



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN,
USO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA.**

TESIS presentada por:

SANDRA CECILIA CERDA FLORES

Para obtener el grado de:

INGENIERO QUIMICO

Asesor: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Morelia, Mich.

Agosto 2019

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mi sincero agradecimiento a mi asesor, el **Dr. Fabricio Nápoles Rivera**, por su paciencia, motivación y confianza para poder desarrollar este trabajo.

Además de mi asesor, me gustaría agradecer a mi comité de tesis, el **Dr. Javier Lara Romero** y el **M.C. Arnulfo Marín Lázaro** por su participación en la culminación de esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, **Jaime Cerda Jacobo** y **Sandra Cecilia Cerda Flores**. Cada vez que estuve a punto de rendirme, me apoyaron y no me dejaron tomar nunca el camino fácil. Soy lo que soy por ustedes y estoy eternamente agradecida. Esta tesis es un testimonio de su amor y aliento incondicional.

A mis hermanos **Jaime Cerda Flores** y **Pablo Cerda Flores**, agradezco su paciencia, presencia y apoyo durante los momentos más difíciles,

Nada de esto podría haber sucedido sin mi familia. Agradezco a mi abuelita, **Ma. De los Ángeles Ibarra**, por estar siempre presente. A mis tíos, tías y primos por su apoyo y consejos a lo largo de la carrera.

Tantos años de estudio en esta facultad requirieron más que apoyo académico, y quiero agradecer a mis amigos por escucharme y, a veces, tener que tolerarme durante los últimos años. No puedo comenzar a expresar mi gratitud y aprecio por su amistad: Leopoldo, Phanie, Daniel, Lulú, Hirepan, Miryam, Arturo, Andrea, Edgar, Juan Carlos, Jorge e Isaac; agradezco su apoyo personal y profesional durante el tiempo que pasé en la Universidad.

A **Leopoldo González González**, por creer siempre en mí, y por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera y de este proyecto.

Agradezco también a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Química por darme las herramientas para ejercer mi profesión de manera ética y responsable.

Dedico esta tesis a mis padres, son mi motivación.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	2
Resumen	3
Abstract.....	4
1 Introducción	5
2 Antecedentes	9
3 Marco Teórico.....	11
3.1 Escasez de agua	11
3.2 Red de distribución de agua.....	11
3.3 Tratamiento de aguas residuales.....	13
3.3.1 Tratamiento Preliminar.	13
3.3.2 Tratamiento Primario.....	13
3.3.3 Tratamiento Secundario.....	13
3.3.4 Tratamiento Terciario	13
3.4 Optimización.....	14
3.5 Optimización Multi-objetivo.....	15
4 Justificación	16
5 Hipótesis.....	17
6 Objetivos	18
6.1 Objetivo general	18
6.2 Objetivos Específicos	18
7 Metodología	19
8 Modelo Matemático	20
8.1 Acoplamiento simultáneo del reúso de agua y captación de agua pluvial.	20
8.1.1 Reúso de agua.	21
8.1.2 Función Objetivo.....	32
8.2 Estrategia multi-stake holder	34
9 Caso de Estudio.....	36
10 Resultados.....	41
10.1 Análisis de Resultados para la Prueba 2.....	43
10.2 Análisis Resultados para la Prueba 4.....	53
10.3 Análisis de resultados para la Prueba 12.....	61
12 Conclusiones y Recomendaciones.....	67
13 Referencias	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de escasez de agua a nivel mundial	5
Figura 2. Componentes del ciclo hidrológico en México. (Fuente: EAM 2018)	6
Figura 3. Precipitación pluvial en México (Fuente: EAM 2018)	7
Figura 4. Crecimiento poblacional en México. (Fuente: EAM 2018)	8
Figura 5. Ejemplo de red de distribución de agua	12
Figura 6. Representación gráfica de la optimización numérica.....	14
Figura 7. Superestructura del problema a abordar.....	20
Figura 8. División de Michoacán por mantos acuíferos.....	36
Figura 10. División de la ciudad de Morelia por Sectores (Fuente: OOAPAS, 2015)	38
Figura 11. División del Sector 8 para los Usuarios Domésticos e Industriales (Fuente: Juan José Olivares Areyan).....	39
Figura 12. Solución Pareto para el TAR, DI y H	42
Figura 12. Agua en los pozos de extracción para la prueba no. 2.....	43
Figura 13. Agua en los pozos de extracción para la Prueba 2.	44
Figura 14. Agua en los pozos de extracción para la Prueba 2.	44
Figura 15. Flujo de agua de los pozos hacia el usuario industrial.	45
Figura 16. Flujo de agua de los pozos hacia el usuario doméstico.	46
Figura 17. Localización del Pozo 16.	46
Figura 18. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 1-5 (Prueba 2).....	47
Figura 19. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 6-10 (Prueba 2).	48
Figura 20. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 11-15 (Prueba 2)	48
Figura 21. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 11-15 (Prueba 2)	49
Figura 22. Volumen total en los tanques de almacenamiento para la Prueba 2.....	49
Figura 23. Flujo de tanque de almacenamiento a usuario industria (HARINERA).	50
Figura 23. Flujo de tanque de almacenamiento hacia usuario industrial (AAK) Prueba 2.	51
Figura 25. Agua en los pozos de agua para la Prueba 4.....	53
Figura 26. Agua en los pozos de agua para la Prueba 4.....	54
Figura 27. Agua en los pozos de agua para la Prueba 4.....	54
Figura 28. Flujo de agua desde los pozos al usuario doméstico.....	55
Figura 29. Flujo de agua desde los pozos al usuario industrial	56
Figura 30. Volumen en tanques de almacenamiento 1 a 10 - Prueba 4.....	56
Figura 31. Volumen en tanques de almacenamiento 11 a 20 - Prueba 4.....	57
Figura 32. Volumen Total en tanques de almacenamiento –Prueba 4	57
Figura 33. Flujo de agua hacia el usuario industrial AAK – Prueba 4.	58
Figura 34. Flujo de agua hacia el usuario industrial Quimic - Prueba 4.....	59
Figura 35. Flujo de agua hacia el usuario industrial Harmich - Prueba 4.....	60
Figura 37. Volumen en pozos para la prueba 12	62
Figura 38. Volumen en pozos para la prueba 12	62
Figura 40. Flujo de pozos a usuario industrial (AAK) Prueba 12.	64
Figura 41. Flujo de pozos a usuario industrial (HARMICH) Prueba 12.	64
Figura 42. Flujo de pozos a usuario industrial (QUIMIC) Prueba 12.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores aleatorios asignados a las variables TAR, DI, H.	35
Tabla 2. Valores asignados a las variables TAR, DI, H.	35
Tabla 3. Acuíferos en Michoacán de Ocampo	36
Tabla 4. Habitantes en las subdivisiones del Sector 8	39
Tabla 5. Características de los Pozos en el Sector 8 (Fuente: OOAPAS, 2015)	39
Tabla 6. Precipitación disponible para la ciudad de Morelia (2015).	40
Tabla 7. Tabla de resultados	41
Tabla 9. Resultados	66

RESUMEN

La escasez de agua es un problema actual que se está presentando a nivel mundial; el agua dulce representa solo el 2,5% del agua de la Tierra y está cada vez más amenazada por la actividad humana y el cambio climático. Aun así, la demanda de agua sigue aumentando a consecuencia del crecimiento poblacional. El presente trabajo establece un modelo de optimización multi-objetivo de redes de agua considerando el tratamiento de aguas residuales y la recolección de agua pluvial que permita minimizar el consumo de agua fresca, la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos y los costos de operación del sistema. Como caso de estudio se analizó el sector ocho de la ciudad de Morelia en el estado de Michoacán, México. Se demuestra que es posible minimizar la demanda insatisfecha, sin comprometer los ingresos de la red de agua macroscópica ni aumentar el nivel dinámico de los pozos.

Palabras clave

Optimización Multi-objetivo; Estrategía multi-stakeholder; Red de distribución de agua; Demanda insatisfecha de agua; Reúso y reciclaje de agua

ABSTRACT

Water scarcity is a current problem that is occurring worldwide; Freshwater represents only 2.5% of the Earth's water and is increasingly threatened by human activity and climate change. Even so, the demand for water continues as a result of population growth. The present work establishes a multi-objective optimization model of water networks, considering wastewater treatment and rainwater harvesting that allows limiting the consumption of fresh water, the unsatisfied demand of domestic users and the operating costs of the system. As a case study, sector eight of the city of Morelia in the state of Michoacán, Mexico was analyzed. It is demonstrated that it is possible to satisfy the unsatisfied demand, without compromising the income of the macroscopic water network or increasing the well's dynamic level.

Keywords

Multi-objective optimization; Multi-stakeholder approach; Water distribution network; unsatisfied water demand; Water recycling and reusing.

1 INTRODUCCIÓN

La escasez de agua ya afecta a todos los continentes. El uso del agua ha aumentado mundialmente a más del doble de la tasa de aumento de la población en el último siglo, y un número creciente de regiones está llegando al límite en el que los servicios de agua pueden ser entregados de manera sostenible, especialmente en regiones áridas, como se muestra en la Figura 1.

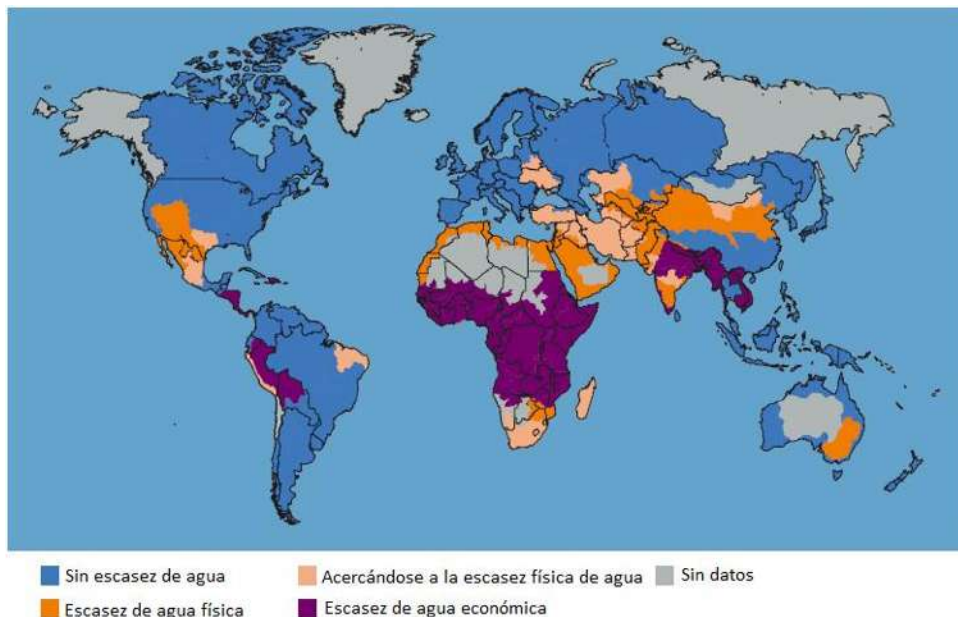


Figura 1. Mapa de escasez de agua a nivel mundial

La agricultura es tanto la causa como la víctima de la escasez de agua, ya que consume más agua que cualquier otra fuente y desperdicia gran parte de ella por ineficiencias; sin embargo, se prevé que la demanda industrial y doméstica aumentará más rápido que la demanda agrícola¹.

Muchos de los sistemas de agua que mantienen a los ecosistemas prosperando y que alimentan a una creciente población humana se han visto deteriorados. El agua dulce representa solo el 2,5% del agua² de la Tierra y está cada vez más amenazada por la actividad humana y el cambio climático, pues está alterando los patrones de clima y agua en todo el mundo, causando escasez y sequías en algunas áreas e inundaciones en otras.

Por estas razones, superar la crisis del agua es uno de los grandes desafíos para el desarrollo humano del siglo XXI, y para ello, los países y regiones individuales deben abordar urgentemente los problemas críticos que presenta el estrés hídrico. El agua debe ser tratada como un recurso escaso, haciendo uso de los recursos hídricos de acuerdo a las necesidades y demandas de diferentes usuarios, incluido el medio ambiente.

Para el año 2025, se espera que 1.800 millones de personas vivan en países o regiones con una escasez absoluta de agua, y dos tercios de la población mundial podría estar bajo condiciones de estrés hídrico (UNESCO, 2012).

La extensión territorial en México es de 1,964 millones de km². La parte sur del país corresponde a la zona intertropical, mientras que la parte norte se encuentra en la zona templada del globo terráqueo. La ubicación geográfica del país se relaciona directamente con la disponibilidad de recursos hídricos³. México recibe 1, 449, 471 millones de metros cúbicos de agua anualmente, de la cual el 72.1% se evapora, el 21.4% se va hacia los ríos o arroyos y el 6.4% que resta se filtra al subsuelo y recarga los acuíferos.

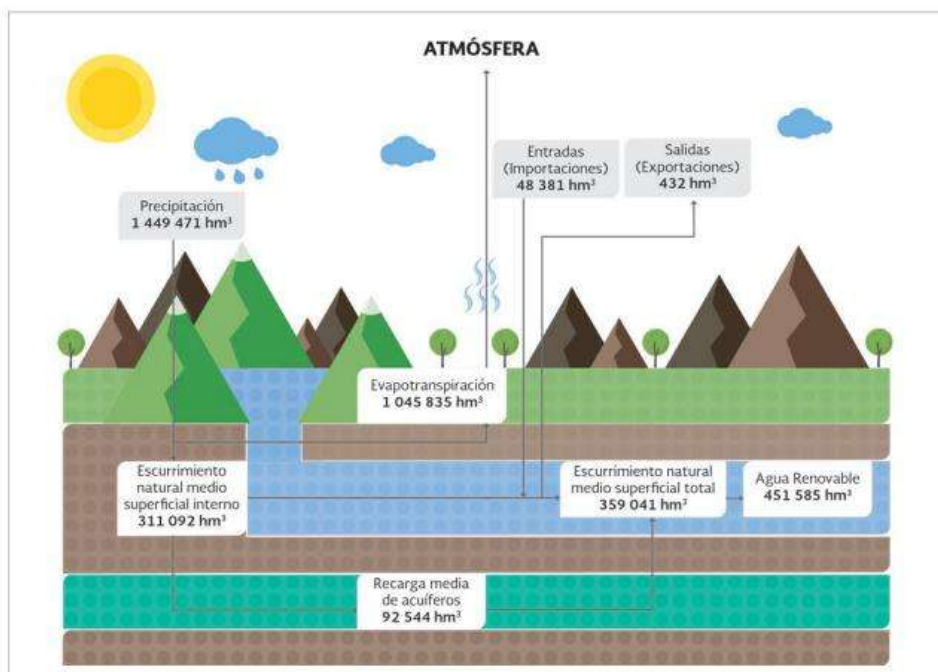


Figura 2. Componentes del ciclo hidrológico en México. (Fuente: EAM 2018)

La región sureste, que constituye un tercio del territorio del país, recibe una precipitación anual de más de 2000 mm, mientras que las otras dos partes del país, consideradas como regiones áridas, o semiáridas, tienen precipitaciones anuales menores a 500 mm. El 67% de dicha agua cae entre los meses de junio y septiembre.

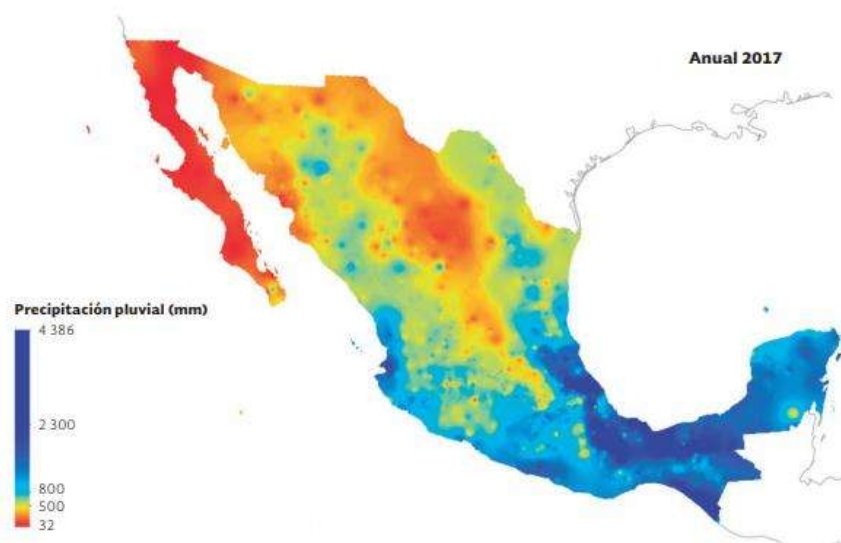


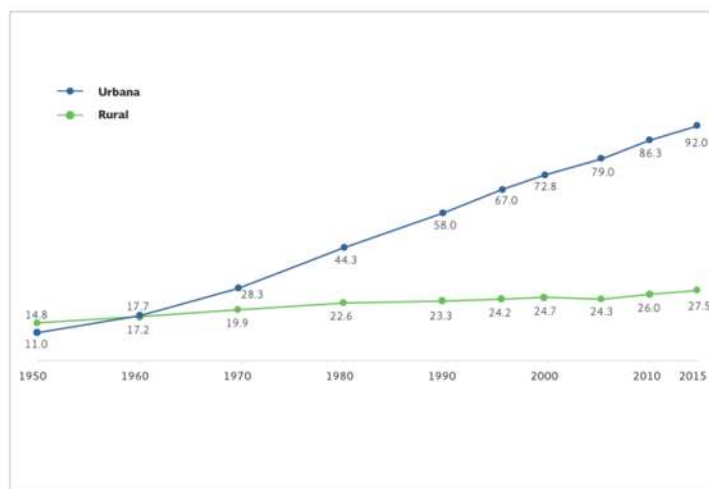
Figura 3. Precipitación pluvial en México (Fuente: EAM 2018)

Gracias al crecimiento exponencial de la población en México, y la contaminación que se observa en ríos, mantos acuíferos y cuencas, la disponibilidad de agua renovable per cápita sufrirá una disminución a nivel nacional. Además, la sobreexplotación de los acuíferos ha ocasionado el deterioro de la calidad del agua, y tiene como consecuencia el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salina.

Aunque en los últimos años se ha hecho un llamado para aprovechar de manera óptima los recursos hídricos, en México tan sólo el 47.5% de las aguas residuales colectadas recibe tratamiento, y un porcentaje más bajo cumple con las normas de calidad de las descargas, ya que no se regulan las descargas de aguas residuales y hay impunidad por parte de las autoridades a aquellos que no cumplen con las obligaciones de tratamiento y descarga de las mismas.

La agricultura es el sector que ocupa el mayor consumo de agua en México; según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), utiliza el 76.3% del agua dulce disponible para uso humano en México⁴, y consecuentemente, es también responsable del 62% de las aguas residuales y de la sobreexplotación de acuíferos en el país: 106 de los 653 acuíferos en México son sobreexplotados y la mayoría se encuentra entre zonas agrícolas y urbanas.

Por otra parte, en México existe un problema de desigualdad que repercute a niveles socioeconómicos, así como en la satisfacción de necesidades básicas como el acceso a agua potable. En las zonas urbanas del país, se observa un abastecimiento del agua potable de acuerdo al usuario en términos monetarios, y una distribución de recursos hídricos insatisfactoria que se puede atribuir a una planificación inadecuada del crecimiento de las ciudades. Para poder dar frente a la formulación de soluciones y sistemas para combatir la inseguridad del agua, es necesario un marco que defienda las soluciones de múltiples partes interesadas para los desafíos complejos del agua.



Fuente: Elaborado con base en INEGI (2010), INEGI (2015).

Figura 4. Crecimiento poblacional en México. (Fuente: EAM 2018)

2 ANTECEDENTES

En la actualidad, el manejo de la distribución de los recursos hídricos es complicado. Se tienen que considerar los aspectos socioeconómicos tanto como el impacto ambiental para la toma de decisiones, sin embargo, este último a menudo es olvidado, ya que la sociedad tiende a omitir la urgencia de cuidar los recursos hídricos a cambio de la comodidad.

En el contexto de sistemas macroscópicos de agua, Marques J et. al⁵ propusieron un modelo de optimización de objetivos múltiples para el diseño flexible de redes de distribución de agua que consideraban las siguientes variables: la capacidad hidráulica de las redes de distribución de agua, la minimización del déficit de presión, la minimización de costos y las emisiones de carbono. Los resultados obtenidos permitieron encontrar las soluciones compromiso entre los cuatro objetivos y confirman la importancia de considerar la minimización de esos cuatro objetivos y las ventajas de utilizar un enfoque flexible para diseñar las redes de agua e informar mejor a los tomadores de decisiones. Nápoles-Rivera et. al⁶., propusieron un modelo en el cual se considera la captación de agua pluvial para ser integrada a la red de distribución de agua teniendo en cuenta la sustentabilidad desde el punto de vista económico y ambiental, concluyendo que el uso de agua pluvial puede disminuir el estrés sobre las fuentes naturales de agua y satisfacer las demandas de agua de la ciudad. Pérez-Uresti et al⁷ analizaron la recolección de agua de lluvia como una opción para el suministro de agua en lugares con recursos hídricos sobreexplotados, modelando bajo un esquema de optimización de múltiples períodos y objetivos. Evaluaron el potencial de la recolección de agua de lluvia como fuente alternativa de agua y diseñaron una red óptima de distribución de agua en la que las fuentes naturales y alternativas funcionen como un sistema integrado.

Bocanegra-Martinez et al⁸ propusieron un enfoque basado en la optimización para diseñar sistemas de recolección de agua de lluvia para uso doméstico para satisfacer las demandas domésticas del agua, considerando como función objetivo la minimización del costo total anual asociado al agua dulce, los costos de capital para las áreas de captación,

almacenes y bombas, y el costo asociado al bombeo, mantenimiento y tratamiento. Demostraron que es posible satisfacer un porcentaje significativo de las demandas de agua doméstica utilizando un sistema de recolección de agua de lluvia, disminuyendo el costo asociado. García-Montoya et al.⁹ estableció un modelo multi-objetivo de programación mixta entera no lineal aplicado a un complejo residencial, considerando la recirculación de aguas residuales y la captación de agua pluvial para minimizar del costo anual total y el consumo de agua fresca. Con respecto al uso de agua en ciudades industriales, Alnouri et al.¹⁰, desarrollaron una propuesta para redes macroscópicas de integración de agua dentro de ciudades industriales, que redujeran el consumo de agua dulce y descargaran aguas residuales en su debido espacio, de manera rentable.

El problema de distribución de agua es entonces un problema multi-objetivo, sin embargo, las soluciones que se obtienen a menudo no toman en cuenta el peso que cada uno de los participantes en realidad ejercen sobre la toma de decisiones, y por ello, se necesita un enfoque en el cual se permita satisfacer a cada uno de ellos, evaluando diferentes escenarios para así priorizar estrategias alternativas para el desarrollo sostenible. Este enfoque ha sido objeto de estudio para diversos sectores: Sánchez-Bautista et al.¹¹, propuso un modelo de optimización matemática para la planeación óptima de sistemas energéticos utilizando emisiones de bio-refinerías y refinerías, con un enfoque que toma en cuenta el beneficio de las bio-refinerías, las refinerías y las plantaciones forestales, así como las emisiones y los empleos generados en cada una de las entidades involucradas. Fuentes-Cortés et al.¹² reajustaron los patrones de demanda para una planta de calor y energía combinada para minimizar agua utilizada en el proceso, las emisiones y los costos, encontrando una solución compromiso, la cual satisface las demandas de todos los participantes. Hernández-Romero et al.¹³ estableció una estrategia para la optimización multi-objetivo de sistemas de aire acondicionado en complejos turísticos basada en soluciones de compromiso para reducir la insatisfacción entre múltiples participantes.

En el presente trabajo se propone la solución del problema de recuperación, distribución y uso de agua multiobjetivo tomando en cuenta aspectos económicos, sociales y ambientales.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 ESCASEZ DE AGUA

Hay una escasez de agua cuando la disponibilidad¹⁴ de agua en un país o en una región es inferior a 1000 m³/persona/año. La escasez de agua causa enormes problemas para la población y las sociedades; el agua disponible no es suficiente para la producción de alimentos y para aliviar el hambre y la pobreza en estas regiones, donde con frecuencia el crecimiento de la población es mayor que la capacidad de un uso sostenible de los recursos naturales. La falta de agua no permite el desarrollo industrial, urbanístico y turístico sin restricciones en los usos del agua y políticas de asignación para otros sectores usuarios, en particular la agricultura. En las regiones escasas de agua, las masas de agua dulce naturales tienen capacidad limitada para responder a las crecientes demandas y recibir las cargas contaminantes de los efluentes de la expansión de usos urbanos, industriales y agrícolas¹⁵.

3.2 RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Una red de distribución de agua¹⁶ consiste en una infraestructura que recolecta, trata, almacena y distribuye agua entre las fuentes de agua y los consumidores. El propósito del sistema de distribución es entregar agua al consumidor con la calidad, cantidad y presión adecuadas. El sistema de distribución se usa para describir colectivamente las instalaciones utilizadas para suministrar agua desde su fuente hasta el punto de uso.

Los principales elementos de una red de distribución de agua son:

- Tuberías → Son el principal elemento de transporte de fluidos. Las tuberías están constituidas por su diámetro, el material de construcción y el tipo de junta.
- Válvulas → Disminuyen o evitan el flujo en la tubería.
- Depósitos/Tanques de almacenamiento → Tiene la función de almacenar el líquido y de regular la presión y flujo. La capacidad volumétrica de los depósitos está en función del tiempo de abastecimiento cubierto, el tiempo medio de estancia en la

red de agua y el aspecto económico. Se le llama tanque de regulación cuando guarda cierto volumen adicional de agua para aquellas horas del día en las cuales la demanda en la red sobrepasa el volumen suministrado por la fuente.

- Tomas domiciliarias → Es el conjunto de piezas y tubos que permite el abastecimiento desde una tubería de la red de distribución hasta el consumidor.
- Rebombes → Tienen como objetivo elevar la carga hidráulica en su ubicación para mantener la circulación del agua en la tubería. Se ubican generalmente en puntos intermedios de una línea de conducción y dentro de la red de distribución.

La Figura 5 ejemplifica una red de distribución de agua, al centro se observa una planta de desalinización, que obtiene el agua de mar, es tratada y distribuida a los consumidores. El agua residual es posteriormente tratada en una planta de tratamiento de aguas residuales para su redistribución, normalmente esta agua tiene como finalidad ser agua de riego.

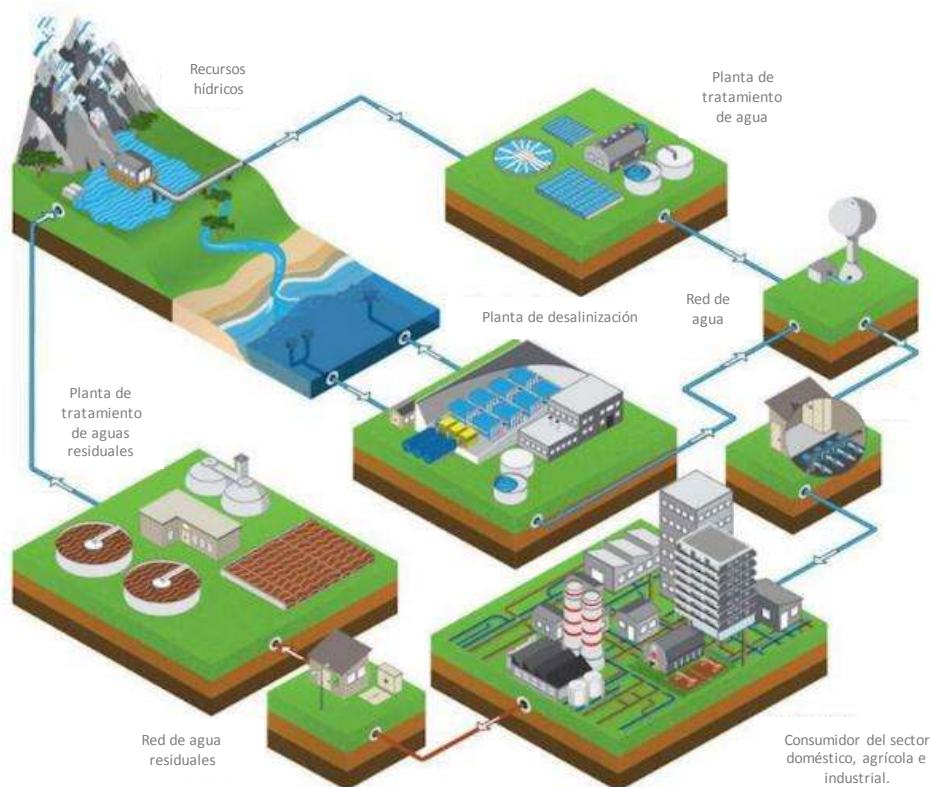


Figura. 5 Ejemplo de red de distribución de agua

3.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de aguas residuales es un proceso utilizado para remover contaminantes del agua que provienen de los efluentes de los distintos sectores económicos, por medio de técnicas químicas, físicas y biológicas. Generalmente, las plantas de tratamiento de aguas residuales constan de las siguientes etapas¹⁷:

3.3.1 Tratamiento Preliminar.

En esta primera etapa se retiran los residuos sólidos flotantes y es indispensable para que los equipos funcionen de manera adecuada, ya que a la de entrada del proceso llega todo tipo de material, desde ramas y hojas, papeles, aceites y grasas, los cuales pueden alterar el funcionamiento de las residuales y no obtener los resultados esperados.

3.3.2 Tratamiento Primario.

El tratamiento primario tiene como objetivo reducir el contenido de sólidos suspendidos en el agua residual. Este tratamiento puede ser físico o físico-químico y se lleva a cabo en tanques de sedimentación para remover parte de los contaminantes y retirarlos como lodo en el fondo de los tanques.

3.3.3 Tratamiento Secundario.

Se utilizan técnicas biológicas, ya que se emplean bacterias benéficas para consumir aquellos contaminantes que no se pudieron retirar en el tratamiento primario. Una parte importante es la aeración, ya que favorece al crecimiento bacteriano.

3.3.4 Tratamiento Terciario.

En esta etapa se han eliminado el 85% de los contaminantes en las aguas residuales, el otro 15% se constituye de nutrientes que favorecen el crecimiento de la flora acuática, como el fósforo y el amoníaco, los cuales se eliminan por medio de la filtración y desinfección.

3.4 OPTIMIZACIÓN

La optimización es una manera de tomar decisiones de manera sistemática¹⁸; en un día cualquiera, tomamos decisiones para realizar actividades de tal forma que, por ejemplo, ahorremos tiempo, dinero o energía. A medida que el sistema se torna más complicado, y se requiere tomar más y más decisiones para la resolución de un solo problema, con restricciones y factores que consecuentemente causan que no se pueda ver la mejor solución, o la solución óptima, la optimización matemática se vuelve una opción factible para conocer el óptimo resultado, siempre y cuando se pueda describir el sistema y las decisiones a tomar matemáticamente.

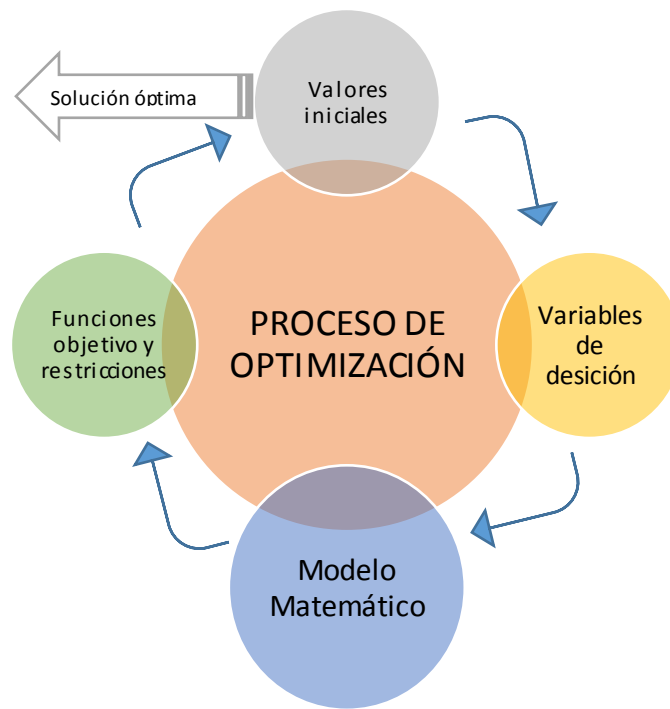


Figura 6. Representación gráfica de la optimización numérica.

En la Figura 6 se muestra la representación gráfica de la optimización numérica. Se modela el sistema con un set de valores y variables de decisión. El modelo simula el sistema y calcula la función objetivo y restricciones, hasta encontrar un nuevo valor inicial, el cual seguirá iterando y repitiendo el ciclo hasta finalmente encontrar la solución óptima.

3.5 OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO

La optimización multi-objetivo también se conoce como optimización vectorial, ya que trata el vector de objetivos. La programación multi-objetivo¹⁹ (MOP) puede considerarse como un conjunto de metodologías para generar una solución preferida o un rango de soluciones óptimas para un problema de decisión. La forma de ecuaciones determina el tipo particular de MOP, como MOLP para programación lineal, MONLP para programación no lineal, etc.

Típicamente, no existe una solución única que optimice simultáneamente cada objetivo. En cambio, existe un conjunto (posiblemente infinito) de soluciones óptimas de Pareto. Una solución se denomina no nominal u óptima de Pareto si ninguna de las funciones objetivas se puede mejorar en valor sin degradar uno o más de los otros valores objetivos. Si no existe información adicional, de preferencia objetiva, todas las soluciones óptimas de Pareto se consideran igualmente buenas.

4 JUSTIFICACIÓN

Desde la década de los 90s la ciudad de Morelia ha aumentado su población en un 45%, de 428,490 habitantes en 1990 a un estimado de 620,221 en el 2019, y al igual que la población, la ciudad ha crecido, pero de manera desordenada. Como consecuencia, existen zonas en la ciudad que carecen de un suministro constante de recursos hídricos, y zonas en las cuales se tiene acceso al agua continuamente debido a la retribución monetaria que se hace al organismo operador de agua potable, alcantarillado y saneamiento de Morelia (OOAPAS). Debido a la desorganización en el suministro de agua potable, existe un problema también de sobreexplotación de los mantos acuíferos que abastecen la ciudad, y es necesario abordar este problema de forma que tanto el organismo gubernamental, así como los ciudadanos, sean satisfechos por la solución y además minimizar el impacto ambiental.

5 HIPÓTESIS

Utilizar herramientas de optimización para resolver un problema de síntesis de redes de agua macroscópicas, en el cual se han identificado tres principales usuarios que se ven directamente afectados por los resultados. Esto permitirá definir estrategias para minimizar el consumo de agua fresca, la demanda insatisfecha de agua y los costos de mantenimiento, distribución y operación de las redes de agua. Además, las estrategias encontradas tendrán como característica que deben satisfacer las demandas de los recursos hídricos, cumpliendo con los costos definidos por la organización que suministra el agua potable a la ciudad y a su vez, minimizando el impacto ambiental.

6 OBJETIVOS

6.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este trabajo es establecer un modelo de optimización multi-objetivo de redes de agua considerando el tratamiento de aguas residuales y la recolección de agua pluvial que permita minimizar el consumo de agua fresca, la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos y los costos de operación del sistema. Además de obtener las soluciones óptimas, se hará uso de un enfoque en el cual las tres variables principales que participan en la toma de decisiones de este proceso se evaluarán para determinar los compromisos de todos los participantes, y este debe dar prioridad a un consenso y resultados favorables para las tres partes.

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer una superestructura que represente las interacciones posibles del sistema macroscópico.
- En base a la superestructura propuesta, desarrollar un modelo de optimización que incluya el reúso del agua pluvial, el tratamiento de las aguas residuales, y la extracción de agua desde los pozos hacia los usuarios domésticos e industriales.
- Codificar el modelo matemático propuesto empleando la plataforma de programación GAMS.
- Aplicar el modelo propuesto en el caso de estudio.
- Analizar los resultados obtenidos para determinar la efectividad económica-ambiental y social por el reúso y captación del agua.

7 METODOLOGÍA

El presente proyecto de investigación se llevará a cabo en una serie de etapas descritas a continuación:

- En la primera etapa se realizará una revisión bibliográfica de los conceptos de optimización multiobjetivo, redes de agua, tratamiento de aguas residuales, así como una revisión de las investigaciones enfocadas a integraciones energéticas con un multi-stakeholder approach.
- Se realizará la superestructura para el problema a abordar, la cual representa el reúso óptimo de agua para los usuarios domésticos e industriales, considerando la captación de agua pluvial, el uso de tanques de almacenamiento y la distribución de agua de lluvia.
- En base la superestructura se procederá a programar un modelo para la optimización de las redes de agua del caso de estudio, tomando en cuenta la interacción de todas las variables involucradas. Se obtendrán las soluciones óptimas y se analizarán los resultados obtenidos, para finalmente escribir el trabajo de tesis y ser presentado al comité asignado.

8 MODELO MATEMÁTICO

8.1 ACOPLAMIENTO SIMULTÁNEO DEL REÚSO DE AGUA Y CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL.

El modelo abordado se basa en la superestructura²⁰ mostrada en la Figura 7, el cual considera un sistema de reciclo de agua y recolección de agua pluvial, por lo tanto, se lleva a cabo el tratamiento de aguas residuales, así como el tratamiento de agua pluvial, para posteriormente ser almacenada y distribuida.

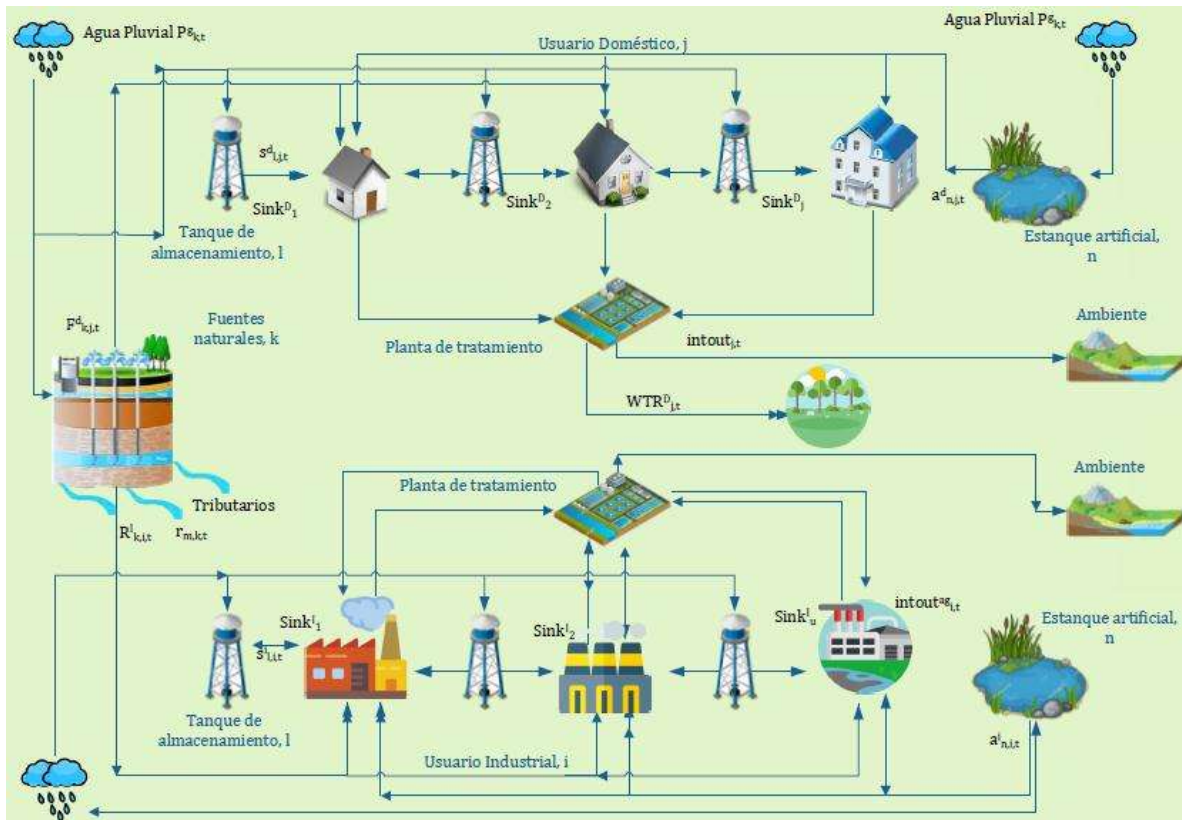


Figura. 7 Superestructura del problema a abordar.

8.1.1 Reúso de agua.

8.1.1.1 Ecuaciones del balance de agua en las fuentes naturales.

El balance de masa para las fuentes naturales es la acumulación en un tiempo t ($G_{k,t}$) que es igual a la acumulación en un periodo de tiempo $t-1$ ($G_{k,t-1}$), más las corrientes tributarias que lleguen a la fuente natural k ($trib_{m,k,t}$), más el agua recolectada desde la precipitación directa en las fuentes naturales k en un periodo de tiempo t ($P_{k,t}^g$), menos el agua que es enviada a los usuarios domésticos ($f_{k,j,t}^d$), menos el agua que es enviada a los usuarios industriales ($r_{k,i,t}^i$), menos la pérdida de agua por la precipitación directa hacia la corriente natural k en un tiempo t ($v_{k,t}^g$), cuando esta precipitación rebase el volumen de la fuente natural, menos la pérdida de agua por la precipitación directa hacia la corriente natural k en un tiempo t , cuando esta precipitación rebase el volumen de la fuente natural:

$$G_{k,t} = G_{k,t-1} + \sum_{m \in M} trib_{m,k,t} + P_{k,t}^g - f_{k,j,t}^d - r_{k,i,t}^i - v_{k,t}^g \quad \forall k \in K, \forall j \in J, \forall i \in I, \forall t \in T \quad (8.1)$$

Agua recolectada por precipitación directa. La precipitación directa y el agua escurrida ($P_{k,t}^g$) se puede calcular de la siguiente manera:

$$P_{k,t}^g = ROWV_{k,t} + DPWV_{k,t} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (8.2)$$

En donde el escurrimiento es igual a la precipitación anual (P_t) multiplicado por el área de captación (A_k^{ROW}) y por el coeficiente de escurrimiento ($Ce_{y(t)}$):

$$ROWV_{k,t} = P_t \cdot A_k^{ROW} \cdot Ce_{y(t)} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (8.3)$$

El coeficiente de escurrimiento ($Ce_{y(t)}$) se calcula por métodos indirectos, como función de la precipitación anual y el parámetro K , de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, el cual está en función del tipo y uso del suelo y del volumen de precipitación anual.

$$Ce_y = \frac{K(P - 250)}{2000} \quad K \leq 0.15 \quad \forall y \in Y$$

$$C e_y = \frac{K (P - 250)}{2000} + \frac{K - 0.15}{1.5} \quad K \geq 0.15 \quad \forall y \in Y$$

La precipitación directa depende de la precipitación mensual y el área de recolección de la fuente natural.

$$DPW V_{k,t} = P_t \cdot A_k^{DPW} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (8.4)$$

Pérdida de agua en la fuente natural.

Se considera como pérdida cuando el volumen rebase la fuente natural y se calcula como la pérdida de agua de la corriente natural k en un periodo de tiempo t ($v_{k,t}^g$), considerando un 20% de la precipitación total en la corriente k en un periodo de tiempo t :

$$v_{k,t}^g = 0.2 \left(\sum_{m \in M} trib_{m,k,t} + P_{k,t}^g \right) \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (8.5)$$

a) Ecuaciones del balance de masa para usuarios de tipo doméstico.

Balance de masa de entrada para usuarios de tipo doméstico.

El agua disponible para el usuario doméstico (j), en un periodo de tiempo t ($d_{j,t}^{ds}$) es igual a la sumatoria del flujo de agua que se extrae de las fuentes naturales ($f_{k,j,t}^d$), más la sumatoria del flujo de agua del tanque de almacenamiento ubicado en la locación l destinado para el usuario j en un periodo de tiempo t ($s_{l,j,t}^{sal,d}$), más la sumatoria del flujo de agua del estanque artificial ubicado en la locación n destinado para el usuario j en un periodo de tiempo t ($a_{n,j,t}^{sal,d}$), más la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos ($DINDS_{j,t}^d$), más el agua tratada que proviene de los usuarios domésticos, la cual tiene como uso único el riego de jardines ($WTR_{j,t}^d$):

$$d_{j,t}^{ds} = \sum_k f_{k,j,t}^d + \sum_{l \in L} s_{l,j,t}^{sal,d} + \sum_{n \in N} a_{n,j,t}^{sal,d} + DINDS_{j,t}^d + WTR_{j,t}^d \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8.6)$$

Ecuaciones relacionadas a la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos.

Para minimizar la demanda insatisfecha se necesita de una variable para restringirla. Para ellos, la ecuación 8.7 establece que la demanda de agua de los usuarios domésticos ($d_{j,t}^{ds}$), menos la demanda insatisfecha en un tiempo t ($DINDS_{j,t}^d$), más la demanda insatisfecha en un tiempo $t-1$ ($DINDS_{j,t-1}^d$), más la demanda insatisfecha en un tiempo $t-2$ ($DINDS_{j,t-2}^d$) debe de ser mayor o igual a cero:

$$d_{j,t}^{ds} - (DINDS_{j,t}^d + DINDS_{j,t-1}^d + DINDS_{j,t-2}^d) \geq 0$$

$$j \in J, \forall t \in T \quad (8.7)$$

Restricciones para la demanda insatisfecha.

Es necesario restringir la demanda insatisfecha para que los usuarios domésticos no se queden sin agua más de dos días consecutivos; para esto se agregará una variable binaria ($DINDSY_{j,t}$), la cual se multiplicará por un valor *big M*, el cual representa el valor más alto posible de la demanda hídrica para los usuarios domésticos, y este valor será igual o mayor a la demanda insatisfecha ($DINDS_{j,t}^d$):

$$DINDS_{j,t}^d \leq MGRANDE * DINDSY_{j,t} \quad j \in J, \forall t \in T \quad (8.8)$$

Se utilizara nuevamente un valor de *big M*, para que el valor de la variable binaria ($DINDS_{j,t}^d$) sea lo más pequeño posible:

$$DINDS_{j,t}^d \geq -MGRANDE * DINDSY_{j,t} \quad j \in J, \forall t \in T \quad (8.9)$$

Sí la variable binaria ($DINDSY_{j,t}$) vale 1, la demanda insatisfecha tiene que ser menor que un valor muy grande para la ecuación (8.8), mientras que para la ecuación (8.9) tiene que ser mayor que un valor muy chico.

Por lo tanto, si la variable binaria ($DINDSY_{j,t}$) es igual a cero, la demanda insatisfecha sería $0 \leq DINDS_{j,t}^d \leq 0$. En conclusión, la ($DINDSY_{j,t}$) para este caso sería igual a cero.

Si se multiplicará la demanda insatisfecha por una variable binaria se produciría una no linealidad, complicando el problema a resolver. En cambio, al multiplicar la variable

binaria por el valor de big M, que es una cantidad conocida en este caso, se mantiene la linealidad del problema.

Para evitar que exista demanda insatisfecha por más de dos días consecutivos, se establece que la variable binaria en cualquier tiempo t ($DINDSY_{j,t}$), más la variable binaria de un tiempo $t-1$ ($DINDSY_{j,t-1}$), más la variable binaria de un tiempo $t-2$ ($DINDSY_{j,t-2}$) tiene que ser menor o igual a uno.

$$DINDSY_{j,t} + DINDSY_{j,t-1} + DINDSY_{j,t-2} \leq 1 \quad j \in J, \forall t \in T \quad (8.10)$$

Por lo tanto, si la variable binaria ($DINDSY_{j,t}$) en un tiempo t es igual a uno, las variables binarias en el tiempo $t-1$ y $t-2$ serán cero.

Por otro lado, si la variable binaria $DINDSY_{j,t}$ en un tiempo t es igual a cero, en el tiempo $t-1$ y $t-2$ serian menor o igual a uno. En ambos casos, tomará el valor de cero y se cumpliría la restricción.

Balance de salida de los usuarios de tipo doméstico

El balance de masa de salida del usuario j en un tiempo t ($d_{j,t}$) es igual a la cantidad de agua utilizada o pérdida por los usuarios domésticos ($cw_{j,t}^d$) más el flujo de agua de las aguas residuales ($int_{j,t}^{in}$).

$$d_{j,t} = cw_{j,t}^d + int_{j,t}^{in} \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (8.11)$$

El término de agua ($cw_{j,t}^d$) del balance anterior hace referencia al agua que se utiliza en actividades como regar el césped o lavar el coche, en la cuales se puede utilizar el agua antes de que se tire al drenaje.

Para propósitos de modelación se consume un 50% del agua recibida en cada usuario doméstico. El término de agua residual ($int_{j,t}^{in}$) es el agua que llega a la alcantarilla y deberá ser enviada a una planta de tratamiento, para posteriormente se utilice como agua de riego de áreas verdes.

Balance en planta de tratamiento.

En la planta de tratamiento se recibe el agua residual de los usuarios domésticos ($int_{j,t}^{in}$), que se puede reutilizar como agua de riego y reutilizarse con fines de riego (en su totalidad) o para su eliminación final ($wtr_{j,t}$). El segundo término (cw_t^{tp}) del balance representa el flujo de agua que no será reutilizada.

$$\sum_j int_{j,t}^{in} = wtr_{(j=8,t)} + cw_t^{tp} \quad \forall t \in T \quad (8.12)$$

El último destino del agua tratada será para áreas verdes; ($wtr_{j,t}$) es el flujo de agua enviado desde la planta de tratamiento al riego de áreas verdes de los usuarios domésticos.

$$wtr_{j,t} = \sum_{j=8} wtr_{j,t} \quad \forall t \in T \quad (8.13)$$

b) Ecuaciones del balance de masa para usuarios de tipo industrial

Balance de masa de entrada para usuarios de tipo industrial.

El flujo en la entrada para usuarios de tipo industrial (i) en un periodo de tiempo t ($d_{i,t}^{di}$) es igual a la sumatoria del flujo de agua que viene de las fuentes naturales ($r_{k,i,t}^i$), más la sumatoria del flujo de agua del tanque de almacenamiento en l para el usuario industrial (i) en un periodo de tiempo t ($s_{l,i,t}^{sal,i}$), más la sumatoria del flujo de agua del estanque artificial ubicado en n para el (i) en un periodo de tiempo t ($a_{n,i,t}^{sal,i}$) más el agua previamente tratada de los usuarios industriales ($int_{i,t}^{sal}$):

$$d_{i,t}^{di} = \sum_{k \in K} r_{k,i,t}^i + \sum_{l \in L} s_{l,i,t}^{sal,i} + \sum_{n \in N} a_{n,i,t}^{sal,i} + \sum_i int_{i,t}^{sal} \quad \forall t \in T, \forall j \in J \quad (8.14)$$

Balance de masa de salida para usuarios de tipo industrial.

El balance de masa del usuario industrial i en un periodo de tiempo t ($d_{i,t}^{di}$) es igual a la cantidad de agua utilizada o consumida en el proceso ($cw_{i,t}^{di}$) más el flujo de agua correspondiente a las aguas residuales ($int_{i,t}^{int}$):

$$d_{i,t}^{di} = cw_{i,t}^{di} + int_{i,t}^{int} \quad \forall i \in I, \forall t \in T \quad (8.15)$$

El término de agua ($cw_{i,t}^{di}$) de la ecuación 8.13 es el agua que se consume en la industria. Para propósitos de modelación se establecerá un consumo del 90% de agua. El término de agua residual ($int_{i,t}^{int}$) es el agua que llega a la alcantarilla y que posteriormente se enviará a una planta de tratamiento para después recircularla nuevamente al proceso.

Balance en planta de tratamiento.

Como se mencionó anteriormente, el agua que se utiliza en el proceso se envía a la planta de tratamiento para después ser reutilizada por los mismos usuarios industriales:

$$\sum_i int_{i,t}^{int} = int_t^{out} \quad \forall t \in T \quad (8.16)$$

El agua tratada de los usuarios industriales se recircula para el mismo uso industrial, por lo tanto:

$$int_t^{sal} = \sum_i int_{i,t}^{sal} \quad \forall t \in T \quad (8.17)$$

Ecuaciones para controlar el nivel dinámico de los pozos de extracción.

En un pozo de extracción hay dos niveles de interés: el nivel estático y el nivel dinámico. El nivel estático es el nivel de agua en el pozo antes de su extracción. El nivel dinámico es la diferencia en la altura del pozo después de la extracción.

La altura del pozo k en el tiempo t ($H_{k,t}$) es igual a la sumatoria del agua para los usuarios domésticos ($f_{k,j,t}^d$) más la sumatoria del agua para los usuarios industriales ($r_{k,i,t}^i$) menos la sumatoria de las corrientes tributarias ($trib_{m,k,t}$) menos la precipitación de las fuentes naturales k en un tiempo t ($P_{k,t}^g$), más las pérdidas de agua de las fuentes naturales k en un tiempo t ($v_{k,t}^g$) y todo lo anterior dividido entre el área del pozo de extracción de las fuentes naturales k (A_k):

$$H_{k,t} = [\sum_{j \in J} f_{k,j,t}^d + \sum_{i \in I} r_{k,i,t}^i - \sum_{m \in M} trib_{m,k,t} - P_{k,t}^g + v_{k,t}^g] / A_k$$

$$k \in K, \forall t \in T \quad (8.18)$$

La restricción para controlar el nivel dinámico del pozo se considera para valorar el aspecto ambiental; se controla la cantidad de agua que se desea extraer de cada pozo,

tratando de mantener un nivel dinámico bajo, ya que si este aumenta se tendrían consecuencias negativas.

$$H_{k,t} \leq 0 \quad k \in K, \forall t \in T \quad (8.19)$$

8.1.1.2 Ecuaciones del balance de agua de lluvia recolectada.

Cálculo para la precipitación del agua pluvial.

Es necesario calcular la cantidad de agua pluvial disponible. Para esto se toma en cuenta la cantidad de agua recolectada (P) está en función de la precipitación total (P_t), el área que ocupara el agua de lluvia recolectada (A) y el coeficiente de escurrimiento (Ce), por lo tanto:

$$P = f(\text{Precipitación total}, \text{Área}, Ce)$$

La recolección de agua pluvial está en función del coeficiente de escurrimiento. El coeficiente de escurrimiento depende del tipo de material con el que está construida el área de captación. En el caso de las áreas urbanizadas, las azoteas de las casas y edificios son utilizados como área de captación. Para zonas urbanas, se maneja un coeficiente de escurrimiento entre 0.70 y 0.95.

Se considera que la precipitación mensual en un periodo de tiempo t tiene una distribución normal aleatoria, por lo cual los parámetros estadísticos se pueden obtener de datos históricos. Por lo tanto, la ecuación anterior se expresará para cada taque de almacenamiento considerado, y estará dada en función de la precipitación mensual, el área de captación pluvial y el coeficiente de escurrimiento.

Cálculo de precipitación para el almacenamiento de agua total para tanque s .

El agua total disponible para almacenar en un tanque s , ubicado en una locación l en un periodo de tiempo t ($P_{l,t}^s$) es igual a la precipitación total (P_t) multiplicado por el área de recolección disponible (A_l^s) y esto a su vez multiplicado por el coeficiente de escurrimiento (Ce^s):

$$P_{l,t}^s = P_t \cdot A_l^s \cdot C e^s \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (8.20)$$

Cálculo de precipitación para el almacenamiento de agua total para estanque artificial a .

El agua total disponible para el estanque artificial a , ubicado en la locación n , en un periodo de tiempo t ($P_{n,t}^a$) es igual a la precipitación total (P_t) multiplicado por el área de recolección disponible (A_n^a) y por el coeficiente de escurrimiento ($C e^a$):

$$P_{n,t}^a = P_t \cdot A_n^a \cdot C e^a \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (8.21)$$

Para la captación de agua pluvial, se debe de tomar en cuenta la precipitación mensual, ya que habrá meses que llueva más que otros, afectando el volumen de los tanques utilizados para la captación, por lo que se debe de incluir la perdida de agua cuando la precipitación rebase el volumen de los tanques utilizados.

Al calcular el valor de la precipitación de agua pluvial para cada dispositivo de almacenamiento, se debe realizar un balance de masa ya que el agua captada disponible será enviada a cada dispositivo de almacenamiento:

Balance de agua del tanque de almacenamiento s :

La precipitación directa para el tanque de almacenamiento s ubicado en la locación l en un periodo de tiempo t ($P_{l,t}^s$) es igual a la entrada del tanque s ubicado en la locación l en un periodo de tiempo t ($s_{l,t}^{ent}$) más las pérdidas de agua del tanque s ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($v_{l,t}^s$):

$$P_{l,t}^s = s_{l,t}^{ent} + v_{l,t}^s \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (8.22)$$

Balance de agua del estanque artificial de almacenamiento a : La precipitación directa para el tanque de almacenamiento a ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($P_{n,t}^a$) es igual a la entrada del tanque a ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($a_{n,t}^{ent}$) más las pérdidas de agua del tanque s ubicado en la locación n en un periodo de tiempo t ($v_{n,t}^a$):

$$P_{n,t}^a = a_{n,t}^{ent} + v_{n,t}^a \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (8.23)$$

Ecuaciones del balance de masa en los tanques de almacenamiento y los estanques artificiales.

Se considera la acumulación de dichos tanques que será igual a la entrada menos la salida y esto aplicado a cada uno de los dispositivos de almacenamiento:

Balance de masa para tanque de almacenamiento S.

El balance de masa consta de la acumulación en el periodo de tiempo t ($S_{l,t}$) es igual a la acumulación en un periodo de tiempo anterior ($t - 1$) ($S_{l,t-1}$) más el flujo de entrada al tanque $s_{l,t}^{ent}$ menos la sumatoria de la salida de los usuarios domésticos $s_{l,j,t}^{sal,d}$, menos la sumatoria de la salida de los usuarios industriales $s_{l,i,t}^{sal,i}$:

$$S_{l,t} = S_{l,t-1} + s_{l,t}^{ent} - \sum_{j \in J} s_{l,j,t}^{sal,d} - \sum_{i \in I} s_{l,i,t}^{sal,i} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (8.24)$$

Balance de masa para estanque artificial A.

El balance de masa para el tanque artificial A para la acumulación en el periodo de tiempo t ($A_{n,t}$) es igual a la acumulación en un periodo de tiempo anterior ($t - 1$) ($A_{n,t-1}$) más el flujo de entrada al tanque ($a_{n,t}^{ent}$) menos la sumatoria de la salida de los usuarios doméstico ($a_{n,j,t}^{sal,d}$), menos la sumatoria de la salida de los usuarios industriales $a_{n,i,t}^{sal,i}$

$$A_{n,t} = A_{n,t-1} + a_{n,t}^{ent} - \sum_{j \in J} a_{n,j,t}^{sal,d} - \sum_{i \in I} a_{n,i,t}^{sal,i} \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (8.25)$$

Selección de dispositivos de almacenamiento.

Existen dos tipos de dispositivos de almacenamiento que se pueden instalar, y para cada una de estas unidades se tiene que restringir la cantidad de agua que puede almacenarse, así como para el agua que se puede alimentar en un periodo de tiempo t .

S_l^{max} y A_n^{max} son las capacidades máximas para tanques y estanques artificiales de almacenamiento y son utilizados para uso tanto doméstico como industrial.

$$S_l^{max} \geq S_{l,t} \quad l \in L, t \in T \quad (8.26)$$

$$A_n^{max} \geq A_{n,t} \quad n \in N, t \in T \quad (8.27)$$

$$S_l^{max} \geq S_{l,t}^{in} \quad l \in L, t \in T \quad (8.28)$$

$$A_n^{max} \geq a_{n,t}^{in} \quad n \in N, t \in T \quad (8.29)$$

Después, un conjunto de ecuaciones será requerido para determinar si se instalará un nuevo dispositivo de almacenamiento durante un periodo de tiempo t .

Tanques de almacenamiento para usuarios de tipo doméstico e industrial.

Para conocer si es necesaria la instalación de un nuevo tanque de almacenamiento se hará uso de la variable binaria $z_{l,t}^s$; si esta es igual a uno se instalará un nuevo tanque de almacenamiento en la ubicación l en un periodo de tiempo t .

$$\sum_t z_{l,t}^s \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (8.30)$$

La capacidad de los tanques de almacenamiento debe encontrarse dentro de los límites máximos $\delta_l^{s,max}$; las siguientes ecuaciones están en función de la capacidad de almacenamiento de un dispositivo dado, si al menos una de las variables binarias es igual a uno, entonces el dispositivo se puede usar desde el momento t en adelante.

$$S_{l,t'} \leq \delta_l^{s,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{l,t}^s \quad \forall l \in L, \forall t' \in T' \quad (8.31)$$

$$S_{l,t'}^{in} \leq \delta_l^{s,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{l,t}^s \quad \forall l \in L, \forall t' \in T' \quad (8.32)$$

Las ecuaciones para fines económicos se utilizan para agregar el costo de los dispositivos de almacenamiento, en caso de que sean utilizados y determinarán el valor presente neto a través del factor $K_{F,t}$, el cual se utiliza para anualizar la inversión

$$K_{F_l} = \sum_t K_{F_{l,t}} \cdot \sum_t VP_{l,t} \cdot z_{l,t}^s \quad \forall l \in L \quad (8.33)$$

$$Cost_l^s = K_{F_l} [A + B(S_l^{max})^\alpha] \quad \forall l \in L \quad (8.34)$$

A y B son constantes que se utilizan para tener en cuenta los costos fijos y variables del tanque, mientras que α es un exponente positivo que es menor que 1.0 para tener en cuenta las economías de escala.

Si todas las variables binarias son igual a cero, los tanques no son instalados, haciendo sus costos ($Cost_t^s$) y capacidad ($S'_{t,t}$) igual a cero.

La misma lógica que se aplica al tanque de almacenamiento se utilizará para las ecuaciones del estanque artificial ($z_{n,t}^a$), tanto para el usuario doméstico como el industrial.

Estanque artificial para usuarios de tipo doméstico e industrial.

$$\sum_t z_{n,t}^a \leq 1 \quad \forall n \in N \quad (8.35)$$

$$A_{n,t'} \leq \delta_n^{a,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{n,t}^a \quad \forall n \in N, \forall t' \in T' \quad (8.36)$$

$$a_{n,t'}^{in} \leq \delta_n^{a,max} \sum_{t=1}^{t=t'} z_{n,t}^a \quad \forall n \in N, \forall t' \in T' \quad (8.37)$$

$$K_{F_n} = \sum_t K_{F_{n,t}} \cdot \sum_t VP_{n,t} \cdot z_{n,t}^a \quad \forall n \in N \quad (8.38)$$

$$Cost_n^a = K_{F_n} [A + B(A_n^{max})^\alpha] \quad \forall n \in N \quad (8.39)$$

8.1.2 Función Objetivo

Ingreso total anual

La primera función objetivo consiste en maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica; esto es la diferencia de las ventas menos los costos de tratamiento, almacenamiento y de distribución:

$$TAR = \text{ventas} - \text{costos de tratamiento} - \text{costos de almacenamiento} - \text{costos de bombeo}. \quad (8.40)$$

Los términos de *ventas* se pueden expresar como la venta total de agua:

$$\begin{aligned} \text{ventas} = & \left(\sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d + \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,d} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,d} \right) DSC \\ & + \left(\sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i + \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,i} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,i} \right) ISC \\ & + \left(\sum_t WTR_{j=8,t} \right) DSCJ \\ & + \left(\sum_i \sum_t int_{i,t}^{sal} \right) ISCR \end{aligned} \quad (8.41)$$

Se toma en cuenta que el costo del agua no depende de la fuente sino del usuario final. Cada usuario tiene necesidades diferentes y utiliza el agua con diferente calidad, por lo que el costo de tratamiento dependerá del usuario final:

$$\begin{aligned} \text{costo de trat} = & \left(\sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d CTND + \sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i CTNI \right) \\ & + \left(\sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,d} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,d} \right) CTAD \\ & + \left(\sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,i} + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,i} \right) CTAI \\ & + \left(\sum_t WTR_{j=8,t} + \sum_i \sum_t int_{i,t}^{sal} \right) CTPE \end{aligned} \quad (8.42)$$

El costo de almacenamiento se necesita para instalar la infraestructura requerida del proceso, y se calcula de la siguiente manera:

$$\text{costo de almacenamiento} = \left(\sum_l \text{Costo}_l^s + \sum_n \text{Costo}_n^a \right) \quad (8.43)$$

Los costos de distribución, que incluyen los costos de tubería y bombeo, son requeridos para distribuir el agua en la ciudad desde las fuentes naturales, así como de almacenamiento hasta los usuarios finales.

$$\begin{aligned} \text{Costo } tb = & \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,d} PCSTD + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,d} PCASD + \sum_l \sum_j \sum_t s_{l,j,t}^{sal,i} PCSTI \\ & + \sum_n \sum_j \sum_t a_{n,j,t}^{sal,i} PCASI + \sum_k \sum_j \sum_t f_{k,j,t}^d PCND + \sum_k \sum_i \sum_t r_{k,i,t}^i PCNI \end{aligned} \quad (8.44)$$

Demanda insatisfecha de agua.

La segunda función objetivo es minimizar la demanda de agua insatisfecha y se define de la siguiente manera:

$$DI = \sum_j \sum_t DINDS_{j,t} \quad (8.45)$$

Función objetivo

La función objetivo consiste en maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica (TAR) y minimizar la demanda insatisfecha del agua (DI):

$$O.F. = \text{Max}\{TAR\}; \text{Min}\{DI\} \quad (8.46)$$

8.2 ESTRATEGIA MULTI-STAKE HOLDER

El modelo presenta una optimización multi-objetivo que busca maximizar los ingresos de la red de agua macroscópica (TAR) y minimizar la demanda insatisfecha de agua (DI). Sin embargo, existe un conflicto entre ambos objetivos a cumplir. Además, se agrega al panorama tratar de mantener el cambio en el nivel dinámico del pozo de extracción (H) en un nivel bajo, ya que este también es uno de los objetivos ambientales de este trabajo.

La manera en la que se aproximara la resolución de estos objetivos para la obtención de una solución compromiso es la siguiente: primero cada función objetivo se resolverá independientemente para calcular los límites inferiores y superiores para cada función (TAR^{LB} , DI^{LB} , H^{LB} , TAR^{UB} , DI^{UB} , H^{UB}), primero minimizando las funciones y después maximizando, para obtener de esta manera las coordenadas para el punto de utopía y el punto Nadir del problema a resolver. El punto de utopía es el mejor caso posible que se pudiera alcanzar: una ganancia muy grande para los ingresos de las redes de agua, con una demanda insatisfecha igual a cero y un nivel de pozo bajo; el punto nadir es lo contrario, el peor escenario posible: ganancias para la TAR bajas, mientras que la demanda insatisfecha y el nivel de pozo de extracción serían muy altas. Las coordenadas del punto de utopía y el punto Nadir permitirán encontrar la solución más cercana al punto de utopía, y esta solución es la solución compromiso.

Ya que las dimensiones para cada objetivo son diferentes ($TAR [=]$ \$, $DI [=]$ m³, $H [=]$ m), se deberán escalar para que tomen valores entre 0 y 1. Esto se realiza con la variable α :

$$\alpha_1 = \frac{TAR - TAR^{LB}}{TAR^{UB} - TAR^{LB}} \quad (8.47)$$

$$\alpha_2 = \frac{DI - DI^{LB}}{DI^{UB} - DI^{LB}} \quad (8.48)$$

$$\alpha_3 = \frac{H - H^{LB}}{H^{UB} - H^{LB}} \quad (8.49)$$

St. $0 \leq \alpha_i \leq 1$.

La solución compromiso está dada por la siguiente ecuación:

$$CS = [\alpha_1 \cdot \gamma_1 + \alpha_2 \cdot \gamma_2 + \alpha_3 \cdot \gamma_3] \quad (8.50)$$

En esta ecuación, γ_1 , γ_2 y γ_3 son valores que representan la importancia que se le va adjudicar a cada variable (TAR, DI, y H, respectivamente) para cada una de las pruebas a realizar. Estos valores se generaron aleatoriamente, y la suma de ellos es igual a uno. La tabla 1 muestra los valores asignados para las diez pruebas a realizar.

Tabla 1. Valores aleatorios asignados a las variables TAR, DI, H.

CASO	γ_1 [TAR (\$)]	γ_2 [DI (m ³)]	γ_3 [H (m)]
1	0.567867728	0.157554794	0.163767929
2	0.200754581	0.184880174	0.614365245
3	0.571447392	0.311533646	0.117018962
4	0.777422204	0.057257111	0.165320684
5	0.392458173	0.227663243	0.379878583
6	0.326152516	0.275212803	0.398634681
7	0.314885981	0.23745168	0.447662339
8	0.549309344	0.236520081	0.214170575
9	0.022576241	0.373918585	0.603505174
10	0.329164456	0.398108407	0.272727137

Se realizaron seis pruebas adicionales para ver el comportamiento de las variables cuando se le otorga todo el peso a cada una de ellas (con un valor de 1), al darle un cincuenta por ciento del peso a dos de las variables (0.5 y 0.5), y finalmente, darles un peso equitativo a las tres, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores asignados a las variables TAR, DI, H.

CASO	γ_1 [TAR (\$)]	γ_2 [DI (m ³)]	γ_3 [H (m)]
11	1	0	0
12	0	1	0
13	0	0	1
14	0.5	0.5	0
15	0	0.5	0.5
17	0.333333333	0.333333333	0.333333333

9 CASO DE ESTUDIO

El estado de Michoacán cuenta con veintitrés acuíferos, los cuales se listan en la Tabla 3; la Figura 8 muestra el estado dividido de acuerdo a los mismos.

Tabla 3. Acuíferos en Michoacán de Ocampo

CLAVE	NOMBRE
1601	Maravatío - Contepec - E.Huerta
1602	Morelia - Queréndaro
1604	Lagunillas Pátzcuaro
1605	Pastor Ortiz - La Piedad
1606	Zacapu
1607	Ciénega de Chapala
1608	Zamora
1609	Briseñas - Yurécuaro
1610	Ciudad Hidalgo - Tuxpan
1611	Tacámbaro - Turicato
1612	Huetamo
1613	Churumuco
1614	Uruapan
1615	La Huacana
1616	Nueva Italia
1617	Lázaro Cárdenas
1618	Playa Azul
1619	Otsula
1620	Apatzingan
1621	Coahuayana
1622	Cotija
1623	La Piedad

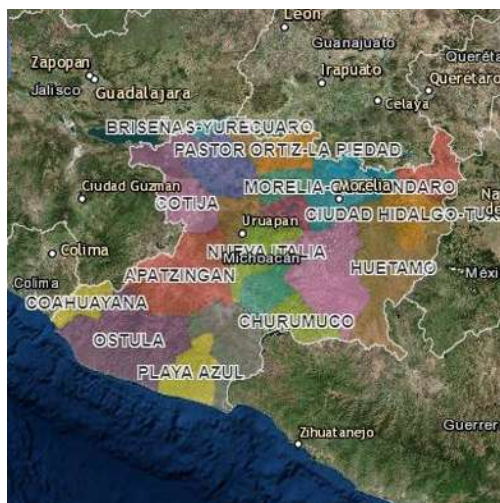


Figura 8. División de Michoacán por mantos acuíferos.

tratadas que tendrán como único uso el riego de áreas verdes. La Figura 11 muestra la división del Sector 8 y se observan también los pozos que abastecen al Sector 8 y su ubicación.

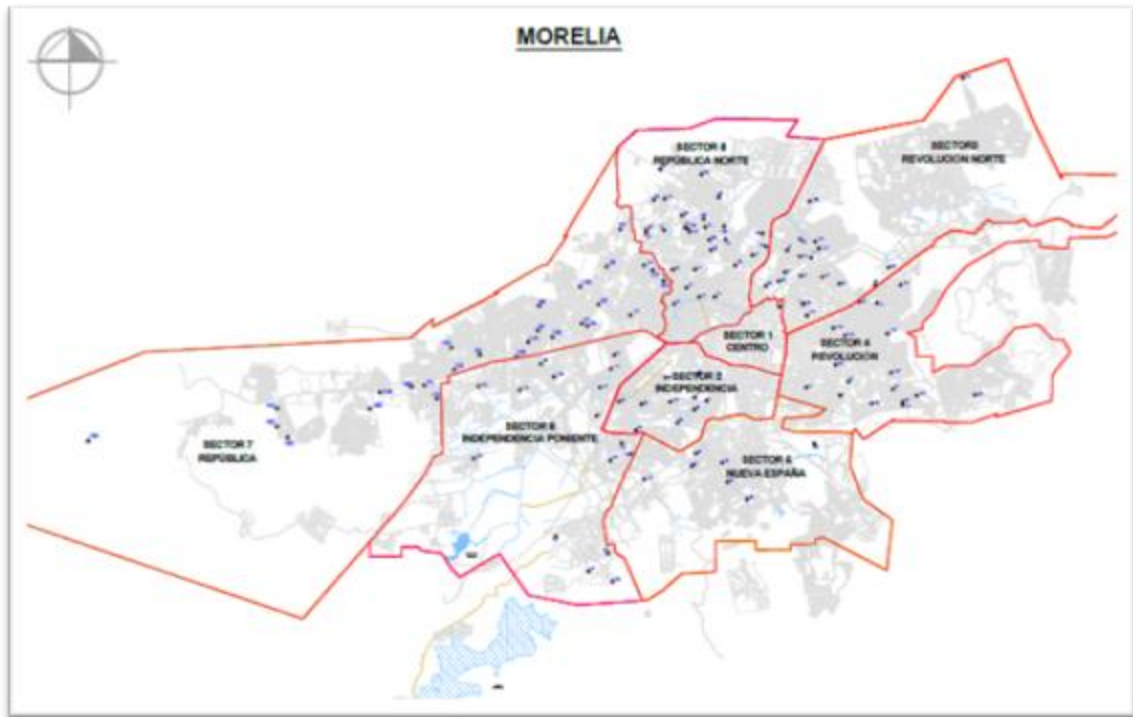


Figura 10. División de la ciudad de Morelia por Sectores (Fuente: OOPAS, 2015)

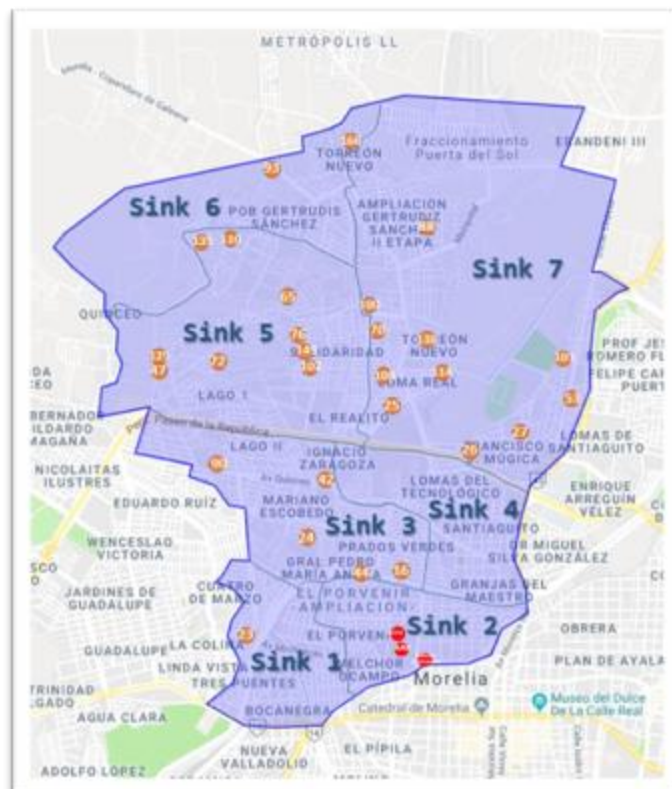


Figura 11. División del Sector 8 para los Usuarios Domésticos e Industriales (Fuente: Juan José Olivares Areyan)

En la Tabla 4 se muestra el número de habitantes en cada zona, y en la Tabla 5 se detallan las características de los pozos de extracción en el Sector 8.

Tabla 4. Habitantes en las subdivisiones del Sector 8

Zona	Habitantes
1	22,399
2	16,468
3	21,319
4	16,538
5	21,951
6	5,852
7	31,770

Tabla 5. Características de los Pozos en el Sector 8 (Fuente: OOAPAS, 2015)

Características de los Pozos en el Sector 8				
Id	Pozo profundo	Estado	Altitud (m)	Nivel Dinámico
16	Prados Verdes (Galeana)	Activo	1889	72
23	Delta de los Ríos	Activo	1890	160
24	Mariano Escobedo	Activo	1893	98
25	El Realito	Activo	1896	38
26	Lomas del Tecnológico	Activo	1917	150
27	La Soledad	Activo	1901	150
42	Ignacio Zaragoza	Activo	1891	170
44	Mariano Escobedo II	Activo	-	154
47	El Lago I	Baja	1911	55
53	La Soledad II	Activo	1910	185
65	Gertrudis Sánchez I	Activo	1900	100
70	Villas del Real III	Activo	1898	70
72	El Lago II	Activo	1902	225
76	Amp. Torreón Nuevo I	Baja	1952	123
88	La Palma	Activo	1896	115
90	Mariano Escobedo III	Activo	1902	217
93	Amp. Torreón Nuevo II	Activo	-	157
100	Reposición Gertrudis Sánchez	Activo	1891	169
102	Amp. Solidaridad	Activo	1900	137
103	Amp. La Soledad	Activo	-	164
108	El Realito II	Activo	1902	158
110	Villas del Real IV	Activo	1918	134
114	Loma Real	Baja	1893	131
125	El Lago II (Rep)	Activo	1911	145
135	Rinconada de Morelia	Activo	1929	100
138	Residencial Torreón Nuevo	Activo	1890	144
149	Torreón Nuevo II	Activo	1954	178
166	Manantiales	Baja	-	157

Se observa en la Tabla 6 que, desde noviembre a febrero, así como abril, son los meses con una menor precipitación pluvial, y esto se verá reflejado en el nivel de agua de los tanques de almacenamiento.

Tabla 6. Precipitación disponible para la ciudad de Morelia (2015).

Mes	Precipitación (mm agua)
Enero	0.1
Febrero	10.8
Marzo	114.2
Abril	6.4
Mayo	114.6
Junio	97
Julio	137.4
Agosto	65.4
Septiembre	51
Octubre	36.5
Noviembre	1.7
Diciembre	19

10 RESULTADOS

El modelo propuesto se codificó en la plataforma de lenguaje GAMS, utilizando el solver SCIP para la resolución del modelo. El modelo se resolvió utilizando el método de ponderación para obtener la siguiente gráfica, en la cual se presentan el punto de utopía y el punto Nadir. El grado de satisfacción/insatisfacción se midió de acuerdo a la cercanía de los resultados de las pruebas a los puntos de utopía y Nadir: entre más cercano al punto de Nadir, mayor insatisfacción; entre más cercano al punto de utopía, mayor satisfacción. La Tabla 7 muestra los resultados obtenidos de la resolución del modelo, mientras que la Figura 12 muestra gráficamente dichos resultados con respecto al punto Nadir y de utopía.

CASO	γ_1 [TAR (\$)]	γ_2 [DI (m ³)]	γ_3 [H (m)]	TAR (\$)	DI (m ³)	H (m)	Insatisfacción
1	0.567867728	0.157554794	0.163767929	0.013	0.32	0.001	0.334
2	0.200754581	0.184880174	0.614365245	0.101	0	0.002	0.103
3	0.571447392	0.311533646	0.117018962	0.09	0	0.012	0.102
4	0.777422204	0.057257111	0.165320684	0.013	0.32	0.001	0.334
5	0.392458173	0.227663243	0.379878583	0.09	0	0.012	0.102
6	0.326152516	0.275212803	0.398634681	0.101	0	0.002	0.103
7	0.314885981	0.23745168	0.447662339	0.101	0	0.002	0.103
8	0.549309344	0.236520081	0.214170575	0.09	0	0.012	0.102
9	0.022576241	0.373918585	0.603505174	0.123	0	5.80E-07	0.12300058
10	0.329164456	0.398108407	0.272727137	0.09	0	0.012	0.102
11	1	0	0	0	0.655	0.206	0.861
12	0	1	0	0.767	0	0.693	1.46
13	0	0	1	0.249	0.99	1.4076E-06	1.239001408
14	0.5	0.5	0	0.09	0	0.205	0.295
15	0	0.5	0.5	0.298	0	0.016	0.314
16	0.333333333	0.333333333	0.333333333	0.09	0	0.027	0.117

Tabla 7. Tabla de resultados.

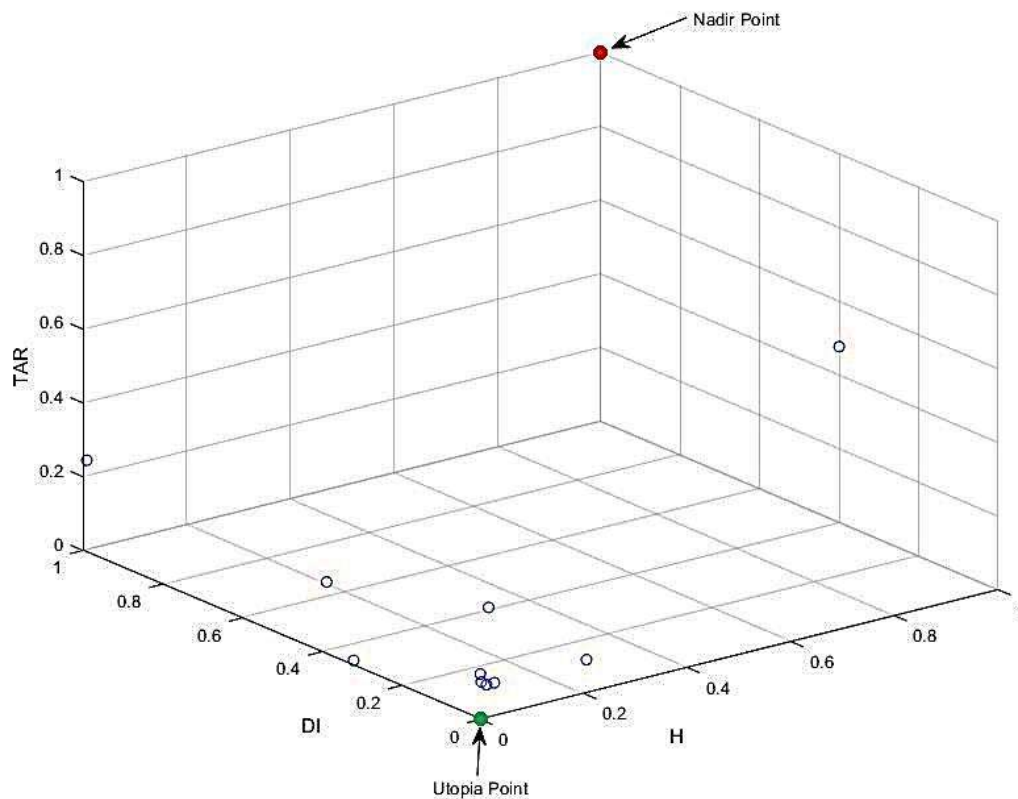


Figura 12. Solución Pareto para el TAR, DI y H

Para realizar los análisis pertinentes, se tomaron los casos dos, cuatro y doce para ejemplificar los diferentes escenarios posibles que se obtuvieron: el caso dos tiene una insatisfacción de 0.103, la prueba cuatro de 0.334 y la prueba doce de 1.46. Se observa en la Tabla 7 que al caso número dos se le dio un mayor peso al nivel dinámico del pozo, a la prueba número cuatro a los ingresos de la red macroscópica y a la prueba número doce se le asignó toda la importancia a la demanda insatisfecha.

10.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PRUEBA 2

La Figura 12, 13 y 14 muestran el agua en los pozos de mes a mes durante un año para la prueba número dos. En la Figura 9 se observa que todos los pozos permanecen en un nivel constante, a excepción del Pozo 16, el cuál sufre una pérdida de 241,206,168.9 m³, ya que en enero tenía un total de 247,021,500 m³ y termina diciembre con 5,815,331.134 m³.

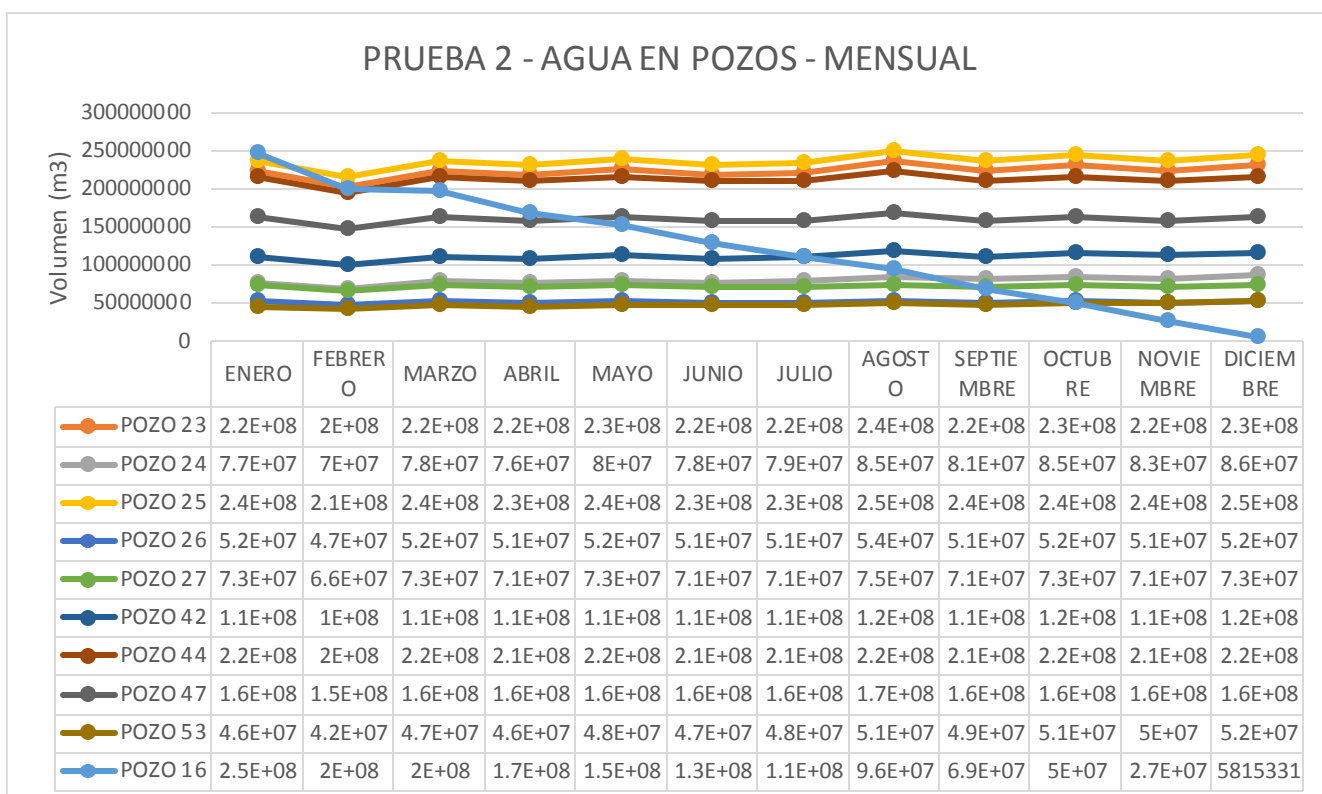


Figura 12. Agua en los pozos de extracción para la prueba no. 2

PRUEBA 2 - AGUA EN POZOS - MENSUAL

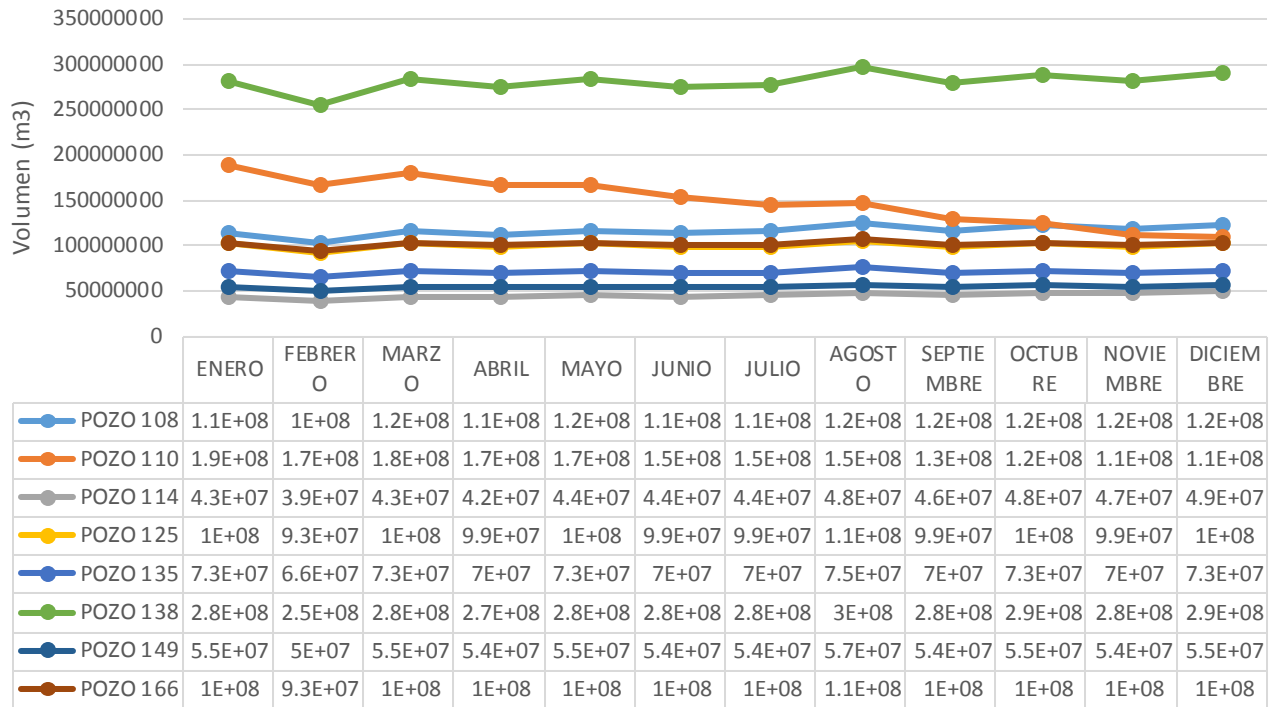


Figura 13. Agua en los pozos de extracción para la Prueba 2.

PRUEBA 2 - AGUA EN POZOS - MENSUAL

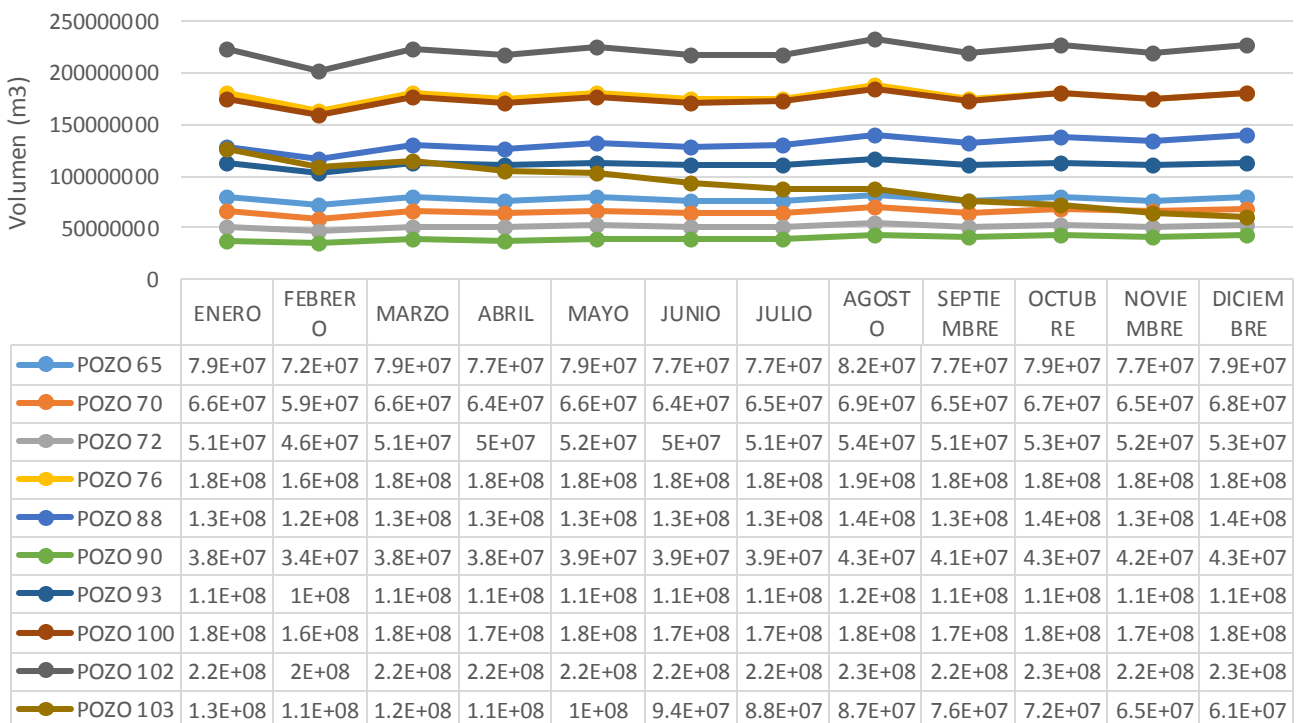


Figura 14. Agua en los pozos de extracción para la Prueba 2.

Al igual que el pozo 16, los pozos 103 y 110 sufren una disminución en el volumen total del pozo; el pozo 103 en enero tiene un volumen de 125,580,400 m³ y termina en diciembre con 61,255,000 m³. El pozo 110 inicia el año con 188,834,600 m³ y en diciembre tiene un volumen de 109,068,300 m³. Esto se debe a que estos pozos fueron los que llevaron la distribución de agua a los usuarios domésticos e industriales, como se observa a continuación en la Figura 16 y la Figura 17.

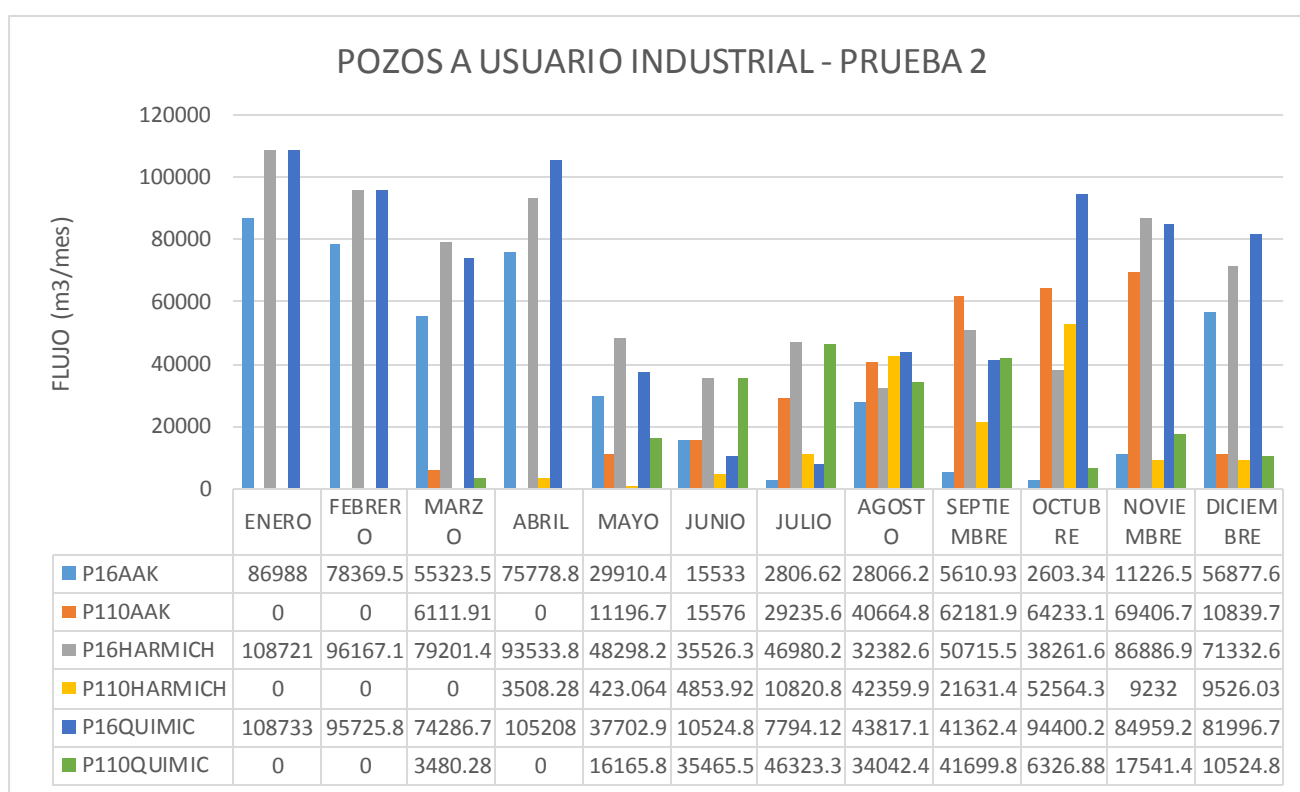


Figura 15. Flujo de agua de los pozos hacia el usuario industrial.

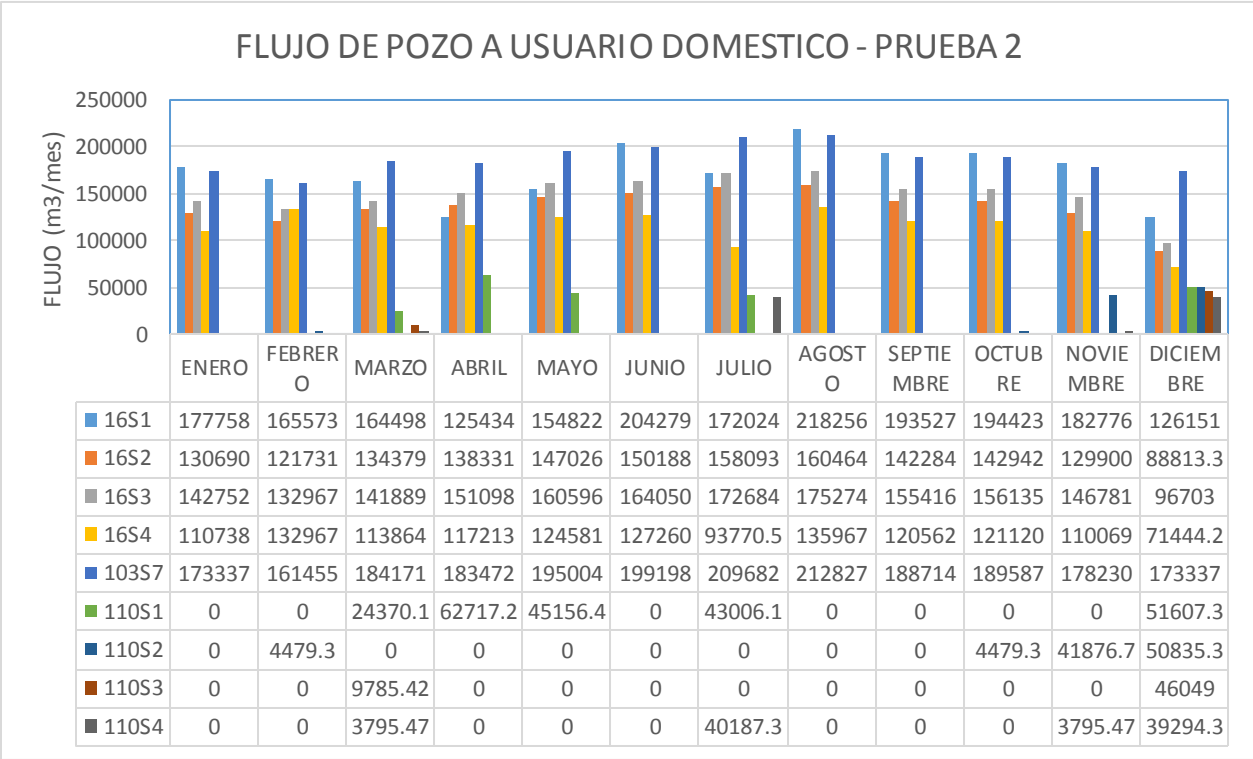


Figura 16. Flujo de agua de los pozos hacia el usuario doméstico.

En la Figura 18 se ilustra la ubicación del Pozo 16. Se puede deducir que la razón por la cual, en todas las pruebas realizadas, este pozo sufrió el mayor impacto en la disminución de su volumen a lo largo del año es por la distancia entre este y las industrias ubicadas en el sector 8; es el pozo más cercano a ellas.



Figura 17. Localización del Pozo 16.

A continuación, se graficó el volumen dentro de los tanques de almacenamiento para la prueba 2, y se muestran los resultados de la Figura 19 a la Figura 20. Los tanques de almacenamiento distribuyen el agua únicamente a los usuarios industriales. El usuario industrial nunca tiene demanda insatisfecha, ya que sus procesos dependen de ella y por lo tanto debe de pagar una alta retribución monetaria al organismo encargado de la distribución del agua, garantizando que reciba recursos hídricos tanto de las fuentes naturales, en este caso los pozos, como de las fuentes artificiales, o sea tanques de almacenamiento. Las Figuras 20 a 22 muestran la distribución del agua para los usuarios industriales desde los tanques de almacenamiento.

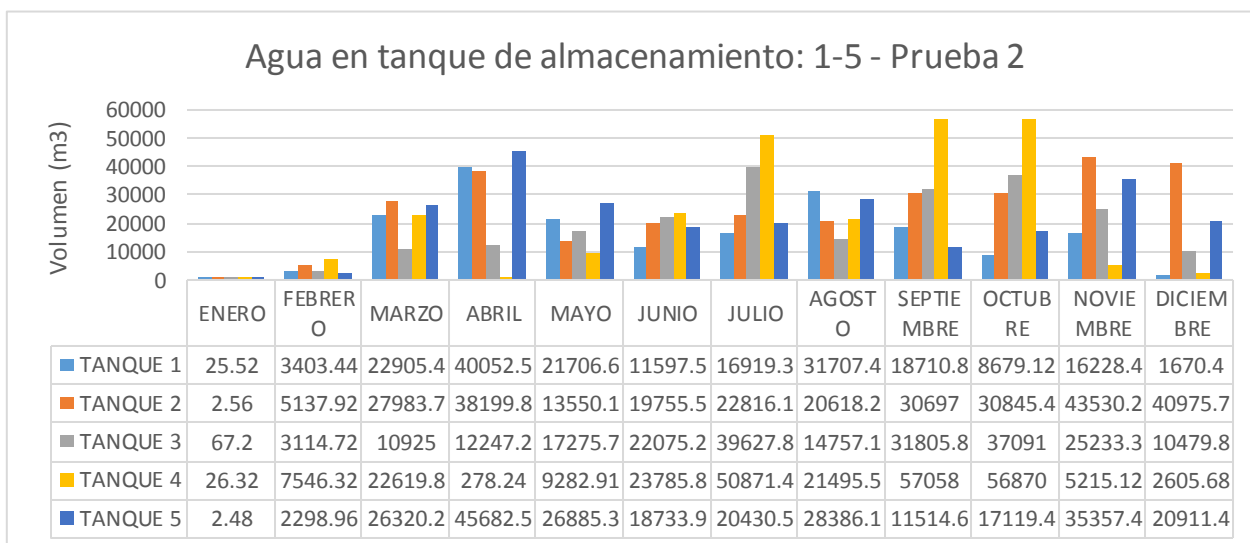


Figura 18. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 1-5 (Prueba 2).

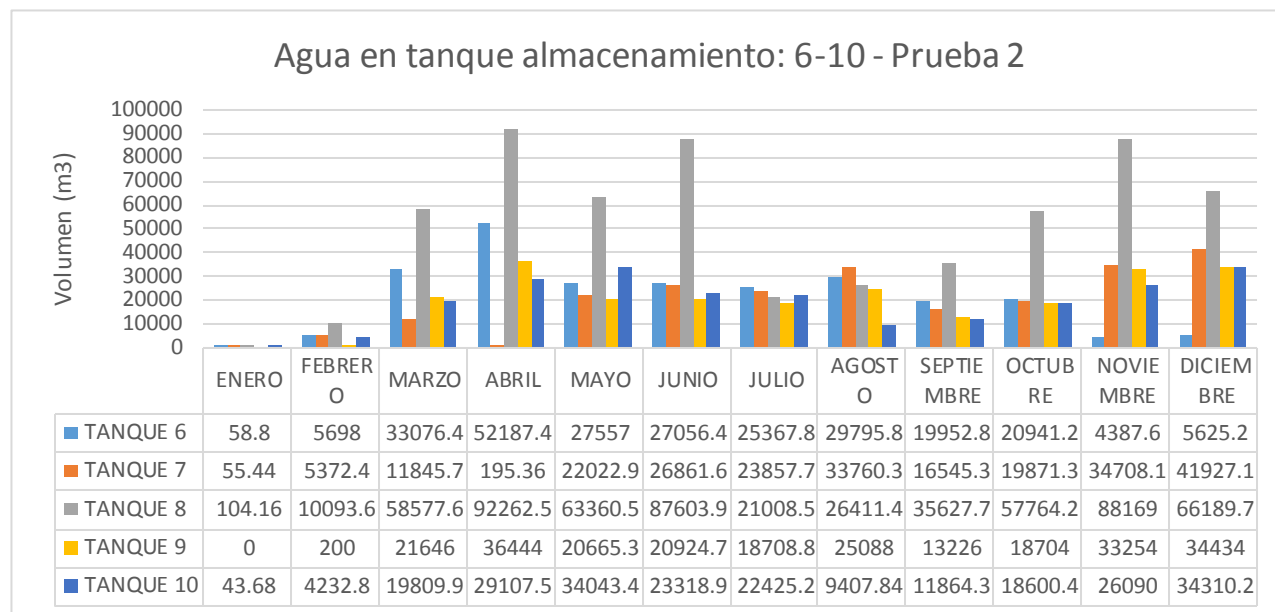


Figura 19. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 6-10 (Prueba 2).

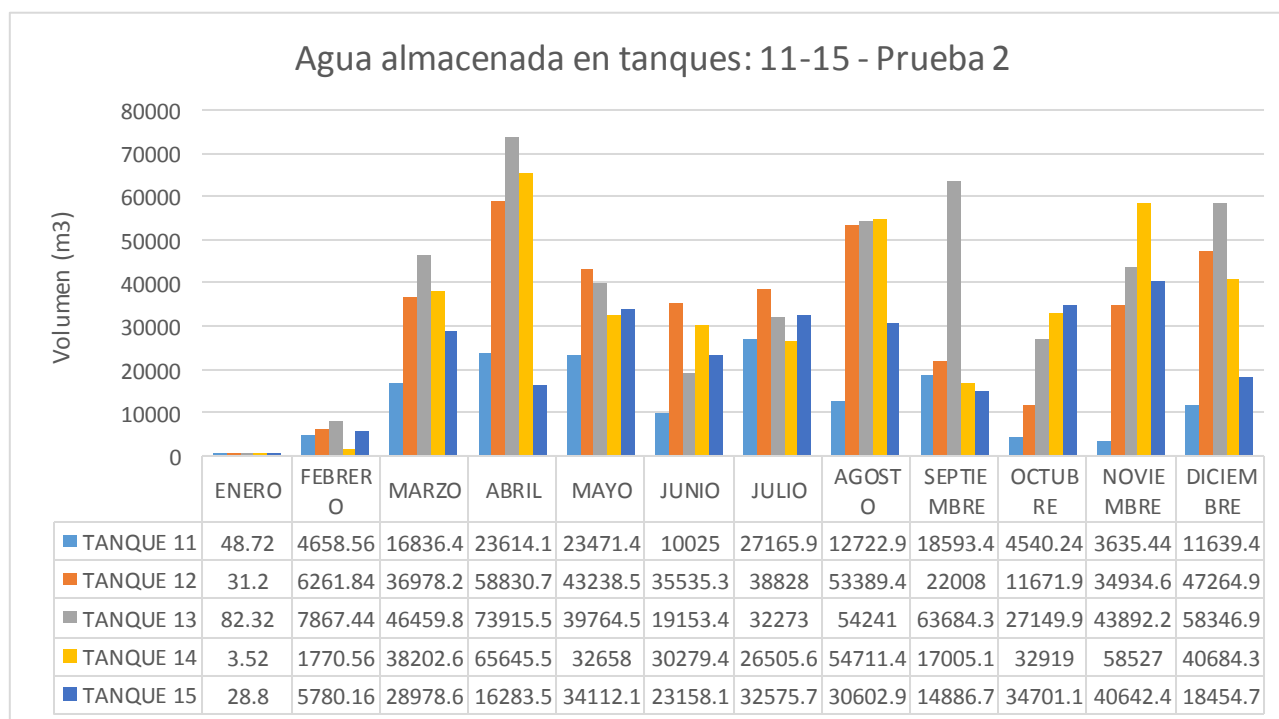


Figura 20. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 11-15 (Prueba 2)



Figura 21. Agua disponible en los tanques de almacenamiento 11-15 (Prueba 2)

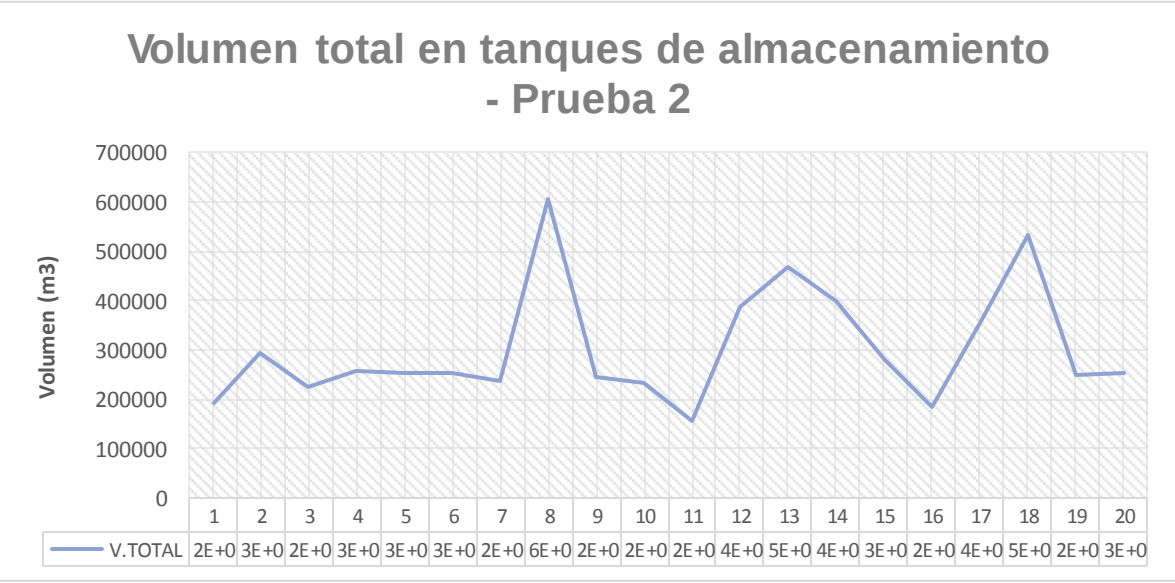


Figura 22. Volumen total en los tanques de almacenamiento para la Prueba 2.

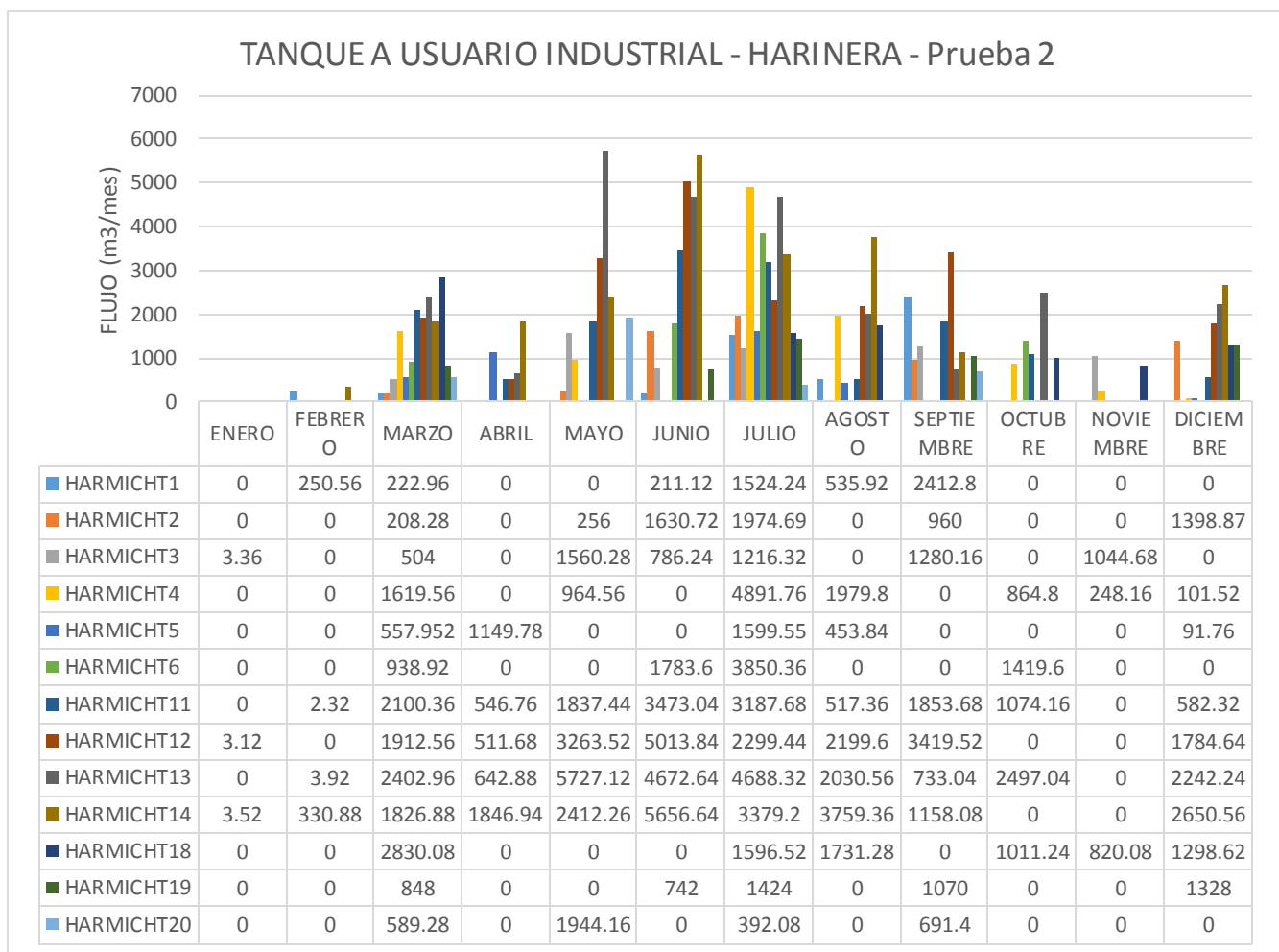


Figura 23. Flujo de tanque de almacenamiento a usuario industria (HARINERA).

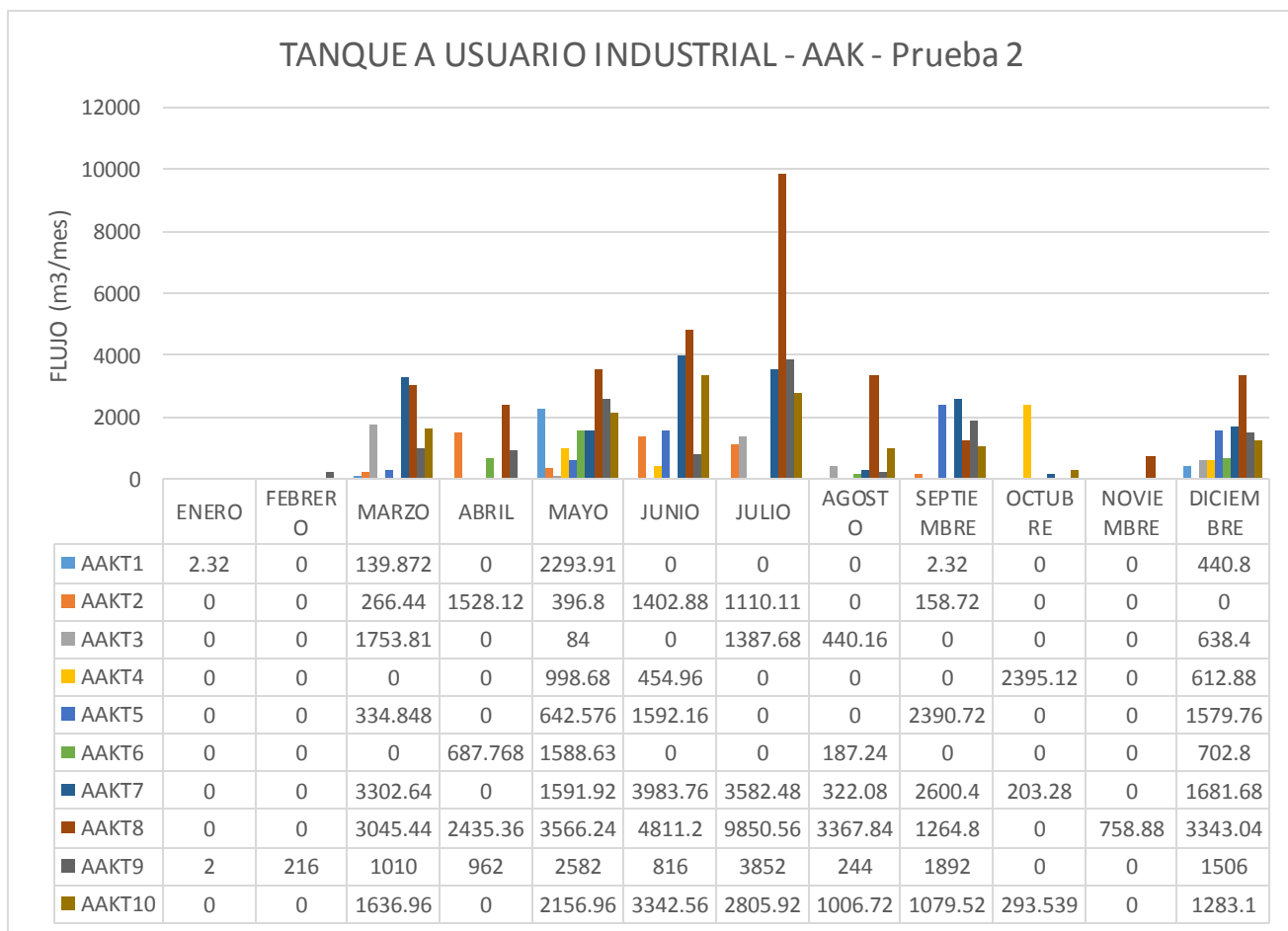


Figura 23. Flujo de tanque de almacenamiento hacia usuario industrial (AAK) Prueba 2.

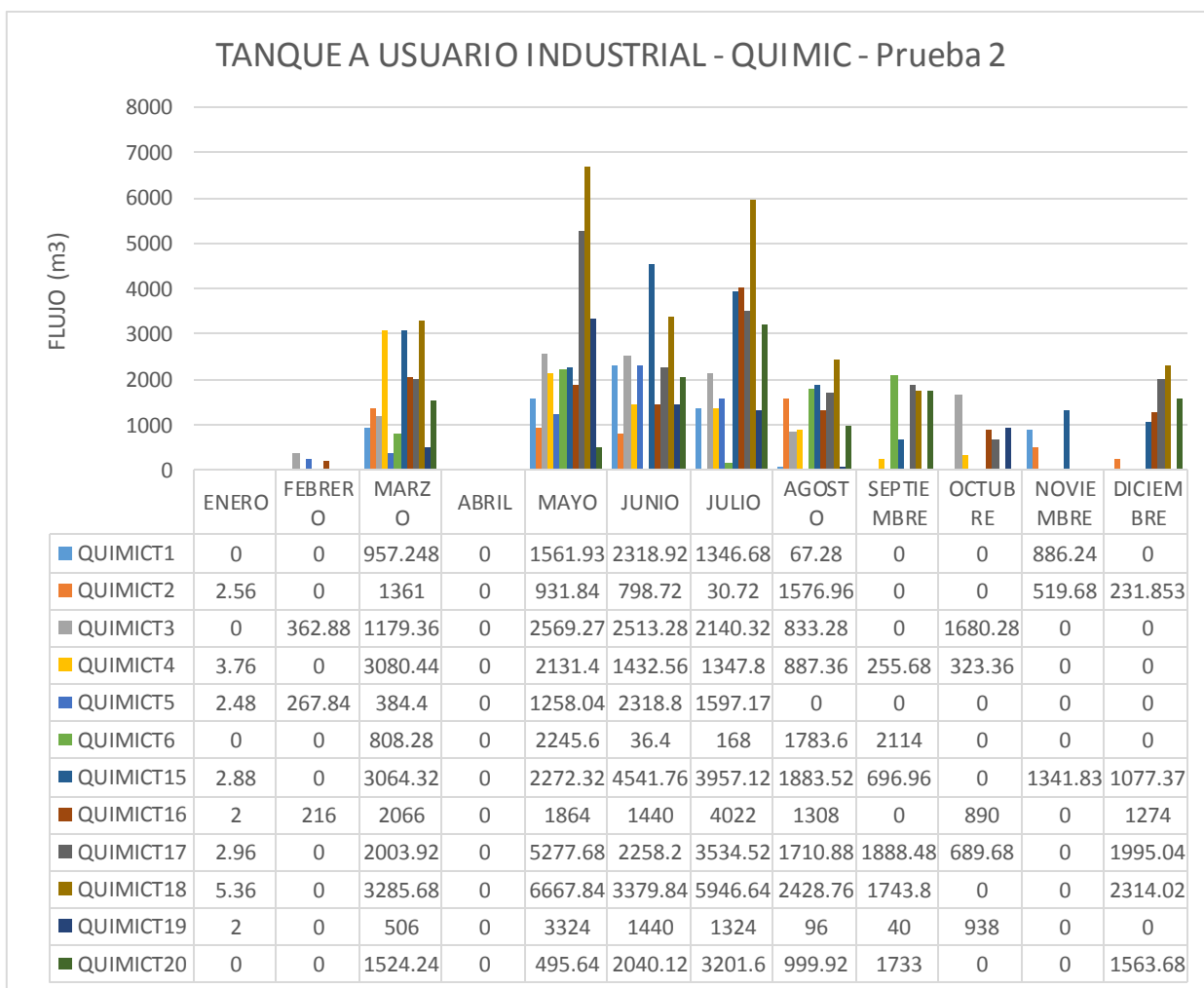


Figura 24. Flujo de tanque de almacenamiento a usuario industria (QUIMIC) Prueba 2.

Se puede observar que los meses con menor lluvia pluvial (noviembre, diciembre, enero, febrero y abril) coinciden con los meses en los que menor volumen de agua tienen los tanques de almacenamiento, y por lo tanto son los meses que los tanques no mandan agua hacia la industria, sin embargo, esos meses se abastecen por medio de los pozos, ya que como se mencionó anteriormente, la industria siempre tendrá agua para poder abastecer su proceso. En este caso, los pozos 16 y 110 fueron los encargados de suministrar el agua a las industrias.

10.2 ANÁLISIS RESULTADOS PARA LA PRUEBA 4

A esta prueba se le dio un mayor peso a los ingresos de la red de agua (TAR). Este punto fue de los más alejados del punto de utopía. Al dar más peso a esta variable, el modelo busca satisfacer primordialmente que los ingresos se maximicen; ya que en el modelo se estableció como restricción que la demanda insatisfecha no fuera mayor a dos días, la solución no comprometerá esta variable.

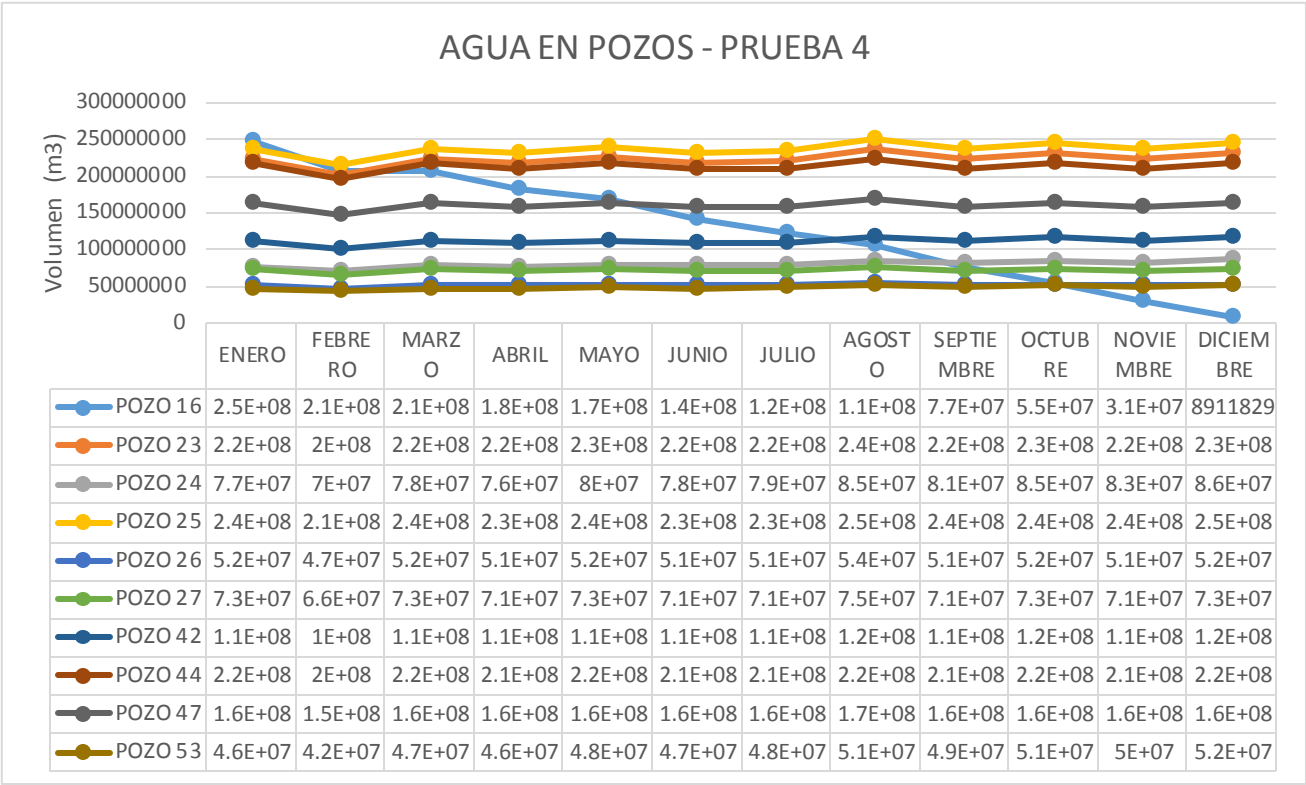


Figura 25. Agua en los pozos de agua para la Prueba 4.

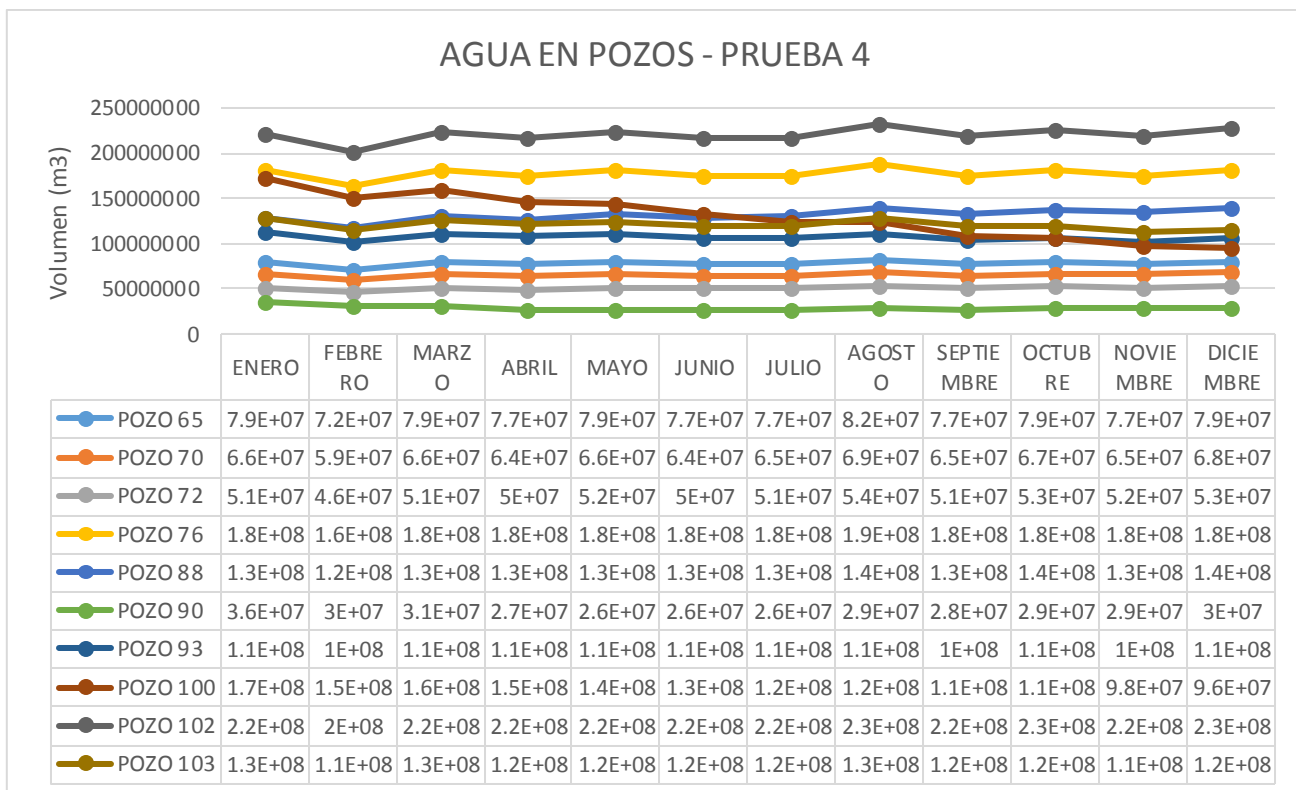


Figura 26. Agua en los pozos de agua para la Prueba 4.

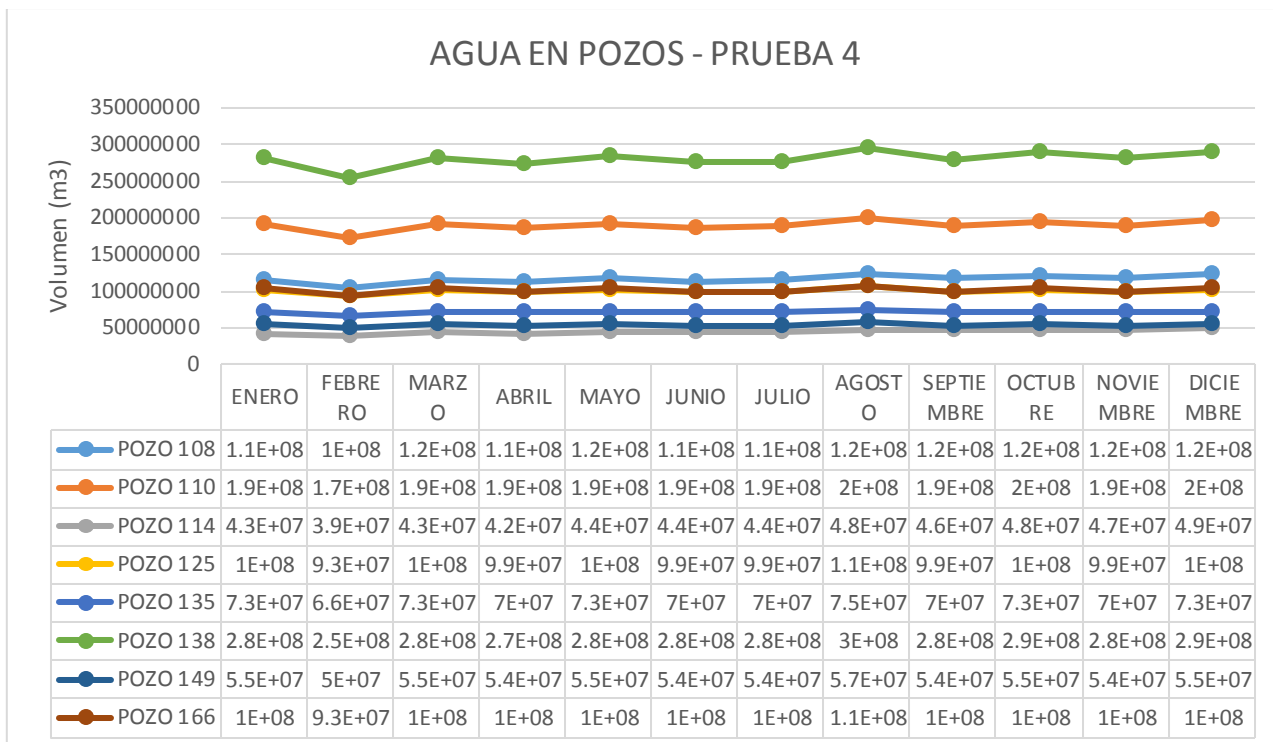


Figura 27. Agua en los pozos de agua para la Prueba 4.

Al igual que en la Prueba 2, el pozo con más estrés es el pozo 16, que en este caso sufre una pérdida en volumen de 249,393,970.6 m³, es decir, pierde el 96.4% del agua con la inició el año.

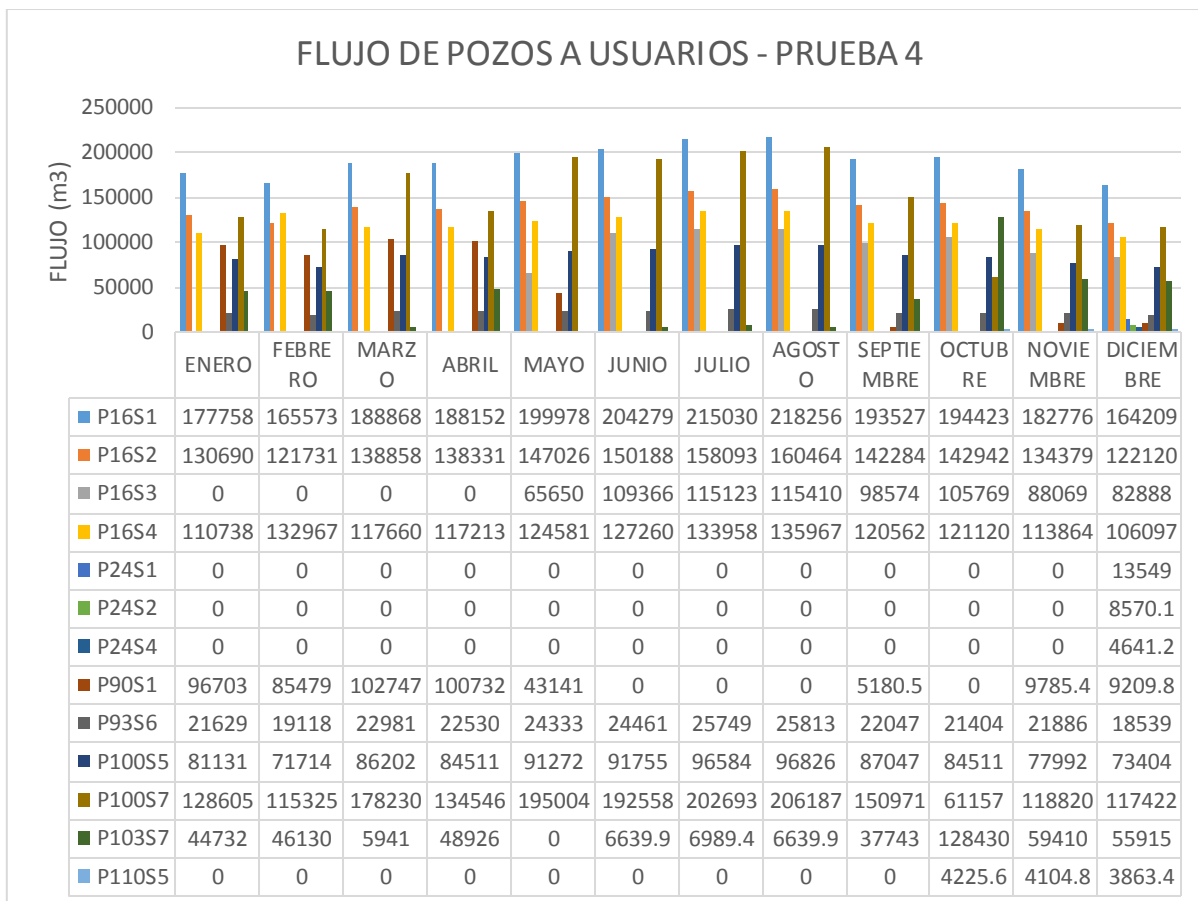


Figura 28. Flujo de agua desde los pozos al usuario doméstico.

En la solución de esta prueba los tanques de almacenamiento únicamente se encargaron de abastecer al usuario industrial, y por lo tanto se observa que más pozos se ven involucrados para satisfacer la demanda de los usuarios; en la prueba anterior únicamente se hacía uso de los pozos 16, 103 y 110 para cumplir con la demanda de agua. En este caso se toma agua de cada pozo ubicado cerca del usuario que busca abastecer; aquí también se observa la razón por la cual el pozo 16 sufre la mayor pérdida de agua, pues es el encargado de abastecer a los usuarios 1 a 4, mientras que el pozo 24 solo manda agua a esta zona en el mes de diciembre.

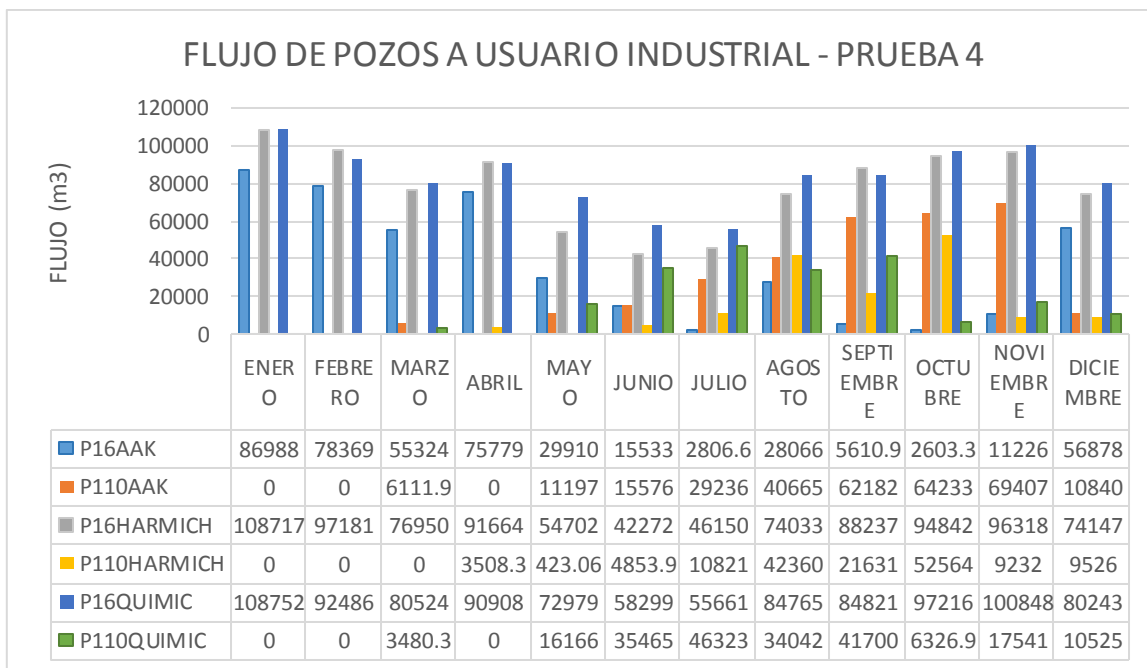


Figura 29. Flujo de agua desde los pozos al usuario industrial

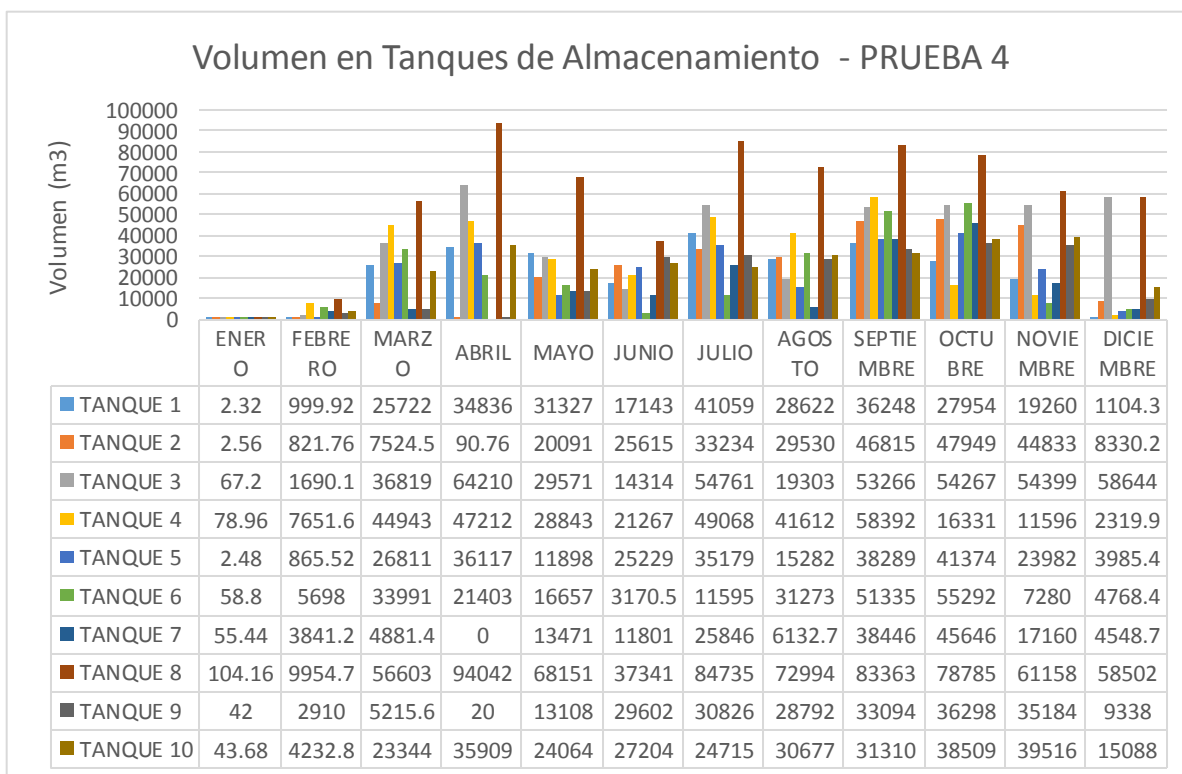


Figura 30. Volumen en tanques de almacenamiento 1 a 10 - Prueba 4.

Volumen en Tanques de Almacenamiento - PRUEBA 4

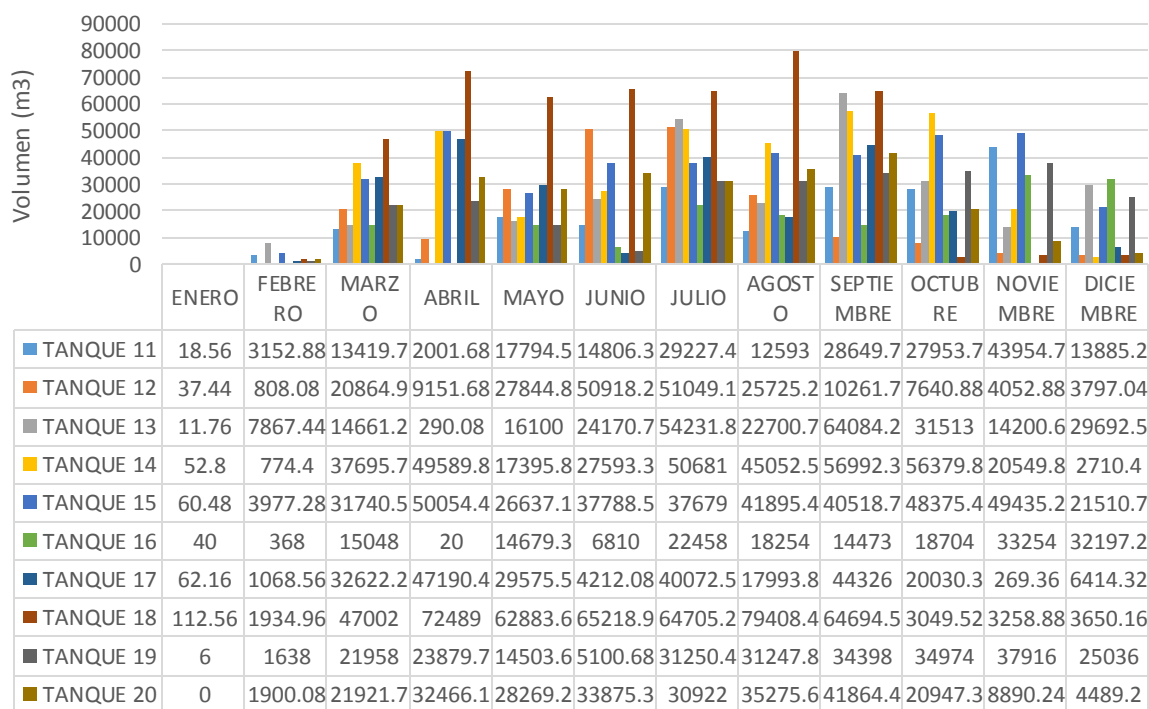


Figura 31. Volumen en tanques de almacenamiento 11 a 20 - Prueba 4.

Volumen total en tanques de almacenamiento - Prueba 4

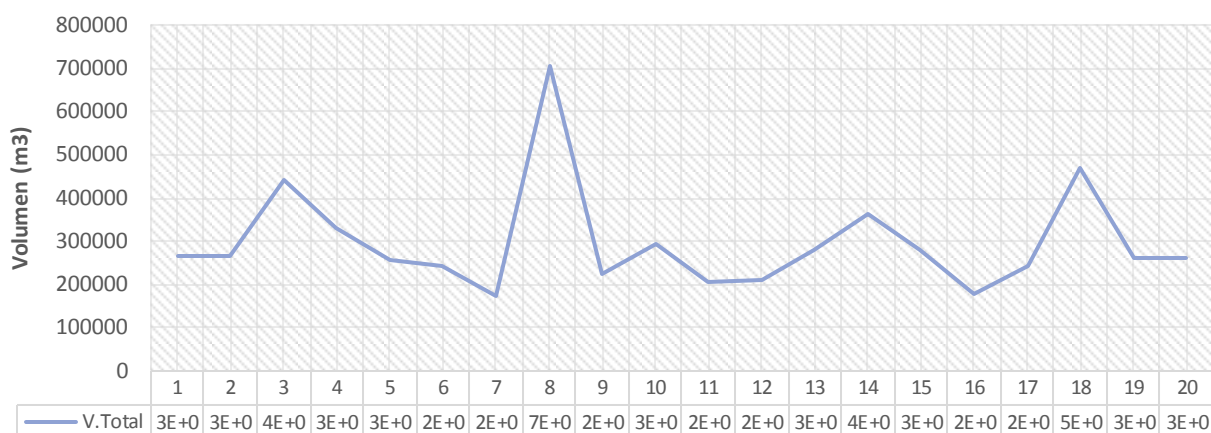


Figura 32. Volumen Total en tanques de almacenamiento – Prueba 4

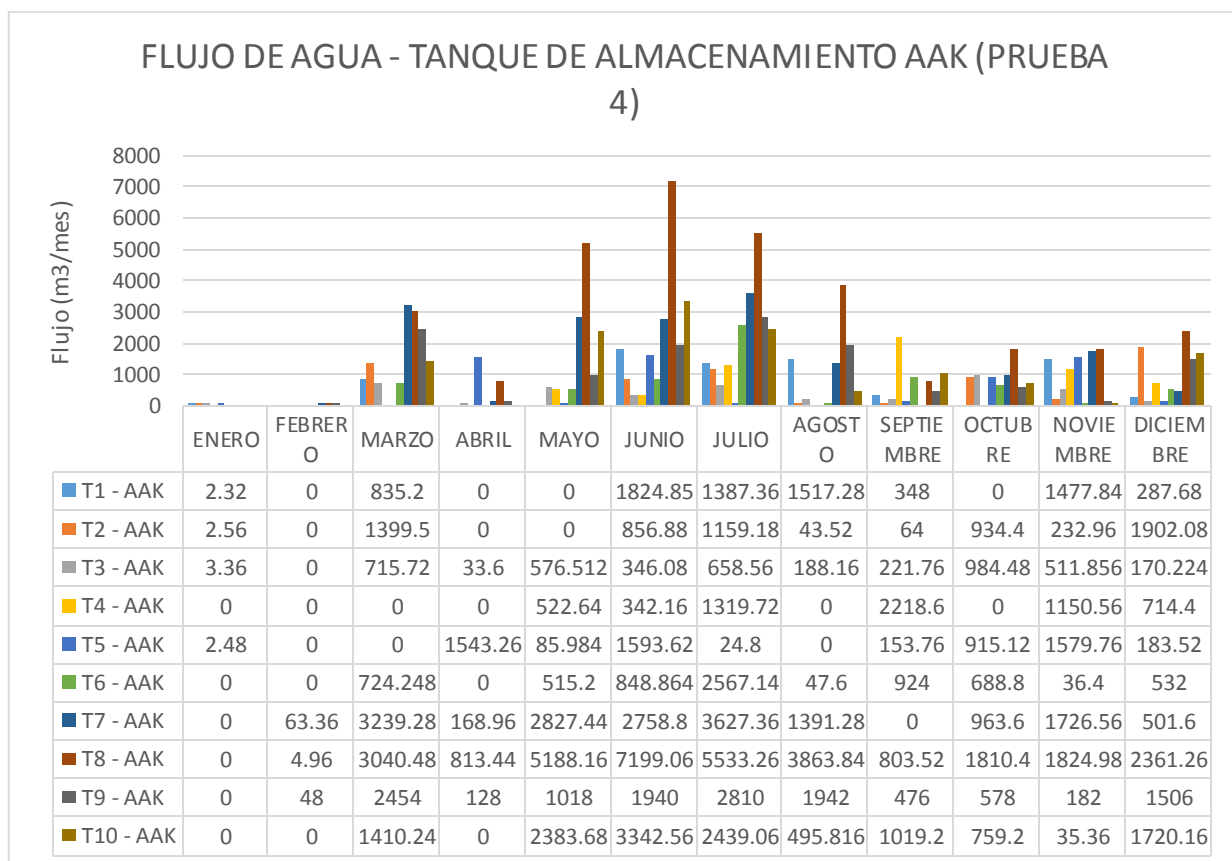


Figura 33. Flujo de agua hacía el usuario industrial AAK – Prueba 4.

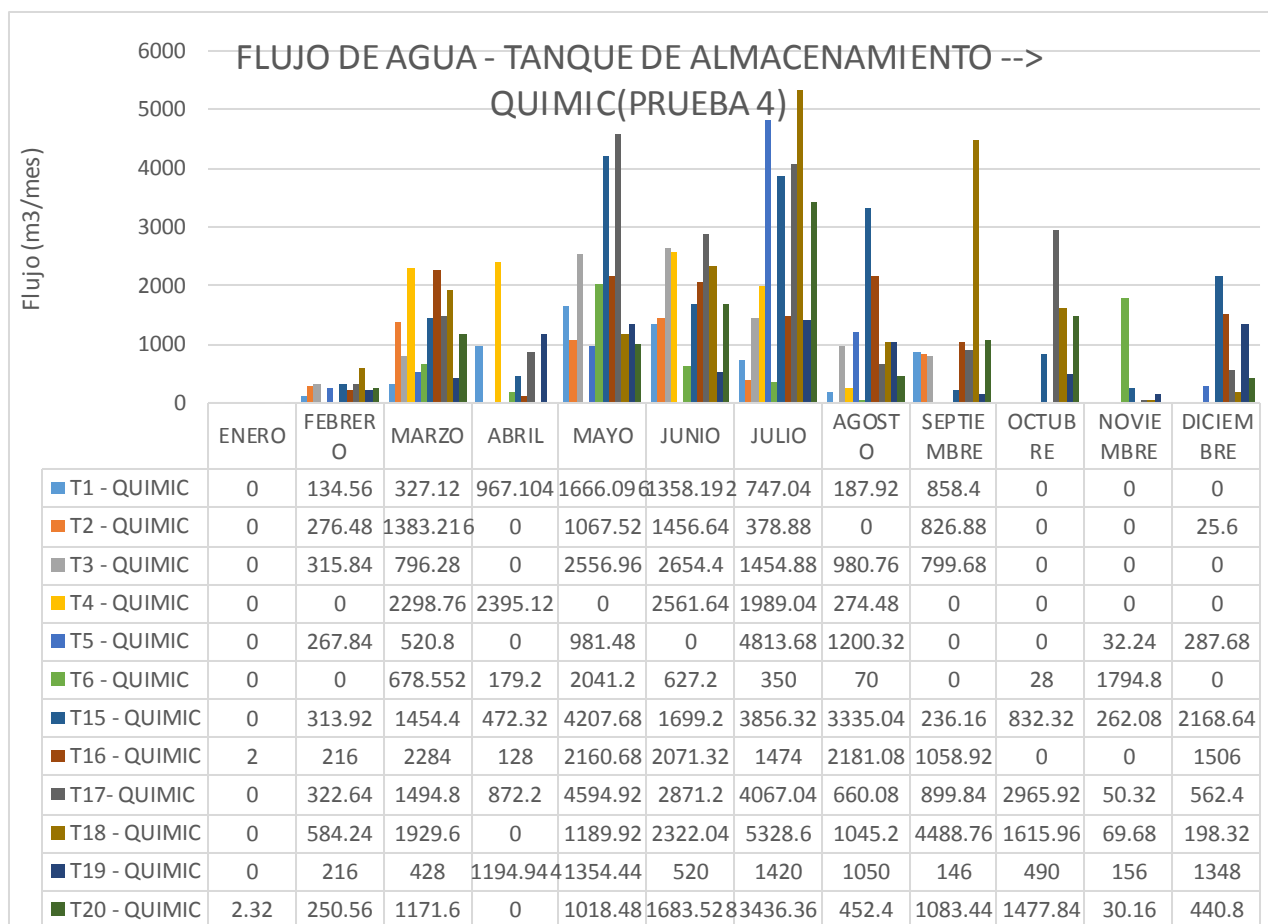


Figura 34. Flujo de agua hacia el usuario industrial Quimic - Prueba 4.

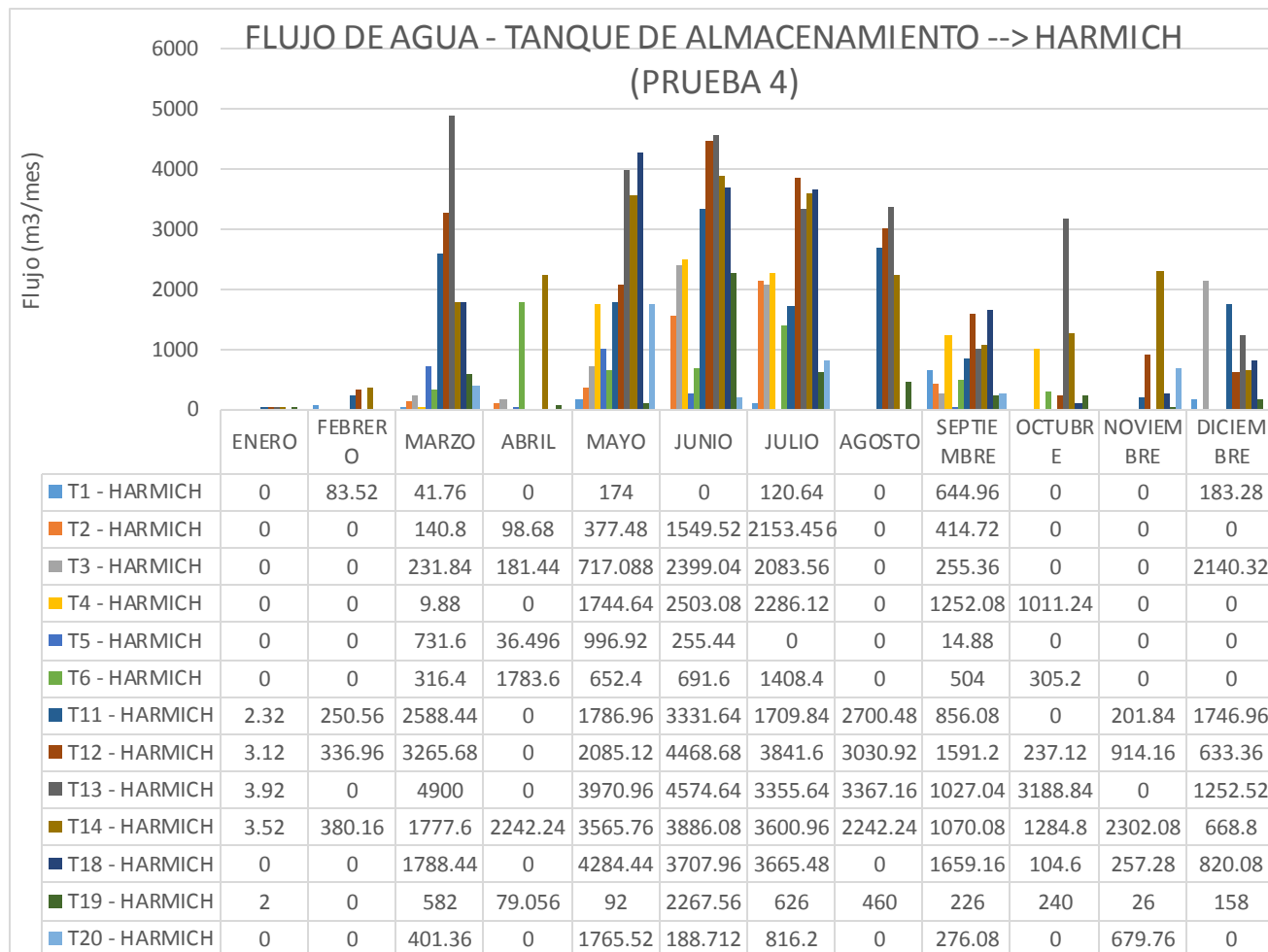


Figura 35. Flujo de agua hacia el usuario industrial Harmich - Prueba 4.

10.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA PRUEBA 12

En esta prueba se le dio todo el peso a la demanda insatisfecha; como se había mencionado antes, el darle el mayor peso a la demanda insatisfecha no resulta viable para ser aplicado en la realidad. Si no se restringe el uso de agua a los usuarios domésticos, sería tratada como un recurso ilimitado, lo cual es peligroso tanto para el medio ambiente como para el mismo ser humano, ya que se acostumbraría a usar el agua de manera desmedida como si no hubiera consecuencias, mismas que hoy en día estamos viviendo. A continuación, se muestran las gráficas de este escenario, y las diferencias con las dos pruebas anteriores son muy claras.

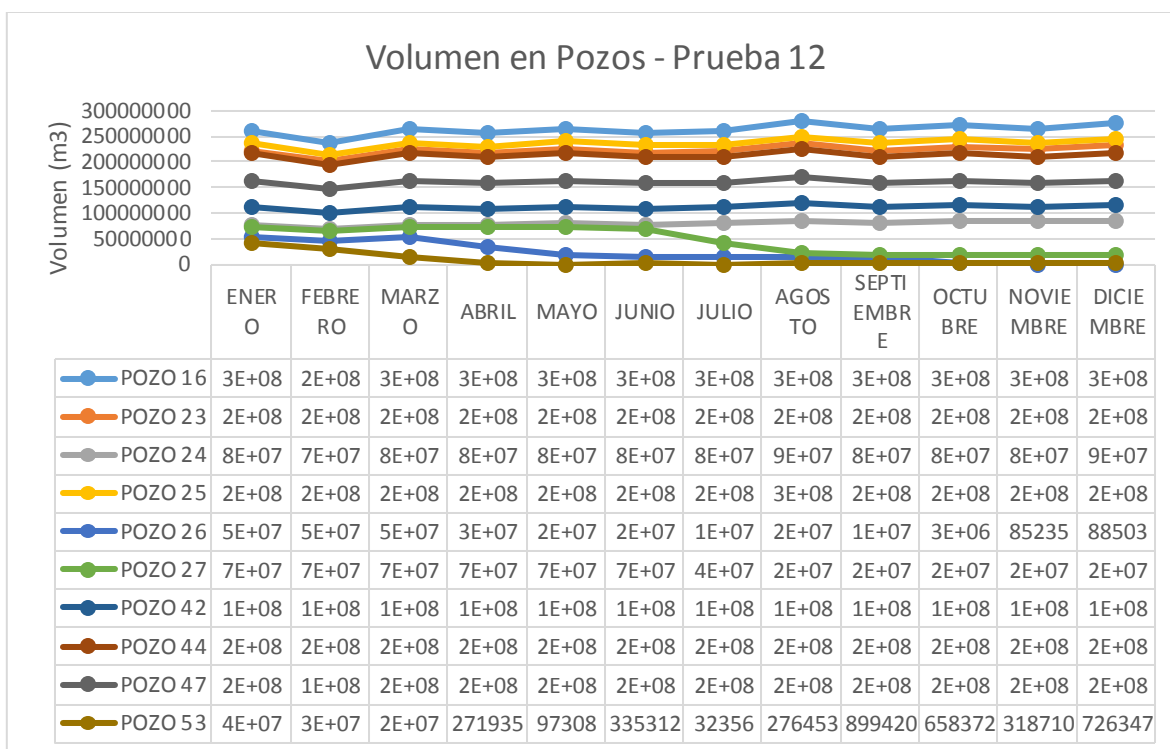


Figura 36. Volumen en pozos para la prueba 12.

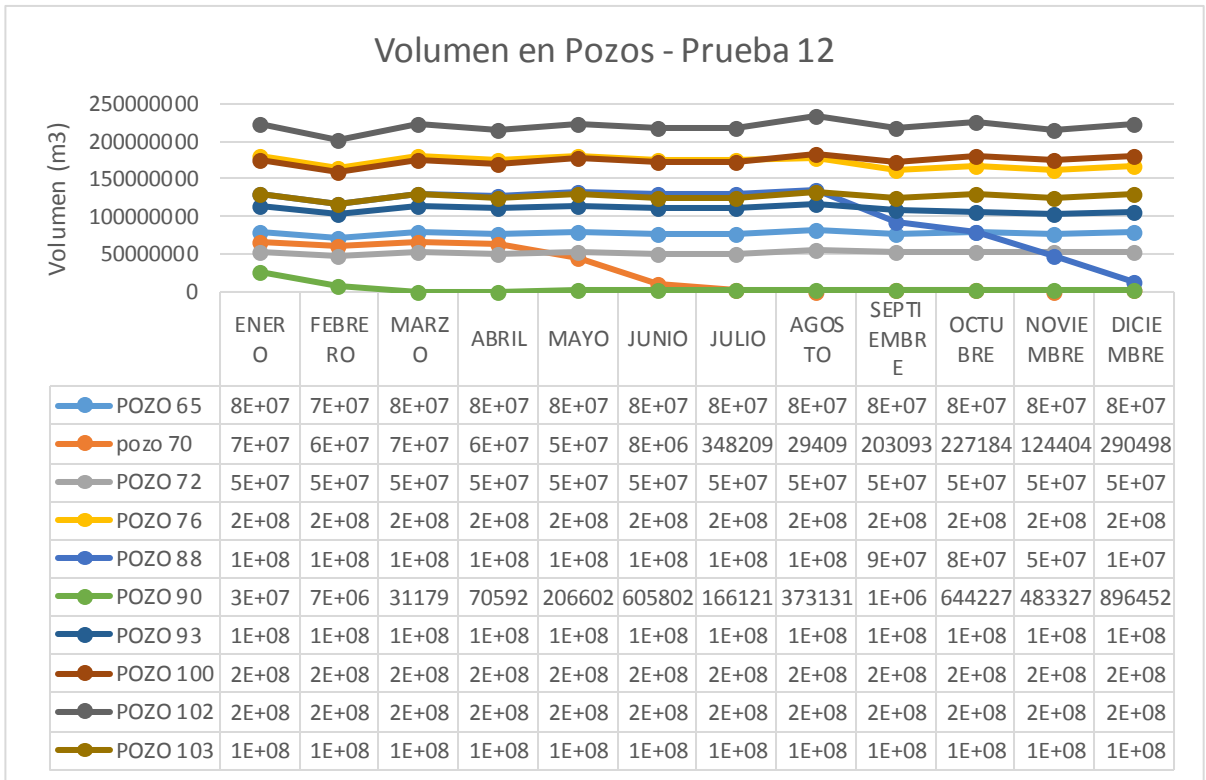


Figura 37. Volumen en pozos para la prueba 12

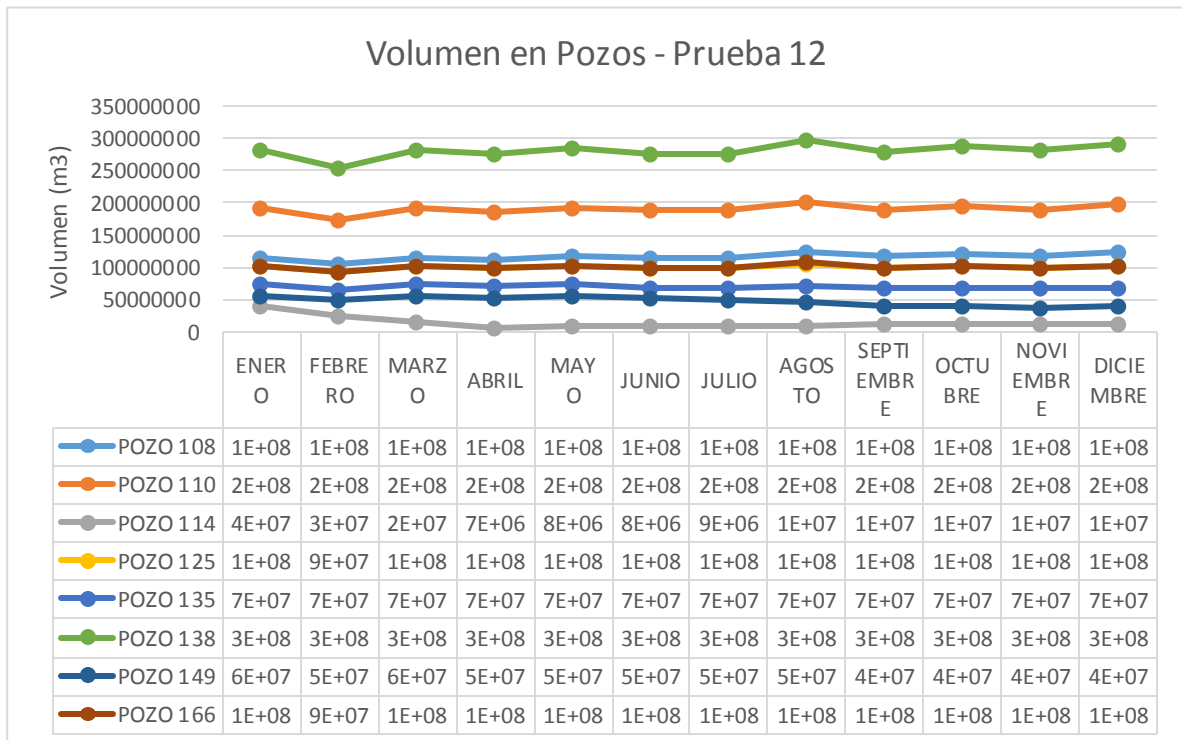


Figura 38. Volumen en pozos para la prueba 12

A primera instancia se observa que en cada gráfica hay al menos un pozo en el cual su volumen decrece exponencialmente: el pozo 26 se reduce un 99.8%, el pozo 27 un 73%, el pozo 53 un 98.2%, el pozo 88 un 90%, el pozo 70 un 99.5%, el pozo 90 un 96%, y por último el pozo 114 se reduce un 68% de su volumen inicial. A diferencia de las dos pruebas anteriores, en las cuales únicamente el pozo 16 sufría el mayor impacto en su reducción de volumen, aquí se tienen 7 pozos que están siendo sobre explotados para beneficio de los usuarios domésticos, e industriales.

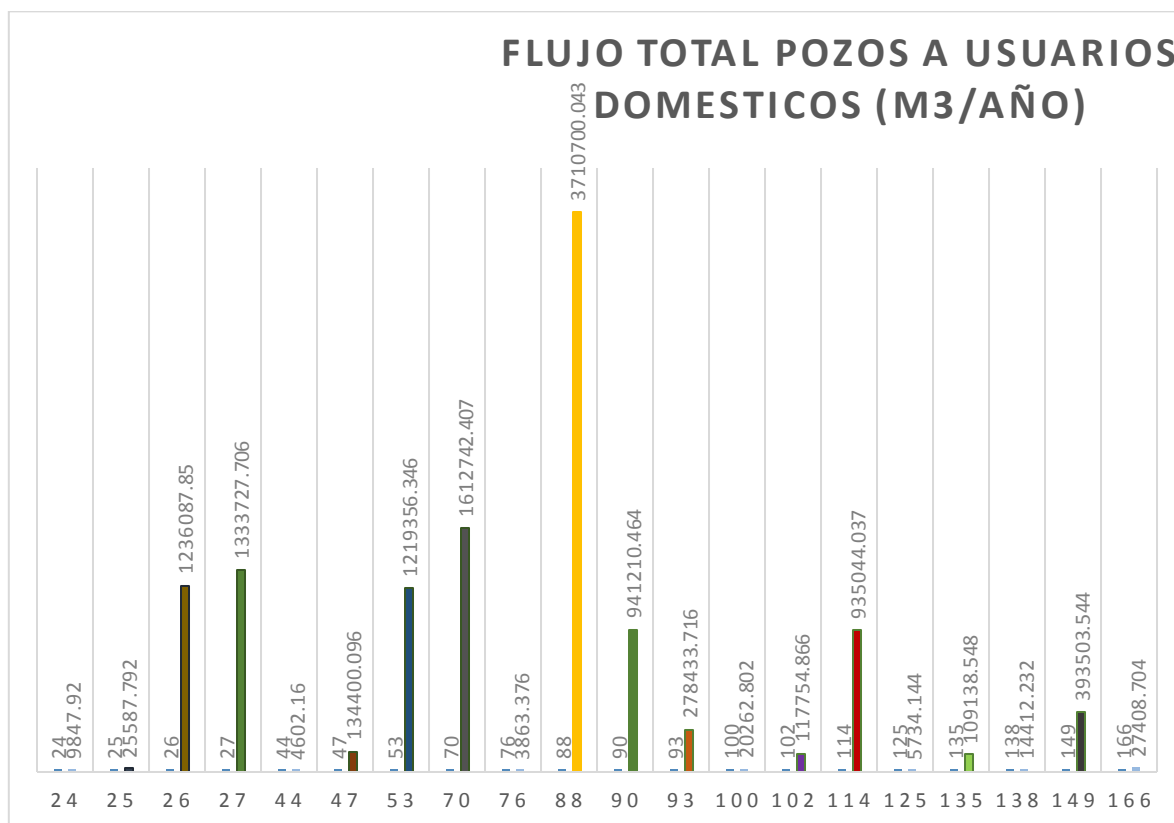


Figura 39. Flujo total de pozos a usuarios domésticos - Prueba 12.

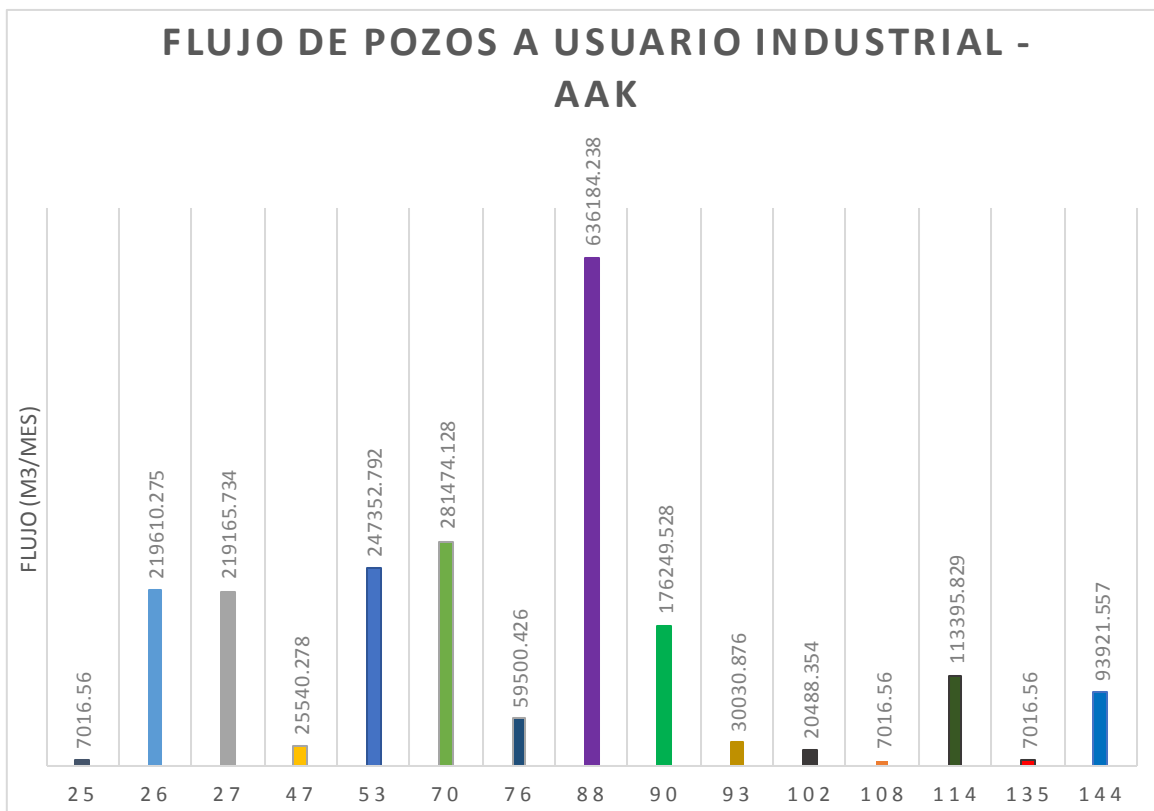


Figura 40. Flujo de pozos a usuario industrial (AAK) Prueba 12.

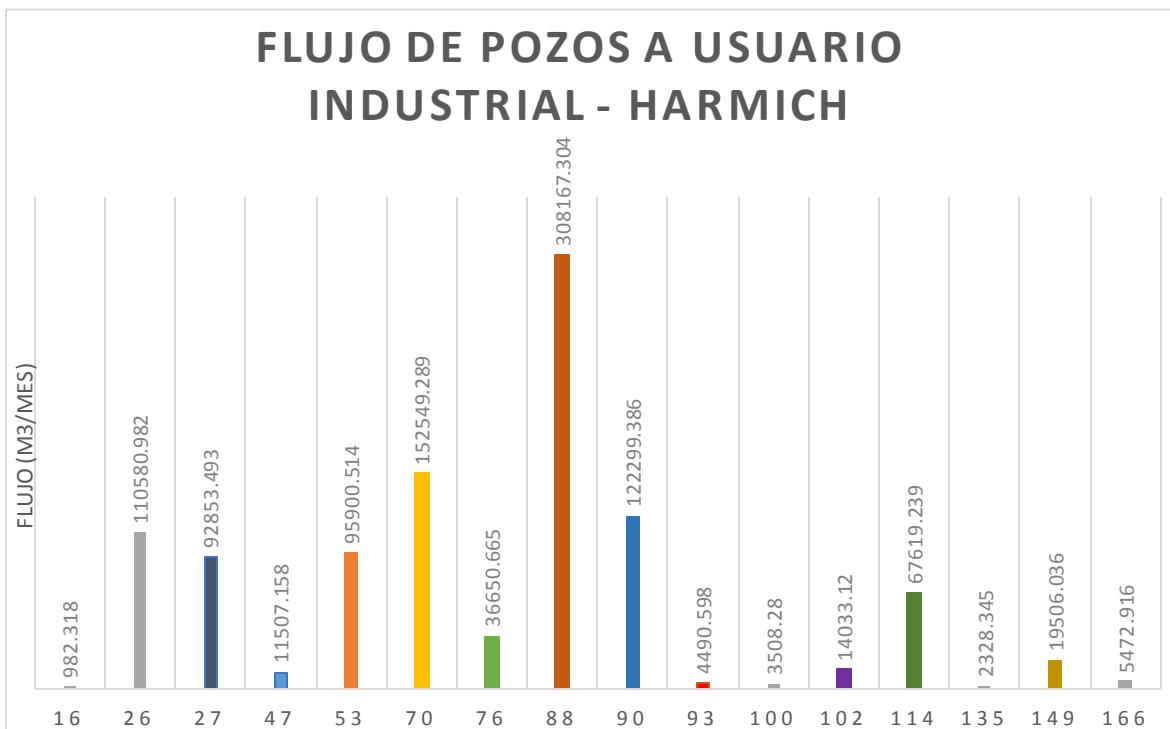


Figura 41. Flujo de pozos a usuario industrial (HARMICH) Prueba 12.

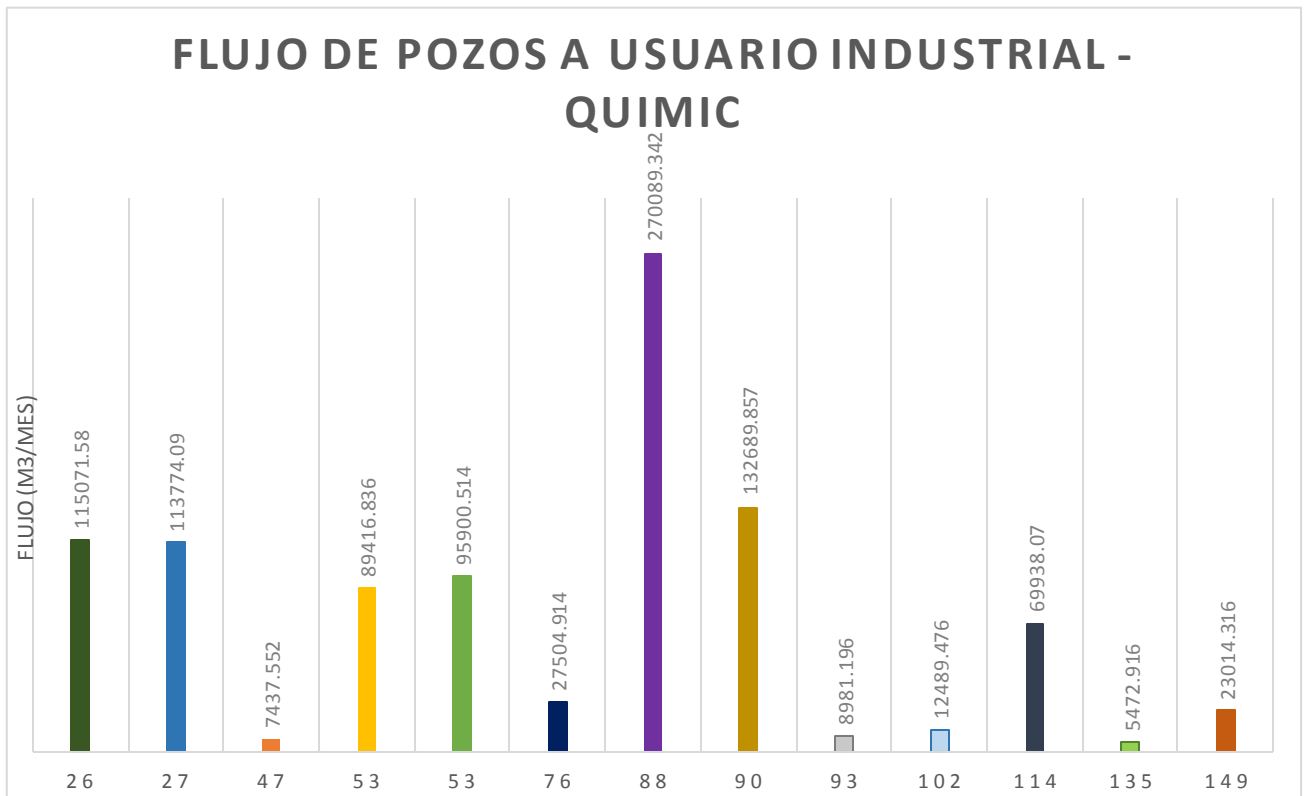


Figura 42. Flujo de pozos a usuario industrial (QUIMIC) Prueba 12.

En esta prueba, tanto usuarios domésticos e industriales solo se abastecen por medio de los pozos profundos, esta solución no considera los tanques de almacenamiento como opción para satisfacer a los usuarios, por lo cual los pozos conllevan un mayor estrés.

La Tabla 8 muestra un resumen de los resultados obtenidos de los análisis 2, 4 y 12. Estos tres análisis se realizaron con el fin de observar el comportamiento de las variables cuando la distribución de pesos entre ellas es muy irregular; al caso 2 se le dio 61% de la importancia al nivel dinámico del pozo, a la prueba 4 se le dio el 77% de la importancia a los ingresos de la red de agua y al caso 12 se le dio el 100% de la importancia a la demanda insatisfecha. Los resultados muestran que tanto la prueba 4 como la prueba 12 no satisfacen el enfoque multi-stakeholder: la prueba 4 tuvo ingresos superiores, sin embargo, presentó demanda insatisfecha: 1, 275,400 m³ de agua no fueron entregados a los usuarios domésticos, y cinco pozos fueron sobreexplotados. El caso 12 muestra pérdidas para los ingresos de la red de agua, y 11 pozos fueron sobreexplotados.

Los casos 4, 6 y 10 se analizaron para ver el comportamiento de las variables cuando las distribuciones de pesos son cercanos entre ellos; al caso 5 se le dio el 39% de la importancia a los ingresos de la red de agua, al caso 6 se le dio el 39% de la importancia a la altura del nivel dinámico del pozo y a la prueba 10 se le dio el 39% de la importancia a la demanda insatisfecha. Estas tres pruebas, así como la prueba 2, tuvieron resultados similares. Cuando se da una distribución más equitativa entre las variables, se satisface mejor el modelo multi-stakeholder.

Tabla 9. Resultados

	H	TAR	TAR	H	DI	DI
	Caso 2	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 10	Caso 12
TAR (\$)	6,409,700	7,284,600	6,516,700	6,337,500	6,464,900	-260200
DI (m ³)	0	1,275,400	0	0	0	0
Agua fresca (m ³)	14,238,000	12,962,000	14,238,000	14,322,000	14,318,000	16,152,000
Pozos sobreexplotados	3	5	4	3	4	11

12 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo la optimización multi-objetivo de redes de agua con un esquema multi-stakeholder para la ciudad de Morelia, en Michoacán. Se consideró el tratamiento de las aguas residuales y la recolección de agua pluvial para minimizar el consumo de agua fresca, la demanda insatisfecha de los usuarios domésticos y los costos de operación del sistema. Se evaluaron distintos escenarios para encontrar la solución compromiso que satisfaría a las tres principales variables: los ingresos de la red de agua macroscópica (TAR), la demanda insatisfecha de agua (DI) y el nivel dinámico del pozo de extracción (H).

Los resultados muestran que la mayoría de los casos expuestos tienen una solución compromiso cercana al punto de Utopía, el cual representa la solución ideal al problema: la maximización de los ingresos a la red de agua macroscópica, una demanda insatisfecha igual a cero y la estabilidad de los niveles dinámicos de los pozos de extracción. Se observa que, al dar un mayor peso a la demanda insatisfecha, los ingresos de la red de agua, así como el nivel dinámico de los pozos se ven afectados negativamente por intentar cumplir la demanda de todos los usuarios domésticos, aumentando también el grado de insatisfacción. Se genera una mejor respuesta cuando se hacen distribuciones cercanas entre las tres funciones objetivos.

Para complementar el presente trabajo, se puede realizar una optimización multiobjetivo bajo incertidumbre, puesto que un aspecto relevante de esta investigación es la captación de agua pluvial. En este trabajo se tomó como constante los datos de lluvia para el año 2015 como constantes. Sin embargo, la realidad es que año tras año tanto la cantidad de agua que cae sobre la ciudad, así como los días en que llueve son desconocidos, por lo tanto, un análisis de incertidumbre será apropiado.

13 REFERENCIAS

- 1 WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos) /ONU-Agua. 2018. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. París, UNESCO.
- 2 Visión general del Agua en México – Agua.org.mx. (n.d.). Retrieved from <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>
- 3 Estadísticas del agua en México. (2018). México: SERMARNAT.
- 4 Atlas Del Agua En México. 2016. CONAGUA, SEMARNAT. Mexico City, México, 2016.
- 5 Marques, J., Cunha, M., & Savić, D. (2018). Many-objective optimization model for the flexible design of water distribution networks. *Journal of Environmental Management*, 226, 308–319. doi:10.1016/j.jenvman.2018.08.054
- 6 Nápoles-Rivera, F., Rojas-Torres, M.G., Ponce-Ortega, J.M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M. (2013). Optimal design of macroscopic water networks under parametric uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 88, 172-184.
- 7 Pérez-Uresti, S. I., Ponce-Ortega, J. M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2018). A multi-objective optimization approach for sustainable water management for places with over-exploited water resources. *Computers & Chemical Engineering*. doi:10.1016/j.compchemeng.2018.10.00
- 8 Bocanegra-Martínez, A., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Castro-Montoya, A. J., & El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal design of rainwater collecting systems for domestic use into a residential development. *Resources, Conservation and Recycling*, 84, 44–56. doi:10.1016/j.resconrec.2014.01.001
- 9 Garcia-Montoya, Mariana & Sengupta, Debalina & Nápoles-Rivera, Fabricio & Ponce-Ortega, Jose & El-Halwagi, Mahmoud. (2015). Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex. *Journal of Cleaner Production*. 130.

- 10 S. Alnouri, P. Linke, M. El-Halwagi (2014) A synthesis approach for industrial city water reuse networks considering central and distributed treatment systems. *Journal of Cleaner Production* 89: 231-250.
- 11 Sánchez-Bautista, A. F., Santibáñez-Aguilar, J. E., Fuentes-Cortés L. F., Flores-Tlacuahuac, A., Ponce-Ortega, J.M. 2018. A Multi-stakeholder Approach for the Optimal Planning of Sustainable Energy Systems. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 6(7), 9451-9460
- 12 Fuentes-Cortés, L. F., Ponce-Ortega, J. M., & Zavala, V. M. (2018). Balancing stakeholder priorities in the operation of combined heat and power systems. *Applied Thermal Engineering*, 128, 480–488.
- 13 Hernández-Romero, I. M., Fuentes-Cortés, L. F., & Nápoles-Rivera, F. (2019). Conditions accommodating a dominant stakeholder in the design of renewable air conditioning systems for tourism complexes. *Energy*, 172, 808–822. doi:10.1016/j.energy.2019.02.019
- 14 Water for Life, 2015, UN-Water. (n.d.). Retrieved from <https://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>
- 15 Pereira, L., Cordery, I. and Iacovides, I. (2009). *Coping with water scarcity*. 2nd ed. Springer, pp.1-8
- 16 Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (2007). Comisión Nacional del Agua. México.
- 17 Ramalho, R. S. (1983). *Introduction to wastewater treatment processes* (2nd ed.). New York: Academic Press.
- 18, 19 Diwekar, U. M. (2003). *Introduction to applied optimization*. Norwell, MA: Kluwer Academic.
- 20 Olivarez-Areyán J. J. (2019). Optimización de redes de agua macroscópicas considerando el nivel dinámico y demanda insatisfecha. UMSNH.