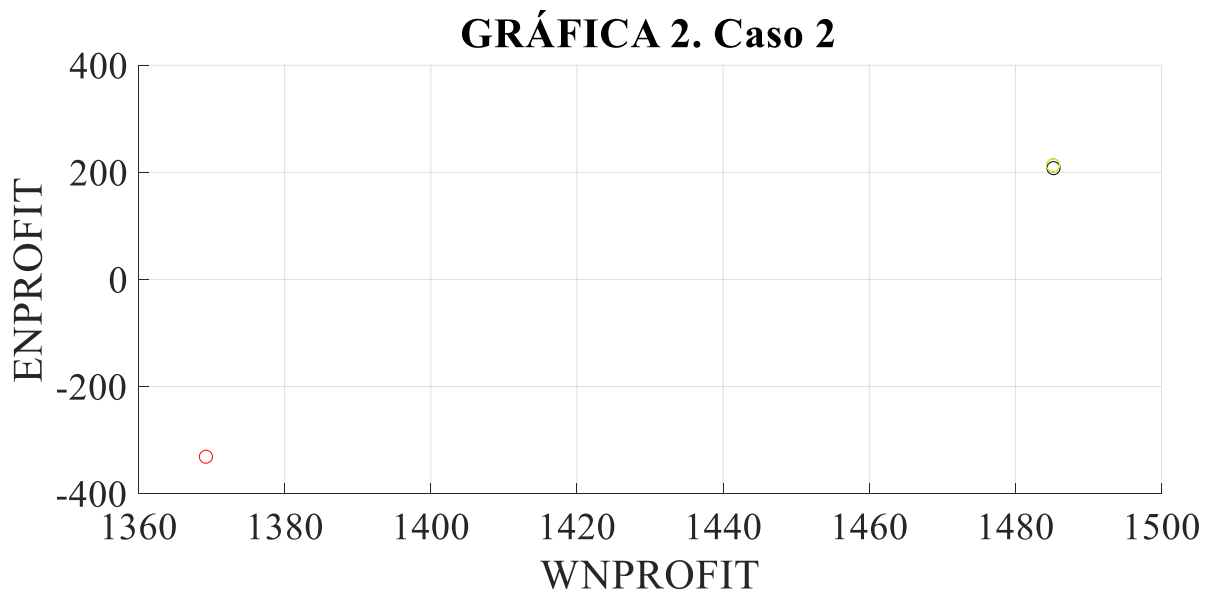


Figura 4.11. Representación 2D del Caso 2 con ejes en ENPROFIT y WNPROFIT.

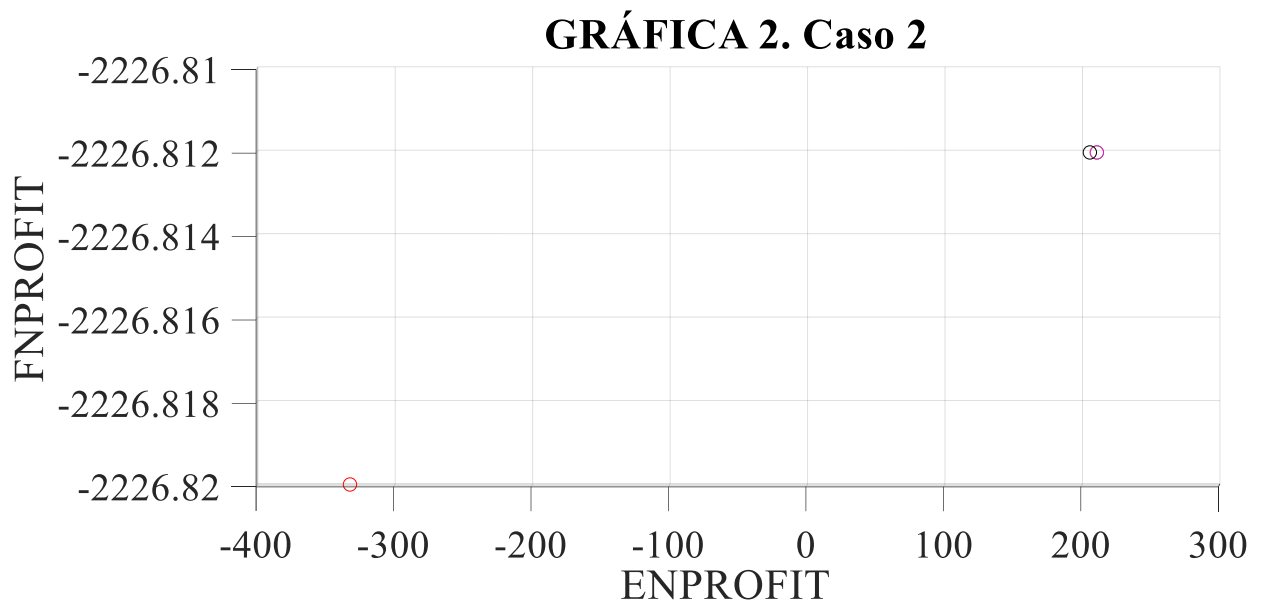


Figura 4.12. Valores del Caso 2 vistos en 2D con ejes en FNPROFIT y ENPROFIT.

Se aprecia que sólo en el beneficio del sector energético hay una ligera diferencia entre Nash y los demás esquemas de justicia. Cabe señalar que en todos los casos optimizados, excepto el utópico, las funciones OGHGE y ONJOBS se encuentran casi en su peor caso con un 95-98% de cercanía al punto Nadir como se puede corroborar en la **Tabla 4.6**.

En el Caso 2, ninguna de las configuraciones obtenidas por los esquemas de justicia de repartición de bienes utiliza un colector solar para las nuevas plantas de potencia, esto impacta severamente la emisión de gases de efecto invernadero. En las **Figuras 4.13-4.15** se muestran las estructuras de los tres esquemas de justicia.

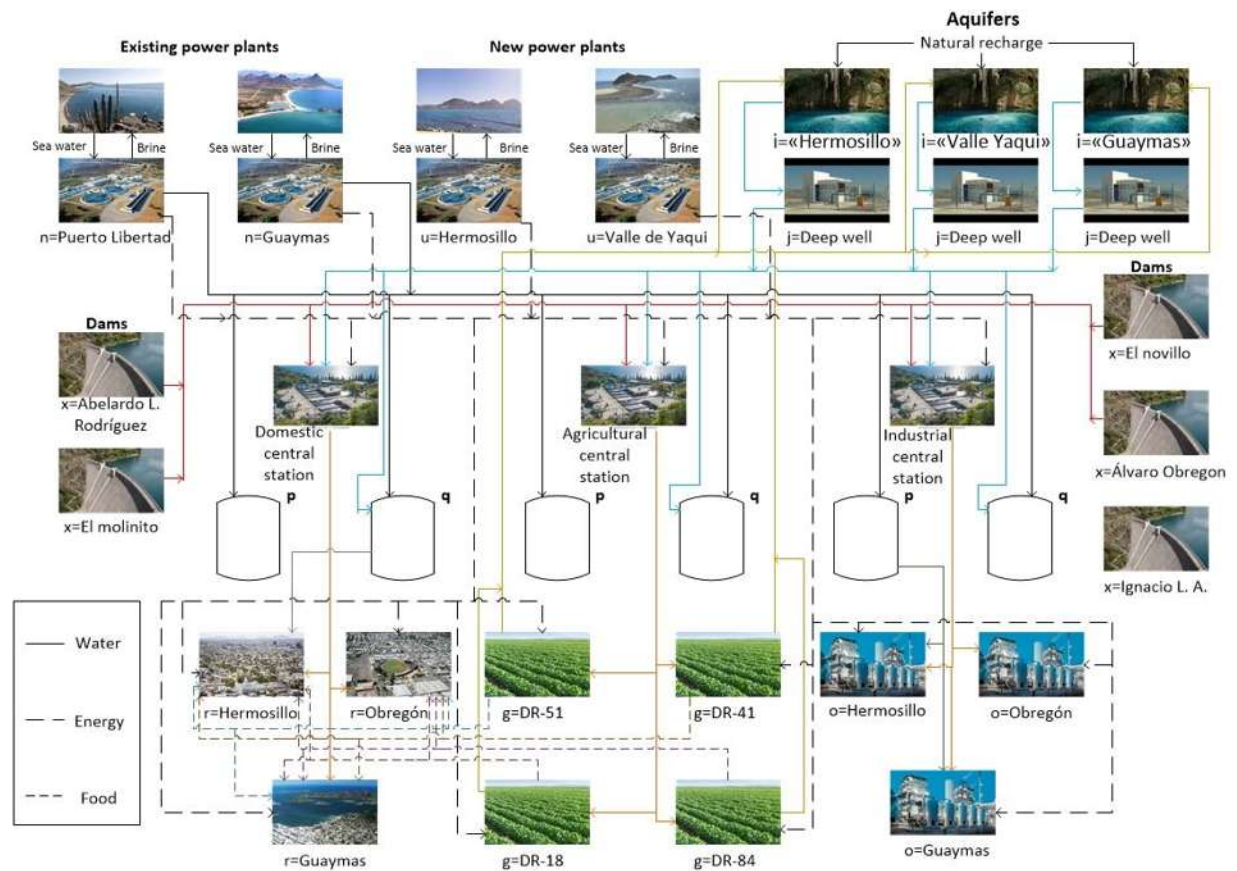


Figura 4.13. Estructura resultante del Caso 2-Nash.

En este esquema de justicia se hace uso de las dos posibles plantas de potencia, aunque sólo como generadoras de energía, en cambio las plantas de potencia existentes también mandan agua a los tanques de almacenamiento existentes “p” y a los nuevos “q”. También hay recarga de los tanques “q” proveniente de los acuíferos. Es notable que en esta configuración no se extraiga agua de la presa Ignacio L.A.

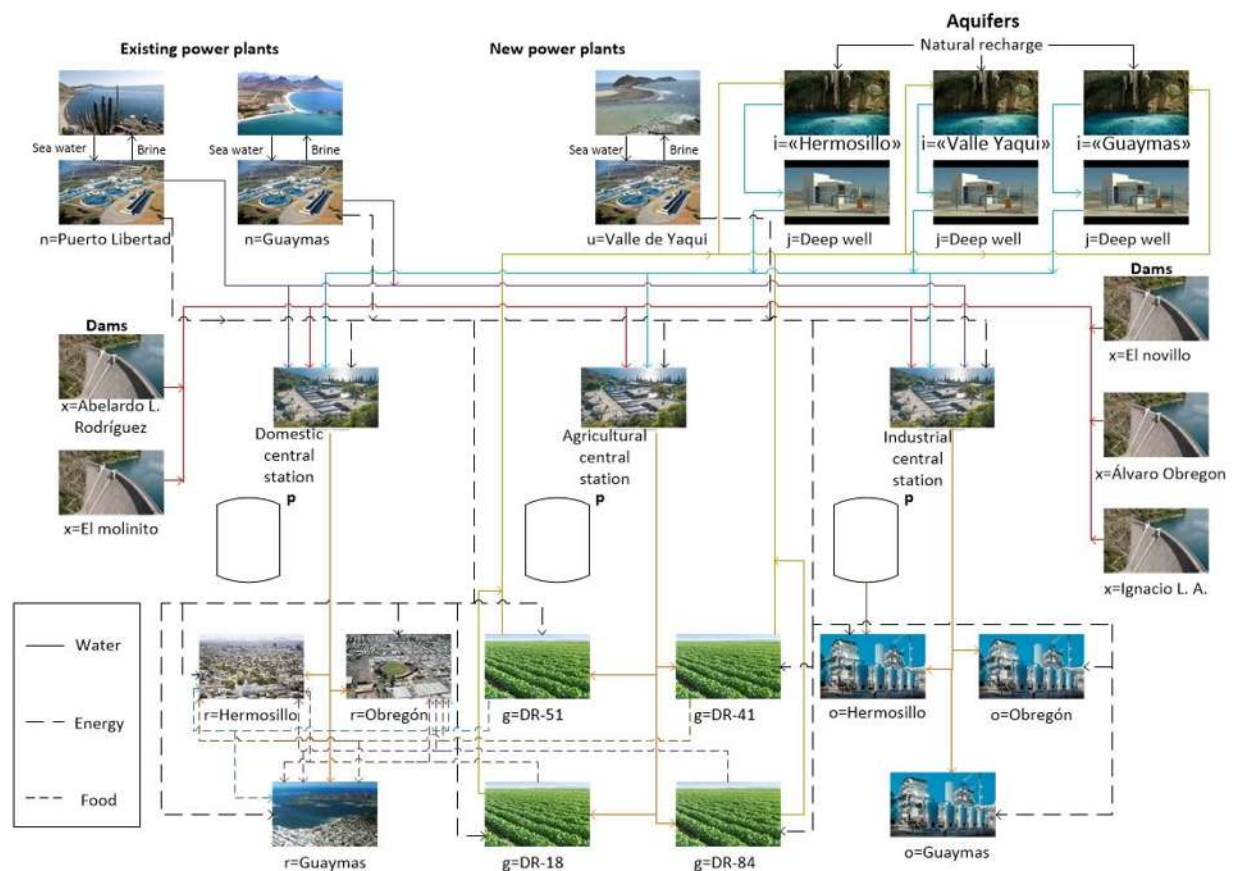


Figura 4.14. Estructura del Caso 2-Rawlsian.

En esta configuración no se construyen tanques de almacenamiento “q” ni la planta de potencia de la costa de Hermosillo. Se usan los tanques de almacenamiento existentes para abastecer la industria en Hermosillo, el resto de la demanda se cubre desde las estaciones centrales que son abastecidas de agua desde los acuíferos, las presas y las plantas de potencia existentes “n”.

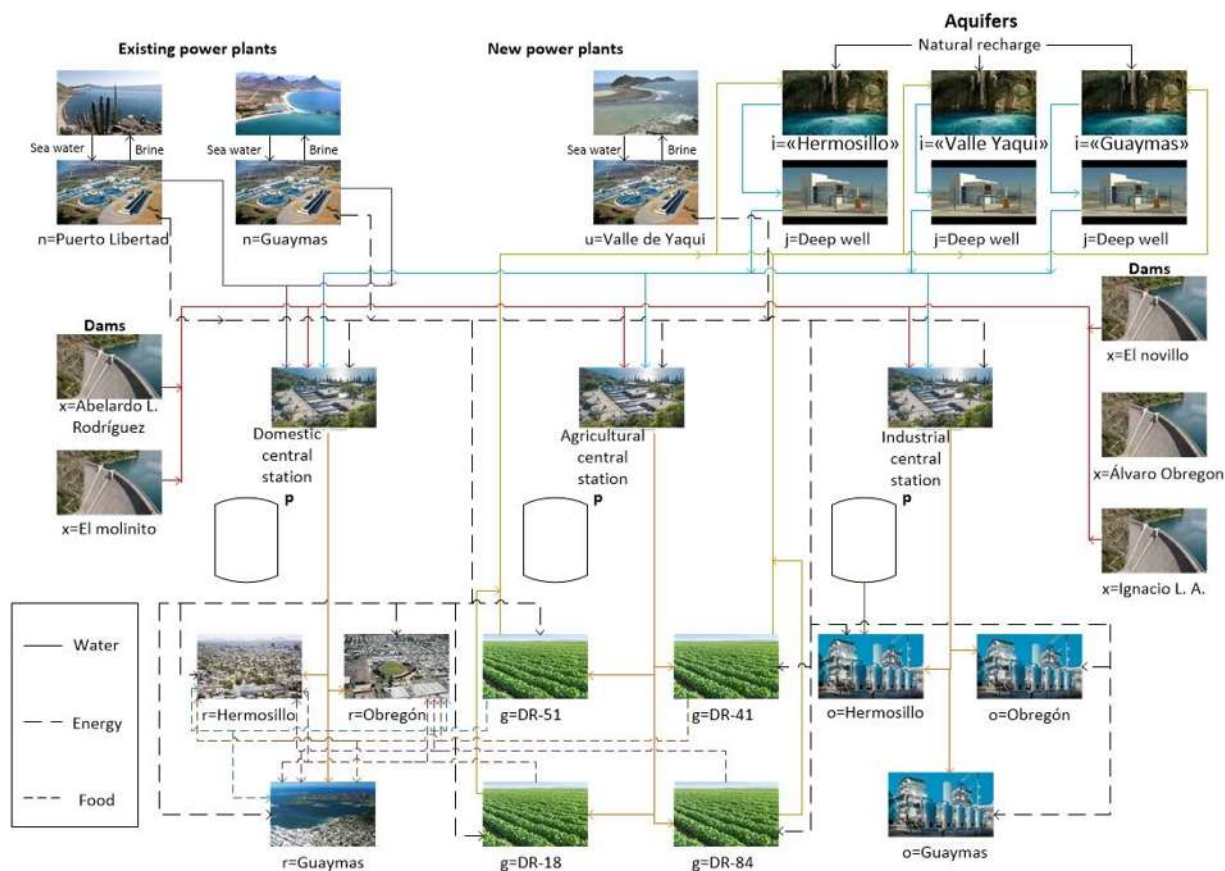


Figura 4.15. Estructura del Caso 2-Social Welfare.

En este caso tampoco se construye la planta de Hermosillo ni los tanques de almacenamiento “q”. Al igual que Rawlsian, se usan los tanques de almacenamiento existentes para la industria de Hermosillo. Las estaciones centrales son abastecidas de los acuíferos y las presas, menos la presa Álvaro Obregón.

Ahora analicemos el comportamiento del uso del combustible. En las **Tablas 4.7-4.9** se compila la información del tipo y uso de combustible para cada esquema justicia de repartición de bienes. Como se mencionó anteriormente, ningún esquema considera el uso del colector solar. En el esquema de Nash se aprecia que toda la energía la obtiene de combustibles fósiles, lo que impacta negativamente a la emisión de gases de efecto invernadero, que aunque no es una función objetivo en este caso, se quiso revisar cómo afecta, precisamente, el hecho de optimizar sólo el beneficio económico. Nash consume más combustibles fósiles que Rawlsian y *Social Welfare*, un 0.01 % más. En cambio, tanto Rawlsian como *Social Welfare* usan un poco de biocombustibles.

Tabla 4.8. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 2-Rawlsian.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	-	-	-	3.50E+04	-	11328839.77	-
172	-	-	-	3.50E+04	-	12103494.11	-
344	-	-	-	3.50E+04	-	12818043.65	-
516	-	-	-	3.50E+04	-	12818387.65	-
688	-	-	-	3.50E+04	-	13414103.6	-
688	-	-	-	3.50E+04	-	14128825.14	-
688	-	-	-	3.50E+04	-	14546118.7	-
860	-	-	-	3.50E+04	-	17168025.68	-
860	-	-	-	3.50E+04	-	18120930.4	-
1204	-	-	-	3.50E+04	-	18180863.19	-
1720	-	-	-	3.50E+04	-	18716302.34	-
2580	-	-	-	3.50E+04	-	19370919.09	-
10492	0	0	0	420000	0	182714853.3	0

Tabla 4.9. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 2-Social Welfare.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	-	-	-	3.50E+04	-	11328839.77	-
172	-	-	-	3.50E+04	-	12103494.11	-
344	-	-	-	3.50E+04	-	12818043.65	-
516	-	-	-	3.50E+04	-	12818387.65	-
688	-	-	-	3.50E+04	-	13414103.59	-
688	-	-	-	3.50E+04	-	14128825.13	-
688	-	-	-	3.50E+04	-	14546118.7	-
860	-	-	-	3.50E+04	-	17168025.68	-
860	-	-	-	3.50E+04	-	18120930.39	-
1204	-	-	-	3.50E+04	-	18180863.19	-
1720	-	-	-	3.50E+04	-	18716302.34	-
2580	-	-	-	3.50E+04	-	19370919.09	-
10492	0	0	0	420000	0	182714853.3	0

4.1.3 Caso 3

Para este caso se consideran como funciones objetivo cada recurso y las emisiones, así como los trabajos generados. Los valores obtenidos se reunieron en la **Tabla 4.10**.

Tabla 4.10. Valores obtenidos en el Caso 3.

Función	Utópico	Nadir	Social Welfare	Nash	Rawlsian
WNPROFIT (MD)	1485.233	1369.287	1485.233	1484.965	1484.668
ENPROFIT (MD)	211.964	-332.129	153.434	174.85	126.283
FNPROFIT (MD)	-2226.812	-2226.812	-2226.812	-2226.812	-2226.812
OGHGE (ton CO ₂)	12619000	14575000	13551000	14485000	12910000
ONJOBS	57168.147	8878.98	46050.696	10616.498	49985.53

En las **Figuras 4.16-4.19** se pueden ver los valores obtenidos por cada optimización. En este esquema los colores son indicadores de las funciones OGHGE y ONJOBS, por lo general se mueven a la par en la misma dirección. Ya que una representación en 5D no se pudo realizar.

El verde indica 0-19.99% de cercanía con lo utópico. Cian apunta a los valores que están de 20-39.99% del utópico. El amarillo muestra los puntos que se encuentran entre 40-59.99% del utópico. El magenta es un valor que se encuentra entre 60-79.99% alejado del valor utópico y finalmente el rojo muestra un valor del 80-100%.

En la **Figura 4.19** se aprecia de forma clara la ubicación de cada esquema de justicia, vemos que aunque Nash está más cerca del punto utópico, está de color rojo, esto se debe a que Nash considera uso exclusivo de combustibles fósiles, como se puede apreciar en la **Tabla 4.11** mientras que Rawlsian y *Social Welfare* usan biocombustibles y colectores solares.

GRÁFICA 3. Caso 3

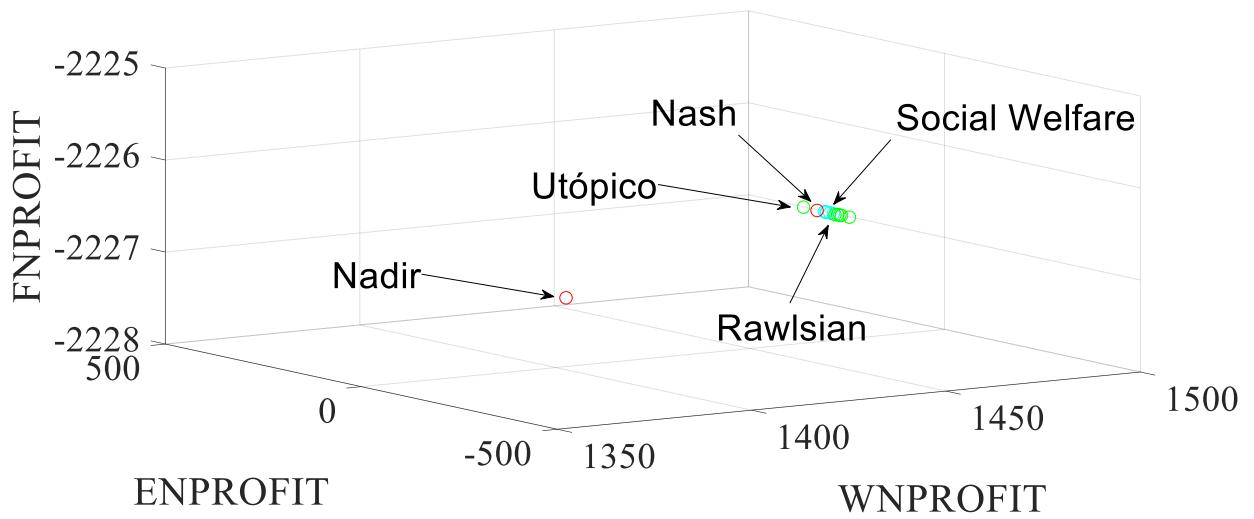


Figura 4.16. Representación 3D del Caso 3.

GRÁFICA 3. Caso 3

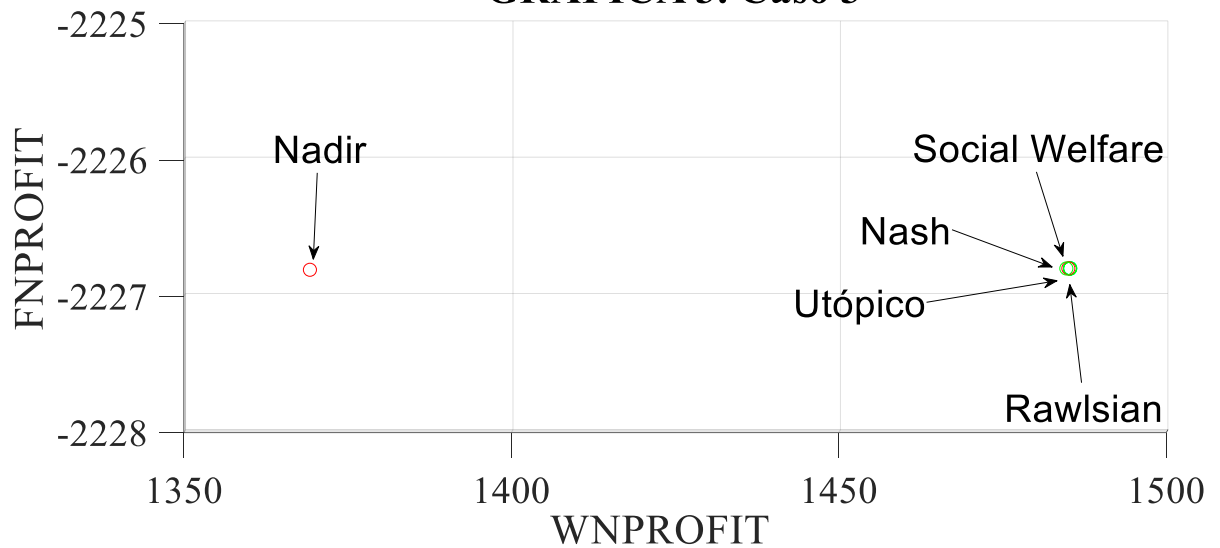


Figura 4.17. Representación 2D del Caso 3 con los ejes FNPROFIT y WNPORFIT.

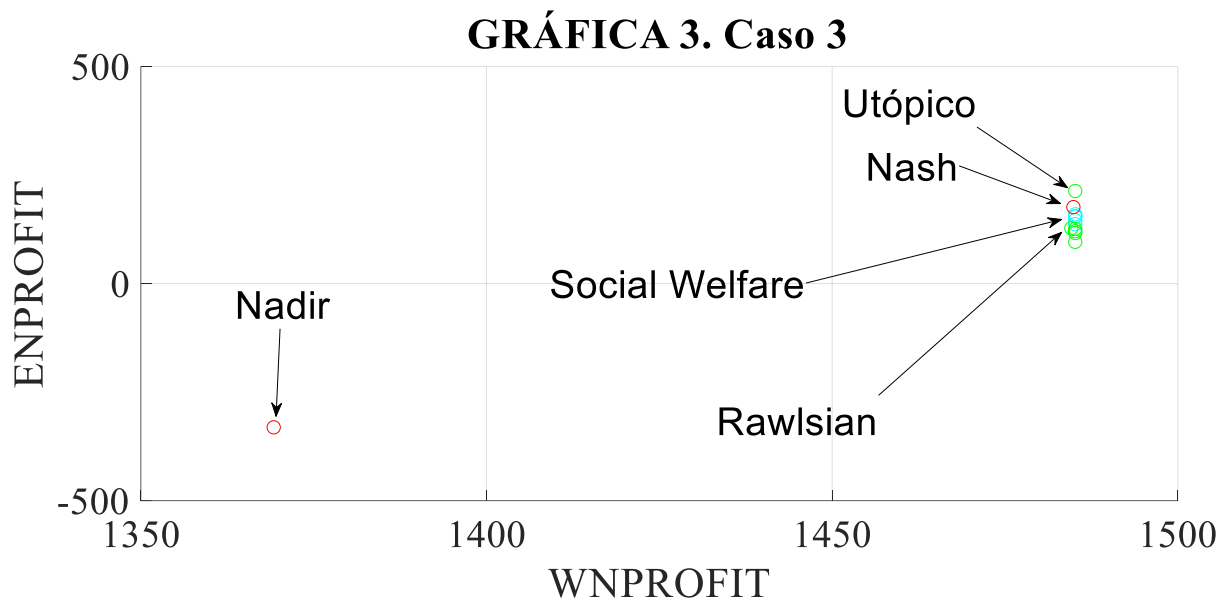


Figura 4.18. Representación del Caso 3 en 2D con ejes en ENPROFIT y WNPORFIT.

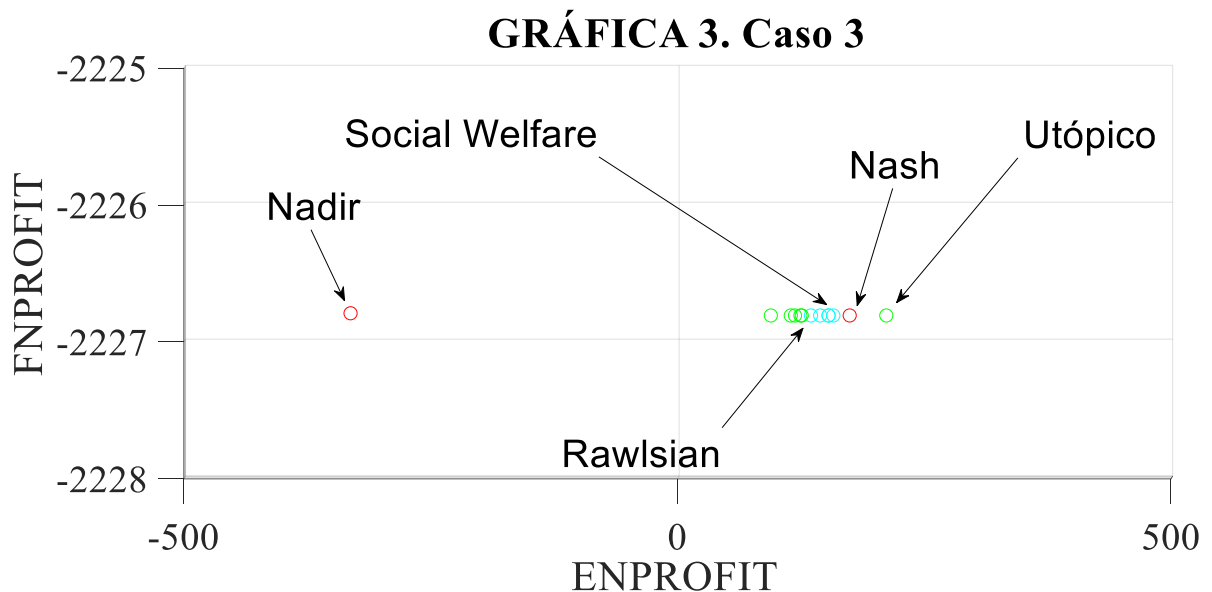


Figura 4.19. Valores del Caso 3 en 2D con ejes en FNPROFIT y ENPROFIT.

En las **Figuras 4.20-4.22** se muestran las estructuras resultantes de los tres esquemas de justicia. Es importante señalar que Nash no considera el uso de colectores solares mientras que Rawlsian y *Social Welfare* sí lo hacen, eso impacta en el ámbito ambiental y de generación de trabajos. También hay diferencia entre la construcción o no de las plantas de potencia posibles.

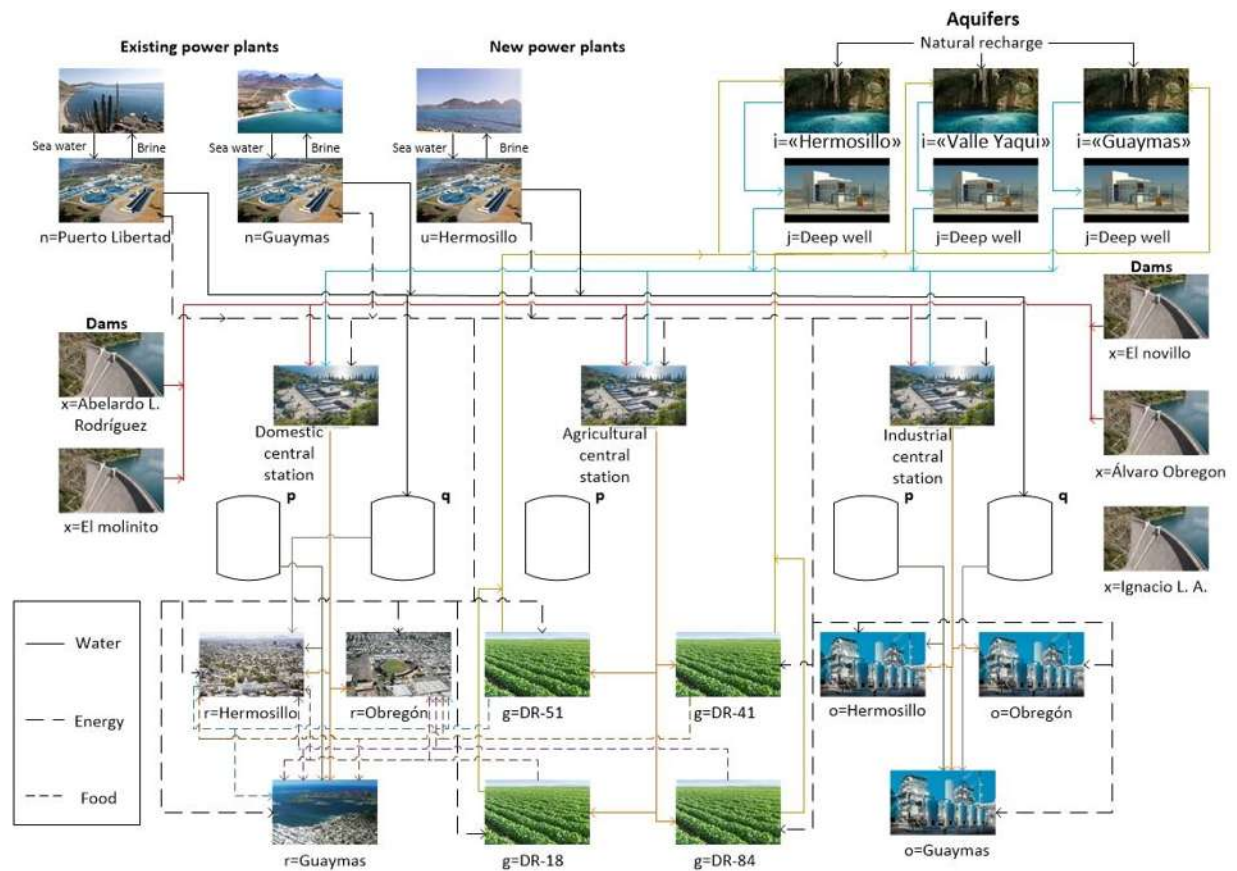


Figura 4.20. Estructura resultante del Caso 3-Nash.

Vemos que en este caso no se construye la planta de potencia del valle de Yaqui. También salta a la vista que no se usa agua desde la presa Ignacio L.A. Se emplean los tanques de almacenamiento “q” y se usan para abastecer las casas de Hermosillo y la industria de Guaymas, mientras que los tanques existentes “p” se usan para las casas de Guaymas y la industria tanto de Guaymas como de Hermosillo. Los tanques de almacenamiento se alimentan de agua proveniente de las plantas de potencia.

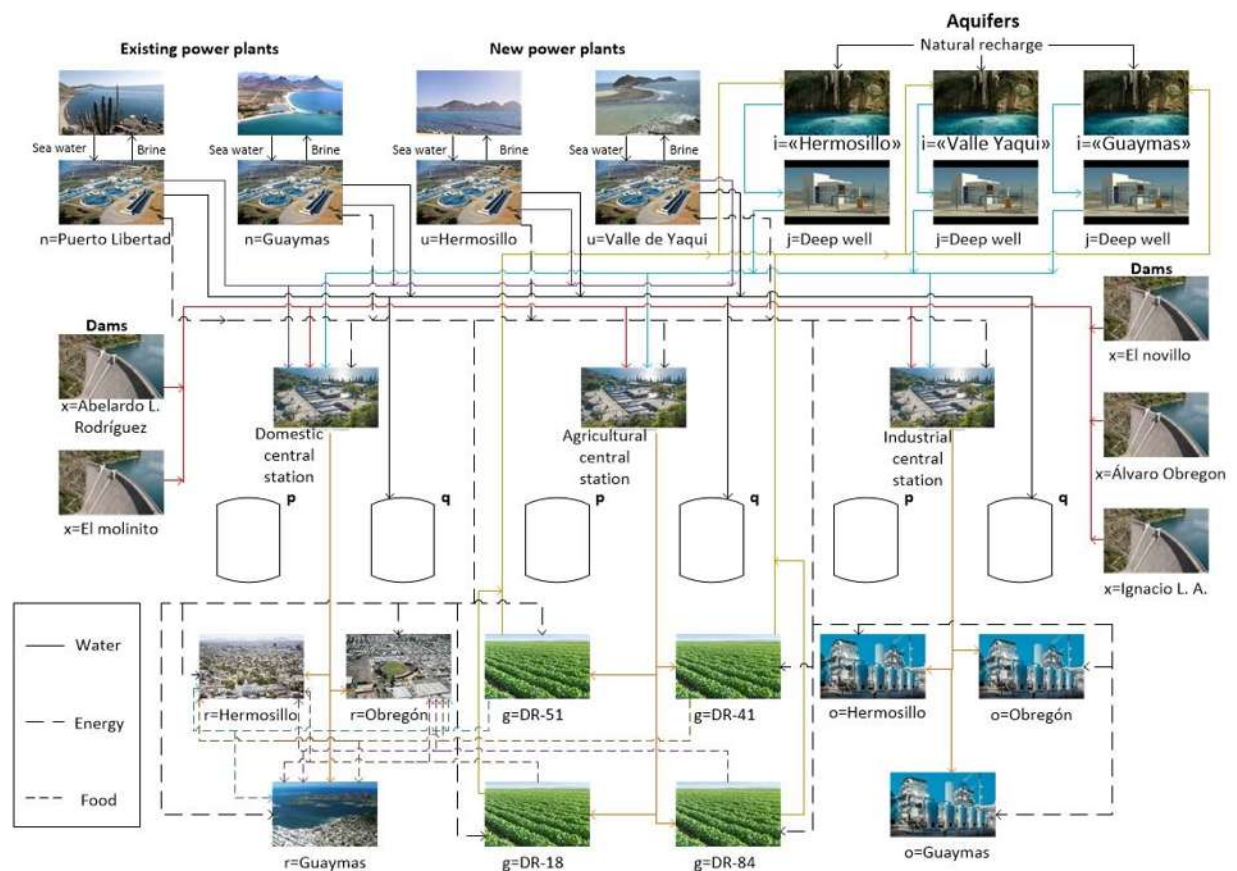


Figura 4.21. Estructura del Caso 3-Rawlsian.

En cuanto al esquema de Rawlsian en el Caso 3, se ve en la **Figura 4.21** que se decide el uso de las dos plantas de potencia posibles "u", también manda agua de las 5 presas a las estaciones centrales, las cuáles la distribuyen entre los usuarios. Es notorio que las cuatro plantas de potencia mandan agua a las estaciones centrales domésticas (líneas moradas). Se usan los tanques de almacenamiento "q" sólo de almacén y no como abastecimiento.

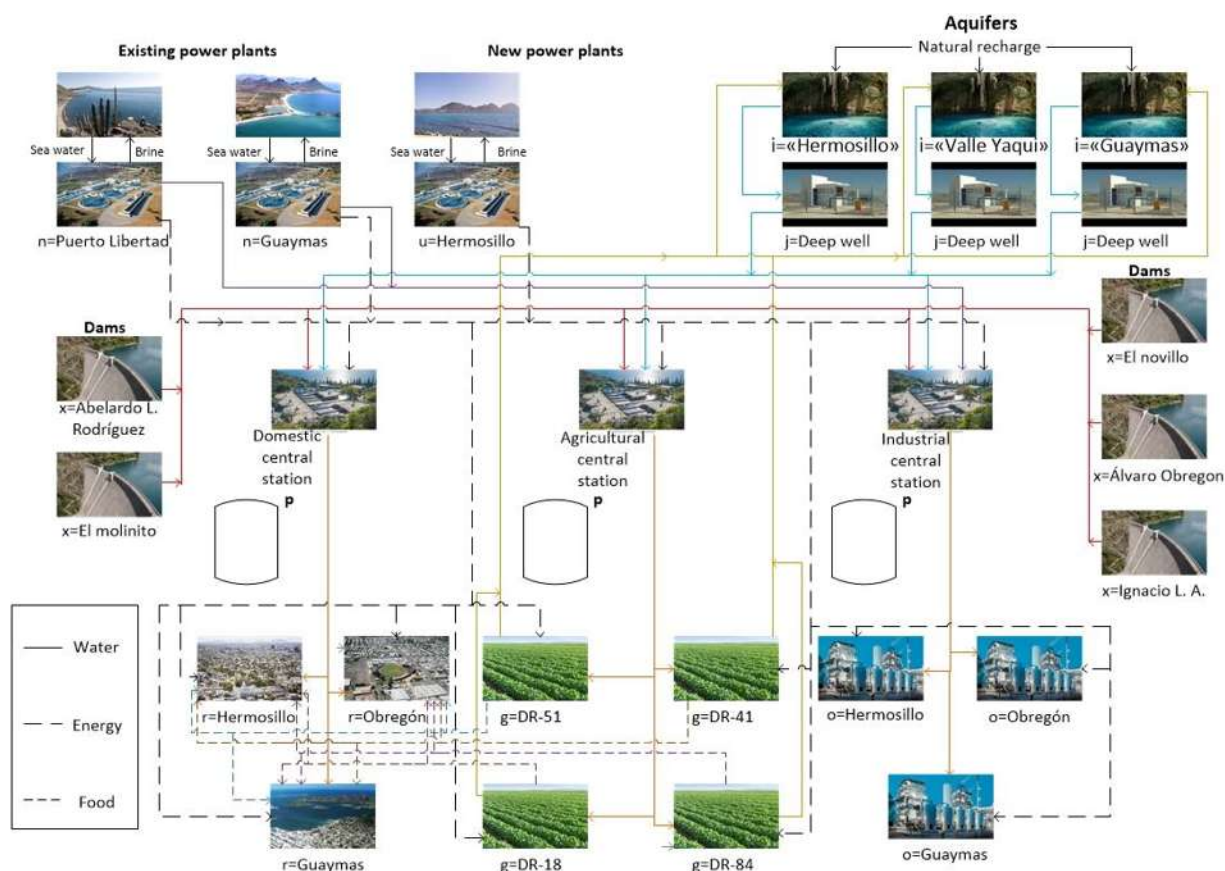


Figura 4.22. Estructura resultante del Caso 3-Social Welfare.

En el último caso, con el esquema *Social Welfare* se puede apreciar en la **Figura 4.22** que no se construye la planta de potencia en el valle Yaqui ni los tanques de almacenamiento “q”. Esta configuración también emplea el agua de las 5 presas para abastecer las estaciones centrales. Se usa agua de las plantas de potencia desaladoras para la industria.

Ahora veamos el uso de combustibles de cada esquema de repartición. En las **Tablas 4.11-4.13** se reúne la información pertinente acorde al tipo y uso de combustibles que cada esquema de justicia de repartición de bienes usa. Se puede apreciar que Nash vuelve a despreciar el uso de colectores solares y de biocombustibles (es una cantidad ínfima la que usa), esto por supuesto impacta negativamente en la emisión de gases de efecto invernadero, por eso el punto de Nash en los diagramas en 3D y 2D es de color rojo. Nash es el que más uso de combustibles fósiles tiene; 10.88 % más que Rawlsian y 6.45 % más que *Social Welfare*. En cuanto a uso de biocombustibles, *Social Welfare* tiene la delantera y usa 6.49 % más que Rawlsian y 94.89 % más

que Nash, esto le ayuda a *Social Welfare* a no emitir muchos gases de efecto invernadero, por eso su punto en los diagramas 3D y 2D es de color cian (20-39.9 % de cercanía al punto utópico en cuanto a OGHGE y ONJOBS). Finalmente el mayor uso del colector solar lo lleva Rawlsian, 40.75 % más que *Social Welfare* y Nash no lo usa. Rawlsian también es el que menos combustibles fósiles usa por eso emite menos gases de efecto invernadero y en los diagramas 3D y 2D se le distingue con el color verde.

Tabla 4.11. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 3-Nash.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
860	-	-	325.6	-	-	11364011.77	-
-	-	-	-	-	-	12138666.11	-
-	-	-	-	-	-	12853731.65	-
-	-	-	-	-	-	14163825.14	-
-	-	-	-	-	-	18157134.4	-
-	-	-	-	-	-	19408499.09	-
-	-	-	-	-	-	18753022.34	-
-	-	-	-	-	-	18216723.19	-
-	-	-	-	-	-	17203713.68	-
-	-	-	-	-	-	14581806.7	-
-	-	-	-	-	-	13449294	-
-	-	-	-	-	-	12853731.65	-
860	0	0	325.6	0	0	183144159.7	0

Tabla 4.12. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 3-Rawlsian.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	260	4.57E-08	296	1.43E-05	-	10598179.52	245584.1515
172	260	321.6	296	-	-	10790887.26	769864.4928
344	260	361.8	325.6	-	-	11117699.62	769864.4928
516	312	363.7769469	325.6	-	-	11999466.44	859656.483
688	312	402	355.2	-	-	12852831.65	859656.483
688	338	402	355.2	-	-	12860735.33	933853.2606
688	338	402	384.8	-	-	13448466	933853.2606
860	364	-	414.4	-	-	15334126.96	1030744.591
860	416	-	444	-	-	15558383.01	1030744.591
1204	520	-	444	-	-	15900744.24	1081832.749
1720	520	-	444	-	-	16077437.02	1081832.749
2580	520	-	444	-	-	16684135.09	1156876.477
-	-	-	-	-	-	-	1156876.477
-	-	-	-	-	-	-	1298200.804
-	-	-	-	-	-	-	1298200.804
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1336249.661
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
-	-	-	-	-	-	-	1360208.997
10492	4420	2253.176947	4528.8	1.43196E-05	0	163223092.1	19900559.18

Tabla 4.13. Cantidad de energía empleada de cada tipo para el Caso 3-Social Welfare.

Biocombustibles (GJ)				Combustibles fósiles (GJ)			Colector Solar (GJ)
Biomasa	Biogás	Biodiésel	Bioetanol	Carbón	Gasóleo	Gas natural	
172	260	201	296	4.31E-08	-	10688344.19	624907.683
172	260	221.1	296	-	-	11367822.91	663366.8412
344	260	241.2	325.6	-	-	11821390.66	674738.586
516	312	241.2	325.6	-	-	12227682.76	769864.4928
688	312	281.4	355.2	-	-	12784817.75	859656.483
688	338	281.4	355.2	-	-	13081017.79	933853.2606
688	338	321.6	384.8	-	-	13720391.82	1030744.591
860	364	361.8	414.4	-	-	16267980.22	1081832.749
860	416	402	444	-	-	16856545.59	1156876.477
1204	520	402	444	-	-	17057620.71	1298200.804
1720	520	402	444	-	-	17413686.68	1336249.661
2580	520	402	444	-	-	18044344.09	1360208.997
10492	4420	3758.7	4528.8	4.30824E-08	0	171331645.2	11790500.63

Conclusiones

El presente trabajo presenta una serie de evaluaciones que se hicieron a la misma zona de Sonora mediante diferentes acercamientos (esquemas de justicia de repartición de bienes), cada esquema tiene su ventaja y desventaja que se puede apreciar en los resultados (ver capítulo 4). Por mencionar lo más representativo se sabe que, *Social Welfare* es un esquema que utiliza la media aritmética, lo cual puede generar desproporciones cuando hablamos de cantidades muy pequeñas y muy grandes, es por eso que se opta por la normalización, para tener valores de 0 a 1, a pesar de esto, este esquema tiene múltiples configuraciones que producen un mismo resultado, caso contrario con Nash, que aunque en el Caso 2 y 3, fue el que más emisiones y menos trabajos tuvo, tiene una sola configuración que da el resultado deseado. Rawlsian es una forma de evaluar los peores escenarios, es un acercamiento a la incertidumbre pero, no se puede catalogar del todo como tal. Finalmente se pueden apreciar los siguientes puntos en el trabajo:

- Se obtuvo una metodología para la evaluación de la región de Sonora que se estudiaría, la cual, permitió obtener una serie de redes óptimas según el caso y el esquema de justicia.
- Se evaluó la región considerando tres casos diferentes y tres esquemas de justicia de repartición de bienes diferentes, con lo cual se obtuvieron 9 redes óptimas.
- Se obtuvo la metodología necesaria para la implementación de diferentes esquemas de justicia de repartición de bienes.

Este proyecto en un inicio contemplaba hacer una evaluación con incertidumbre, resiliencia y quizá, si el tiempo alcanzaba, integrar *machine learning*. Ninguna de las tres se pudo implementar por falta de tiempo para desarrollar la metodología pertinente. Es por eso que, eso queda como trabajo futuro que es muy interesante de abordar, por las particularidades que cada concepto aporta a la optimización de procesos. Además la incorporación de otros esquemas de justicia de repartición de bienes como Kalai-Smorodinsky.

Bibliografía

- 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. *Agricultural Water Management*, *152*, 161-172. doi: 10.1016/j.agwat.2015.01.007
- BBC. (2018). "Día cero": 4 claves para entender por qué Ciudad del Cabo puede ser la primera gran ciudad del mundo en quedarse sin agua. from <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-42869020>
- Dahdah, T. H., & Mitsos, A. (2014). Structural optimization of seawater desalination: I. A flexible superstructure and novel MED–MSF configurations. *Desalination*, *344*, 252-265. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.03.030>
- Damerau, K., Patt, A. G., & van Vliet, O. P. R. (2016). Water saving potentials and possible trade-offs for future food and energy supply. *Global Environmental Change*, *39*, 15-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.03.014>
- FAO. (2018). Evaluación Rápida del Nexo Agua-Energía-Alimentos. from <http://www.fao.org/energy/water-food-energy-nexus/water-energy-food-nexus-ra/es/>
- Gao, J., & You, F. (2015). Optimal design and operations of supply chain networks for water management in shale gas production: MILFP model and algorithms for the water-energy nexus. *AIChE Journal*, *61*(4), 1184-1208. doi: 10.1002/aic.14705
- Garcia, D., & You, F. (2015). Life Cycle Network Modeling Framework and Solution Algorithms for Systems Analysis and Optimization of the Water-Energy Nexus. *Processes*, *3*(3), 514.
- Garcia, D. J., & You, F. (2015). Multiobjective optimization of product and process networks: General modeling framework, efficient global optimization algorithm, and case studies on bioconversion. *AIChE Journal*, *61*(2), 530-554. doi: 10.1002/aic.14666
- Gebreslassie, B. H., Waymire, R., & You, F. (2013). Sustainable design and synthesis of algae-based biorefinery for simultaneous hydrocarbon biofuel production and carbon sequestration. *AIChE Journal*, *59*(5), 1599-1621. doi: 10.1002/aic.14075
- González-Bravo, R., Saucedo-Valenzuela, M., Mahlknecht, J., Rubio-Castro, E., & Ponce-Ortega, J. M. (2018). Optimization of Water Grid at Macroscopic Level Analyzing Water–Energy–Food Nexus. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *6*(9), 12140-12152. doi: 10.1021/acssuschemeng.8b02484
- Gurdak, J. J., Geyer, G. E., Nanus, L., Taniguchi, M., & Corona, C. R. (2017). Scale dependence of controls on groundwater vulnerability in the water–energy–food nexus, California Coastal Basin aquifer system. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *11*, 126-138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.01.002>
- Holden, E., Linnerud, K., & Banister, D. (2014). Sustainable development: Our Common Future revisited. *Global Environmental Change*, *26*, 130-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.006>
- Høyer, K. G. (2000). Sustainable Mobility – The Concept and Its Implications.
- Jalilov, S.-M., Amer, S. A., & Ward, F. A. (2018). Managing the water-energy-food nexus: Opportunities in Central Asia. *Journal of Hydrology*, *557*, 407-425. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.040>

- Kursun, B., Bakshi, B. R., Mahata, M., & Martin, J. F. (2015). Life cycle and emergy based design of energy systems in developing countries: Centralized and localized options. *Ecological Modelling*, 305, 40-53. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2015.03.006
- Li, M., & Guo, P. (2014). A multi-objective optimal allocation model for irrigation water resources under multiple uncertainties. *Applied Mathematical Modelling*, 38(19-20), 4897-4911. doi: 10.1016/j.apm.2014.03.043
- 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. *Applied Thermal Engineering*, 52(2), 402-419. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.047>
- Martínez-Guido, S. I., Betzabe González-Campos, J., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., & El-Halwagi, M. M. (2016). Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(2), 553-562. doi: 10.1007/s10098-015-1039-1
- Martinez-Hernandez, E., Leach, M., & Yang, A. (2017). Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym. *Applied Energy*, 206, 1009-1021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.022>
- Miralles-Wilhelm, F. (2016). Development and application of integrative modeling tools in support of food-energy-water nexus planning—a research agenda. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6(1), 3-10. doi: 10.1007/s13412-016-0361-1
- Morankar, D. V., Srinivasa Raju, K., & Nagesh Kumar, D. (2013). Integrated Sustainable Irrigation Planning with Multiobjective Fuzzy Optimization Approach. *Water Resources Management*, 27(11), 3981-4004. doi: 10.1007/s11269-013-0391-3
- Munguía-López, A. D. C., Sampat, A. M., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., & Zavala, V. M. (2019). Fairness-guided design of water distribution networks for agricultural lands. *Computers and Chemical Engineering*, 130. doi: 10.1016/j.compchemeng.2019.106547
- Paschalidou, A., Tsatiris, M., & Kitikidou, K. (2016). Energy crops for biofuel production or for food? - SWOT analysis (case study: Greece). *Renewable Energy*, 93, 636-647. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.040>
- Rawls, J. (1971) *A Theory of Justice*. Harvard Press, Cambridge.
- Sampat, A. M., & Zavala, V. M. (2019). Fairness measures for decision-making and conflict resolution. *Optimization and Engineering*, 20(4), 1249-1272. doi: 10.1007/s11081-019-09452-3
- Taniguchi, M., Masuhara, N., & Burnett, K. (2017). Water, energy, and food security in the Asia Pacific region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 9-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.005>
- Tsolas, S. D., Karim, M. N., & Hasan, M. M. F. (2018). Optimization of water-energy nexus: A network representation-based graphical approach. *Applied Energy*, 224, 230-250. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.094>
- WCED. (1987). Our Common Future. from <http://www.un-documents.net/ocf-02.htm#I>
- WWAP. (2017a). Energía. from <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/energy/>
- WWAP. (2017b). La agricultura es, con diferencia, el mayor consumidor de agua dulce. from <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/facts-and-figures/all-facts-wwdr3/fact2-agricultural-use/>

- Yang, L., Grossmann, I. E., Mauter, M. S., & Dilmore, R. M. (2015). Investment optimization model for freshwater acquisition and wastewater handling in shale gas production. *AIChE Journal*, *61*(6), 1770-1782. doi: 10.1002/aic.14804
- Yue, D., Pandya, S., & You, F. (2016). Integrating Hybrid Life Cycle Assessment with Multiobjective Optimization: A Modeling Framework. *Environmental Science and Technology*, *50*(3), 1501-1509. doi: 10.1021/acs.est.5b04279
- Zhang, J., Campana, P. E., Yao, T., Zhang, Y., Lundblad, A., Melton, F., & Yan, J. (2017). The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: a case study in the United States. *Applied Energy*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.036>
- Zheng, F., & Zecchin, A. (2014). An efficient decomposition and dual-stage multi-objective optimization method for water distribution systems with multiple supply sources. *Environmental Modelling & Software*, *55*, 143-155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.01.028>