

Universidad Autónoma de
San Luis Potosí

Facultad de Economía
Maestría en Economía Matemática

Optimización dinámica aplicada al acuífero
de la zona conurbada de San Luis Potosí

T E S I S

que para obtener el grado de:
Maestra en Economía Matemática

P R E S E N T A:
Noraima Eréndira Rangel Sánchez

Director:
Dr. Leobardo Pedro Plata Pérez

Co-director:
Dr. Pedro Isidoro González Ramírez

San Luis Potosí, San Luis Potosí, México
Febrero, 2020



Optimización Dinámica aplicada al
acuífero de la zona conurbada de San Luis
Potosí UASLP by Noraima Eréndira Rangel
Sánchez UASLP is licensed under a
[Creative Commons Reconocimiento-
NoComercial-CompartirIgual 4.0
Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Dedicatoria

A Dios

A mi esposo Ricardo

A mi hijo Andrés

A todos mis parientes

A mis amigas y amigos

A mis compañeros Belén, Delfino, Jesús, Karla y Ricardo por todas las alegrías y momentos difíciles durante las maestrías.

Agradecimientos

Al **CONACYT** porque gracias al apoyo económico que otorga a los estudiantes interesados y que cumplen con sus requisitos, provee una educación de calidad para desarrollar investigadores que aporten a México propuestas y soluciones a las diversas problemáticas del país.

A mi director de tesis **Dr. Leobardo Plata**, por todo el apoyo en el desarrollo del modelo y las correcciones al documento, gracias por su tiempo y sus buenos consejos.

A mi co-director de tesis **Dr. Pedro González**, por el tiempo dedicado en la obtención y análisis de las fuentes de información, sus acertados conceptos que me ayudaron en la interpretación del modelo.

A mis sinodales **Dr. Jorge Zazueta** por sus valiosas observaciones al documento final y al **Dr. Leonardo Tenorio** por su disposición y opiniones económicas tan útiles para la realización de este trabajo.

Al **Dr. Joss Sánchez** por todo el apoyo brindado para la elaboración del documento, gracias por su tiempo.

A todos mis profesores doctores de la maestría de los cuales me llevo una parte de sus amplios conocimientos y que tuvieron a bien compartirlo día con día en sus clases.

William Olvera, Pedro González, Leobardo Plata, Joss Sánchez, Leonardo Tenorio, Jaime Lara, Armando García, Elvio Accinelli.

A Gabriela de la Rosa, por todo su apoyo en los trámites administrativos de la maestría.

A todo el personal administrativo de la Facultad de Economía, por su apoyo en las condiciones adecuadas de los salones.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROBLEMÁTICA DEL AGUA Y LOS ACUÍFEROS EN MÉXICO	4
2.1. Ciclo Hidrológico en México	4
2.2. Acuíferos en México	5
2.3. Los acuíferos en San Luis Potosí	7
2.4. Acuífero de San Luis Potosí	9
2.4.1. Características Generales	10
2.4.2. Cuenca Superficial	10
2.4.3. Hidrología Subterránea	11
2.4.4. Disponibilidad media anual de agua	12
2.5. Marco legal del uso del agua	14
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1. Bases teóricas	17
3.2. Modelo de control óptimo	19
3.3. Modelo econométrico previo auxiliar	23
4. FUENTES DE INFORMACIÓN	26
4.1. Información de la ENIGH 2014	26
4.1.1. Características de las Viviendas	27
4.1.2. Consumo de Agua	29
4.1.3. Ingreso de las Viviendas	30
4.2. Información de otras fuentes	30
4.2.1. Energía Eléctrica	31
4.2.2. Precipitación Pluvial y Temperatura	31
4.3. Información de INTERAPAS	31
5. APLICACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO	33
5.1. Estimación de la demanda	33
5.2. Estimación de la función de costos	35
5.3. Aplicación al modelo de gestión óptima	36
5.3.1. Solución Interior	38
5.3.2. Solución esquina con $x^* = 0$	41
5.3.3. Solución esquina con $x^* = \bar{x}$	43
6. CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS	45
APPENDICES	
A.. Abreviaturas	47
B.. Glosario	47
C.. Variables de la ENIGH 2014	53

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Alrededor de todo el mundo los acuíferos representan una fuente importante del recurso vital para poder abastecer las actividades productivas de las poblaciones y proveer de agua a las ciudades. La escasez del agua en los acuíferos derivado de su sobreexplotación es un problema generalizado, algunos de los aspectos que influyen para esta sobreexplotación es la ubicación del acuífero, el volúmen de consumo del recurso por parte de los pobladores, el marco legal que se encuentre establecido, los recursos necesarios para su extracción como lo es el precio de la energía eléctrica, la tecnología empleada, entre otros.

Diversas instituciones incluido el gobierno federal y estatal a través de los organismos encargados de la gestión y administración del agua han desarrollado diferentes estudios para evitar su sobreexplotación (IMTA, 2017). Dentro de los estudios de agotamiento de los recursos naturales, se han llevado a cabo diversas investigaciones que consideran herramientas y metodologías para determinar el punto o nivel óptimo para la explotación de los recursos, se enfocan al agotamiento del recurso y no consideran el aspecto económico (Sitender & Rajeshwari, 2015). En otros países han desarrollado modelos de gestión de la administración de agua, que involucran la demanda de la misma, los costos de extracción y el valor del dinero a través del tiempo (Roumasset & Wada, 2010).

Uno de los cuestionamientos que desde el punto de vista económico se pueden plantear, es la oferta y demanda del líquido vital, la infraestructura utilizada para su extracción y administración, el agotamiento de la fuente del recurso que es el acuífero y todo el marco legal que envuelve dicho proceso. La motivación de este trabajo es justo analizar si a través del modelo planteado se podrán abarcar algunos de estos aspectos mencionados.

El objetivo de esta tesis es aplicar un modelo de gestión óptima (Rubio, Martínez & Castro, 1993) que considera la maximización del beneficio social de la extracción de agua del acuífero de San Luis Potosí. En este trabajo se explica una metodología que no es usada frecuentemente para obtener un nivel óptimo de un acuífero, es decir, con optimización dinámica empleando teoría de control. Se considera la demanda de agua de los pobladores y los costos de extracción empleando datos obtenidos de la ENIGH e INTERAPAS. Las curvas de demanda y costos son estimadas a través de metodologías econométricas. El modelo es aplicado a un caso empírico y donde los resultados obtenidos muestran que el nivel óptimo más estable del acuífero es el nivel mínimo del acuífero, la dinámica del precio indica que el precio tiende a subir a medida que la reserva va disminuyendo, siendo una

solución esquina ya no sale de ese punto estable.

La estructura de esta tesis se encuentra de la siguiente forma. En el segundo capítulo se describen las condiciones bajo las cuales se encuentran los acuíferos en México, se detallan las características en cuanto a su tamaño, capacidad, ubicación geográfica y problemática del acuífero de San Luis Potosí (CONAGUA, 2018) sobre del cual se centra esta tesis. Se expone el marco legal (Gob. Edo. S.L.P, 2016) bajo el cual se sustenta el uso y aprovechamiento de agua en México y San Luis Potosí, asimismo algunos de los factores que han favorecido la problemática de la sobreexplotación de los acuíferos en México.

En el tercer capítulo se presenta el marco teórico en el que se basa este trabajo donde se comentan algunos trabajos previos o relativos a la optimización dinámica (Cabrera-Estupiñán & Dilla-Salvador, 2011) para gestionar recursos naturales (Casparri, García Fronti, & Ana Silvia, 2016), (Roumasset & Wada, 2010), así como trabajos relativos a la estimación de la demanda de agua (CONAGUA, 2012), (García Salazar & J. Saturnino, 2008). Lo anterior da pauta para desarrollar el modelo de gestión óptima del acuífero. Se explican los componentes del modelo para llevar a cabo la maximización del beneficio social que se puede obtener del acuífero para el aprovechamiento del agua, se explica el modelo de apoyo econométrico utilizado para estimar la demanda de agua y la curva de costos de extracción del agua necesario para alimentar el modelo de gestión óptima y finalmente se presentan las diferentes soluciones a las que se llega a través de esta herramienta.

En el cuarto capítulo se presentan las fuentes de información empírica, por una lado las de la encuesta del INEGI llamada ENIGH la cual sirvió de base para obtener la información relativa al consumo de agua y el nivel de ingresos y así determinar la curva de demanda; adicionalmente se describen las características de la muestra tomada de los consumidores como lo es el nivel de estudios, la frecuencia de dotación de agua, entre otros. Por otro lado, respecto a la información de los costos de extracción para poder proveer el servicio se tomaron de los informes anuales del organismo que opera el servicio de agua en San Luis Potosí, que en este caso es INTERAPAS.

En el quinto capítulo se presenta la aplicación al modelo de gestión óptima del acuífero de San Luis Potosí donde se emplea la metodología propuesta del modelo de gestión óptima con las curvas de demanda y de costos obtenida a partir de la información de la ENIGH y de INTERAPAS. Se obtienen los resultados que propone el modelo que en este caso, es encontrar el punto óptimo en el nivel mínimo, el máximo de su capacidad y una solución intermedia del nivel que puede alcanzar el acuífero.

En el sexto capítulo, se presentan las conclusiones de los resultados a los que se llega una vez aplicado el modelo considerando las condiciones en las que se encuentra actualmente el acuífero de San Luis Potosí, asimismo algunas recomendaciones para continuar con el estudio y desarrollo de este tipo de modelos que

proponen soluciones económicas alternativas a problemas de optimización de los recursos naturales.

CAPÍTULO 2

PROBLEMÁTICA DEL AGUA Y LOS ACUÍFEROS EN MÉXICO

Los acuíferos o aguas subterráneas son recursos renovables en virtud de que cuentan con una tasa de reposición o recarga con la cual se puede medir el grado de explotación sostenible y así evitar la extinción del recurso. Para mantener el recurso es importante conocer las condiciones físicas en las que se encuentran los acuíferos, así como el marco legal que regula su extracción.

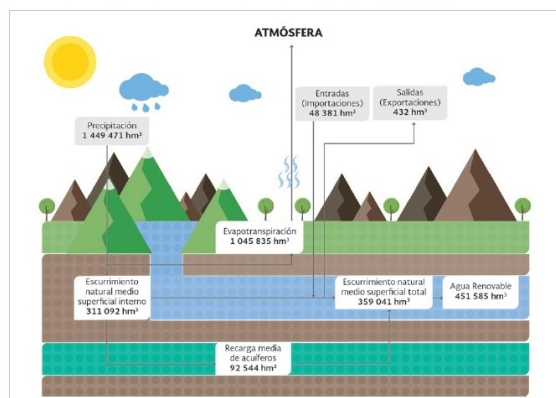
En el presente capítulo se describen las condiciones, características y situación que guardan los acuíferos en México y de forma más detallada el de San Luis Potosí objeto de nuestro estudio.

2.1. Ciclo Hidrológico en México

Para la supervivencia del ser humano el agua es un elemento vital, el cual es generado a través de un ciclo natural llamado ciclo hidrológico. Dicho ciclo representa los cambios de estado que sufre el agua dentro de nuestro planeta de acuerdo a las condiciones del entorno climatológico de cada país, región, zona.

En la siguiente figura se muestra el ciclo hidrológico en México, donde se puede apreciar el proceso desde que se presentan las lluvias hasta que vuelve el agua a las nubes a través de la evapotranspiración, evidentemente la forma en que se recargan los acuíferos. El 6.4% aproximadamente de las precipitación total representa la recarga medi de los acuíferos en México.

Figura 2.1. Valores medio anuales del ciclo hidrológico de México, 2017



Fuente: CONAGUA Estadísticas del Agua en México, 2018

Se aprecia que anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. En términos relativos el 72.1 % se evapotranspira, el 21.4 % escurre por los ríos o arroyos y el 6.4 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

2.2. Acuíferos en México

Para poder llevar a cabo la gestión del agua en México se le ha encargado dicha función a la CONAGUA la cual ha dividido al país en 13 regiones hidrológicas administrativas. En el caso de San Luis Potosí pertenece a la región VII Cuencas centrales del norte y particularmente Ciudad Valles a la IX Golfo Norte. Asimismo se ha dividido a la República Mexicana en 653 unidades administrativas llamadas acuíferos.

En la siguiente figura se muestran las regiones hidrológicas y la ubicación geográfica de los acuíferos.

Figura 2.2. Delimitación de acuíferos en México

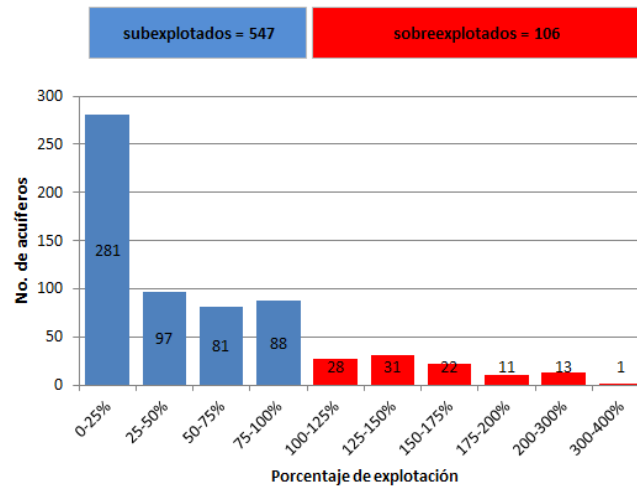


Fuente: CONAGUA, Estadísticas del Agua en México, 2018

Los acuíferos son la única fuente de abastecimiento de zonas áridas y semiáridas en nuestro país, que es el caso de San Luis Potosí y representan aproximadamente el 50 % del territorio nacional. Del total de la superficie regada en el país los acuíferos soportan más de la tercera parte y abastecen aproximadamente el 75 % del volumen utilizado en las ciudades. Dentro de la problemática que presentan es la sobreexplotación, contaminación, incremento del precio de la energía eléctrica para extraer el agua, entre otros. Las consecuencias de estos hechos implican el deterioro de los mismos.

En la siguiente figura se muestra el nivel de sobreexplotación de los 653 acuíferos en México. El grado es obtenido como la división de la cantidad extraída de agua entre el nivel de recarga que tiene el acuífero de forma anual, si el resultado de dicha división es mayor o igual al 100 % se considera sobreexplotado.

Gráfica 2.1. Grado de explotación de los acuíferos.



Fuente: IMTA, Manejo de la recarga de acuíferos, 2017

Por la situación antes mencionada el Gobierno Federal ha establecido entre otras, estas estrategias dentro del Plan Nacional de Desarrollo del Programa Hídrico 2013-2018¹:

- Actualizar la disponibilidad de aguas subterráneas
- Ajustar las concesiones y asignaciones a la oferta y disponibilidad real de agua y a las prioridades nacionales
- Actualizar decretos de veda, reserva y zonas reglamentadas
- Ordenar la explotación
- Acciones para incrementar la recarga de acuíferos
- Mejorar la calidad del agua en cuencas y acuíferos
- Verificar sistemas de medición de los volúmenes concesionados

Al respecto de cada uno de estos puntos se puede comentar de manera general, que existen metodologías implementadas por el Gobierno Federal para medir el agua disponible y así otorgar las concesiones.

¹El Plan Hídrico 2019-2024 se encuentra en consulta pública.

2.3. Los acuíferos en San Luis Potosí

Una vez que se ha observado la problemática en los acuíferos a nivel nacional se expondrá la situación de nuestro estado San Luis Potosí. Actualmente cuenta con 19 acuíferos y en el siguiente cuadro se muestra la disponibilidad de agua de cada uno de ellos.

Cuadro 2.1. Disponibilidad media anual de agua subterránea de los acuíferos de San Luis Potosí (millones de m³ anuales)

Nombre del acuífero	DMA	DNC	R	VCAS	Región
2411 San Luis Potosí	(76.4215)	-	78.1	154.5205	Centro
2402 El Barril	(65.5290)	-	31.6	88.5693	Altiplano
2408 Villa de Arista	(55.8843)	-	48.2	103.3164	Altiplano
2413 Matehuala - Huizache	(39.1294)	-	31.5	48.1336	Altiplano
2403 Salinas de Hidalgo	(32.5006)	-	16.7	27.4647	Altiplano
2417 Santa María del Río	(21.5930)	-	3.7	17.9748	Centro
2405 Aqualulco	(6.7555)	-	10.9	17.6555	Centro
2401 Vanegas - Catorce	(6.2174)	-	29.3	30.3498	Altiplano
2407 Cedral - Matehuala	(3.3532)	1.3	17.5	19.5492	Altiplano
2412 Jaral de Berrios - Villa de Reyes	0.9617	1.3	132.1	129.5236	Centro
2404 Santo Domingo	1.7116	-	21.4	13.8191	Altiplano
2406 Villa de Arriaga	2.2128	-	4.8	1.0846	Centro
2410 Buenavista	3.2977	-	27.1	18.5326	Zona Media
2414 Cerritos - Villa Juárez	5.7444	50.4	72.7	15.8754	Zona Media
2416 San Nicolás Tolentino	7.6398	18.6	32.9	5.6312	Zona Media
2409 Villa Hidalgo	10.4486	-	20.6	7.9864	Altiplano
2419 Tamuín	67.3462	290.2	370.1	6.2694	Huasteca
2415 Río Verde	68.8431	251.4	415.8	92.0308	Zona Media
2418 Huasteca Potosina	91.0203	541.5	668.2	26.2837	Huasteca

Fuente: CONAGUA 2019

donde:

DMA: disponibilidad media anual de agua subterránea.

DNC: descarga natural comprometida.

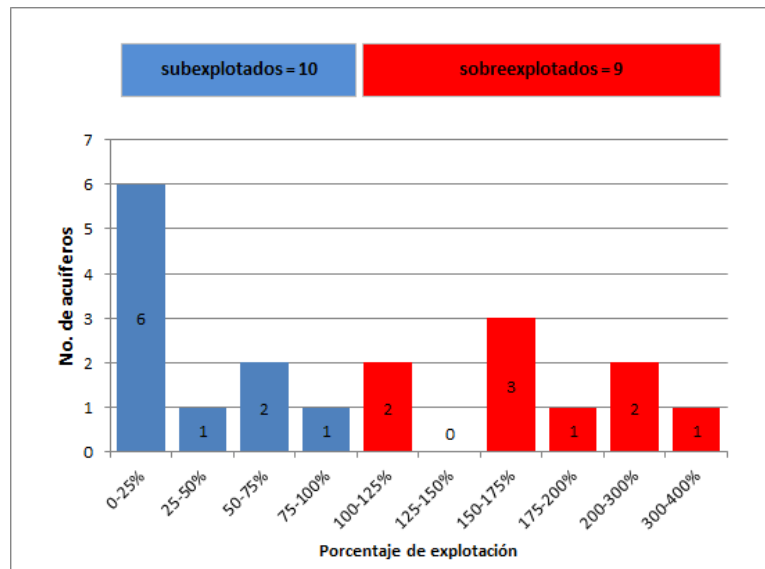
R: recarga total media anual.

VCAS: volúmen concesionado de agua subterránea, registrado en el REPDA.

Como se puede observar existen algunos acuíferos que se encuentran en déficit. Se puede observar que los que pertenecen a la huasteca potosina o cercanos a la misma son los que menor grado de explotación tienen ya que por la climatología en esa región llueve con más frecuencia.

A continuación se muestra el gráfico de los porcentajes que tienen sobreexplotación en el Estado de San Luis Potosí.

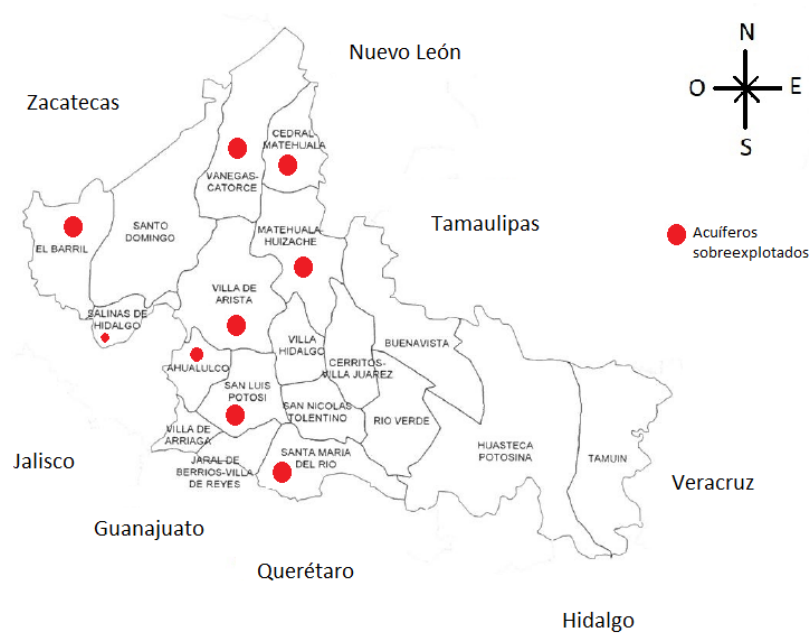
Gráfica 2.2. Grado de explotación de los acuíferos del Estado de San Luis Potosí



Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA

Asimismo, en la siguiente figura se muestra la distribución geográfica de los acuíferos sobreexplotados, que como se puede observar se encuentran mas cercanos al centro del país.

Figura 2.3. Ubicación geográfica de acuíferos sobreexplotados en San Luis Potosí



Fuente: Elaboración propia con datos de CEA, 2016

Teniendo ahora un panorama general de la situación crítica que guardan los acuíferos de San Luis Potosí, el presente trabajo se centrará solamente en el acuífero de San Luis Potosí, en la siguiente sección se detallan las características del mismo.

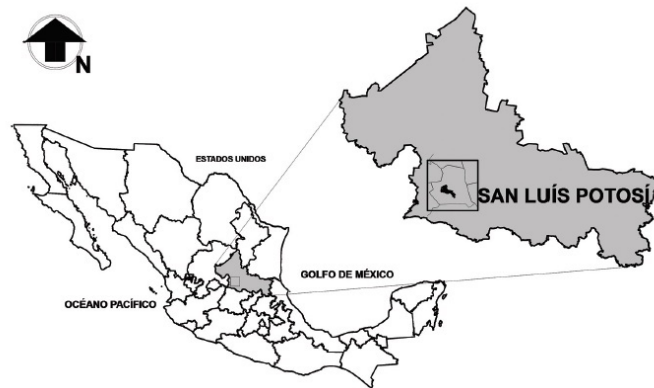
2.4. Acuífero de San Luis Potosí

Hay una cantidad importante de estudios técnicos a cerca de las condiciones de los acuíferos en México avalados o realizados por diferentes instituciones como la CONAGUA, IMTA, Colegio de San Luis, entre otros. Para el presente trabajo se analizará la información del acuífero de San Luis Potosí que provee el agua a la mancha urbana de San Luis Potosí capital y comprende parte del municipio de Soledad de Graciano Sánchez, así como del municipio de Cerro de San Pedro.

Las especificaciones del acuífero de San Luis Potosí se encuentran en diversos estudios, en el Acuerdo emitido por el Gobierno del Estado de San Luis Potosí del año 2010 (SEMARNAT, 2010) y en la Actualización de disponibilidad media de agua del año 2018 (CONAGUA, 2018), entre otros.

En la siguiente figura se muestra la localización geográfica del acuífero de San Luis Potosí.

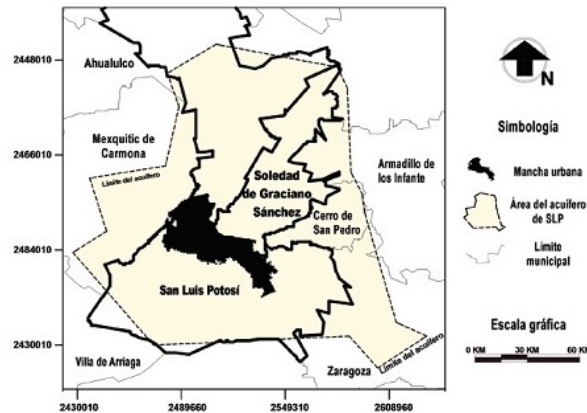
Figura 2.4. Ubicación geográfica del acuífero de San Luis Potosí



Fuente: IMTA, Manejo de la recarga de acuíferos, 2017

En la siguiente figura se muestra con más detalle el área geográfica donde se ubica el acuífero de San Luis Potosí, se puede observar que tiene su mayor extensión sobre los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona y Cerro de San Pedro.

Figura 2.5. Municipios que abarca el acuífero de San Luis Potosí



Fuente: IMTA, Manejo de la recarga de acuíferos, 2017

Para tener una idea general de las condiciones en las que se encuentra el acuífero en cuestión se detallarán las características principales de la hidrología subterránea y superficial.

2.4.1. Características Generales

Ubicación: parte sur-occidental del Estado de San Luis Potosí

Area aproximada: 2,061 km^2

Clima: Seco, semicálido

Temperatura media anual: 17.5° celsius

Precipitación media anual: 400 mm anuales

Evaporación media anual: 2038.7 mm

Población: 2,717,820 habitantes (2015, INEGI), la mayor parte de la población se encuentra sobre el acuífero, la población ha crecido de forma extraordinaria desde 1950 por el desarrollo económico que se ha presentado en el estado, en el cual se genera aproximadamente el 70 % del PIB del estado.

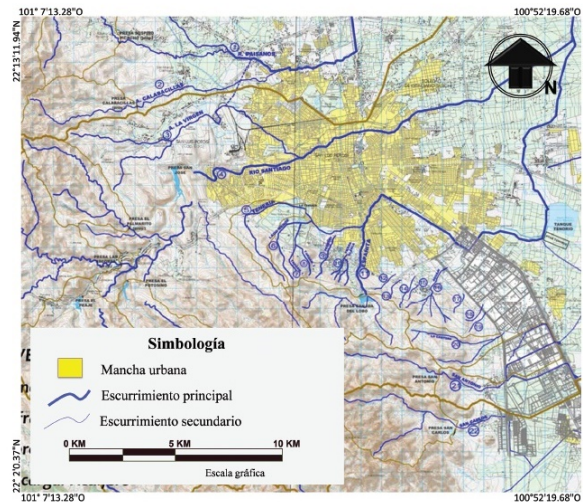
Región Hidrológico Administrativa: VII Cuencas Centrales del Norte

2.4.2. Cuenca Superficial

La cuenca superficial en el valle de San Luis Potosí es endorreica es decir, no tiene salida hacia el océano, cuenta con un área de 1,980 km^2 , pertenece a la Región Hidrológica Número 37, denominada El Salado. La planicie en esta zona tiene una altura promedio entre 1,850 a 1,900 msnm y está limitada en el oeste por la sierra de San Miguelito (altura 2,780 msnm) y en el este por la sierra de Álvarez (altura 2,300 msnm). Al norte, el límite se ubica sobre la sierra de la Melada y al sur sobre la sierra de San Miguelito y la planicie Jaral de Berrios-Villa de Reyes.

En la siguiente figura se muestran los escurrimientos principales y secundarios que pertenecen a la cuenca superficial del acuífero de San Luis Potosí, que como se puede observar provienen principalmente de los cerros que rodean la ciudad.

Figura 2.6. Cuenca superficial del acuífero de San Luis Potosí



Fuente: IMTA, La gestión de los recursos hídricos, 2018

2.4.3. Hidrología Subterránea

Ubicación: se localiza en la parte suroeste del estado de San Luis Potosí y comprende parcialmente los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza.

Acuíferos: se ha identificado la presencia de tres acuíferos principales somero, profundo en medio granular y profundo en medio fracturado, separados por una capa de arena fina compacta.

- Somero: es de tipo freático-libre, de extensión limitada, con cargas hidráulicas entre 1,815 y 1,880 m, está constituido por material aluvial y la profundidad al nivel freático se ubica de 5 a 30 m bajo la superficie del terreno. Este acuífero está colgado sobre la capa de arena fina compacta (estrato de baja conductividad hidráulica); su recarga proviene de la lluvia, así como de infiltración de retornos de riego y ocasionalmente por la fuga de agua potable y drenaje.
- Profundo en medio granular: se ha constituido en varias unidades litológicas, como materiales granulares de diferentes orígenes, tales como piroclastos, gravas, arenas y arcillas; ha sido explotado tradicionalmente en sus primeros 200 a 300 m, es decir, por medio de perforaciones que han llegado a alcanzar 300 a 400 m de profundidad.

- El acuífero profundo en medio fracturado: se ha constituido en el estrato en medio fracturado, integrado por los dos miembros de la riolita Panalillo y podría llegar a tener espesores de 2,000 m.

Recarga Natural Directa: Es la porción de agua de lluvia que se infiltra al acuífero en términos de cantidad de agua y es muy poca.

Recarga Natural Indirecta: Incluye la recarga conocida como Recarga de Fuente de Montaña, a partir de la precipitación y del escurrimiento que se genera con la recarga natural directa, se tienen identificadas tres zonas de recarga: (i) Inmediaciones de la sierra de San Miguelito y la planicie o zona de pie de monte, así como la zona entre la sierra de San Pedro y la planicie. (ii) Zonas de inundación producidas en la planicie, fuera de la zona metropolitana, por el escurrimiento urbano. (iii) Altiplano de la Sierra de San Miguelito.

Recarga Inducida: Recarga artificial no planeada, relacionada con la urbanización de la zona metropolitana existente dentro del acuífero, se lleva a cabo a lo largo de todo el año y se origina por:

- Fugas de los sistemas de saneamiento.
- Fugas en los sistemas de distribución de agua potable.
- Infiltración a partir de canales y cuerpos de agua que conducen y almacenan las aguas residuales.
- Retornos de riego en zonas donde se irriga con aguas residuales.
- Retornos de riego en zonas donde se irriga con agua subterránea.
- Retornos de riego en jardines y parques.

Coefficiente de Retornos de Riego: Es de 5,920 miles de m^3 por año, lo que representa respecto a la extracción del 2014 de 98,650 miles de m^3 un 6%.

2.4.4. Disponibilidad media anual de agua

La información anteriormente presentada proporciona de forma explícita las características físicas del acuífero de San Luis Potosí, sin embargo, es no menos importante especificar las condiciones en las que se encuentra el acuífero respecto al agua que es extraída del mismo para el aprovechamiento de la población.

En la siguiente figura se muestra la disponibilidad media de agua del acuífero, donde se puede observar el déficit que presenta por la sobreexplotación.

*Cuadro 2.2. Disponibilidad media anual de agua subterránea
(millones de m^3 anuales)*

R	DNC	VCAS (REPGA)	VEALA	VAPTYR	VAPRH	DMA
78.1	-	154.52	0.001040	0	0	(76.4)

donde:

R: recarga total media anual.

DNC: descarga natural comprometida.

VCAS: volúmen concesionado de agua subterránea, registrado en el REPDA.

VEALA: volúmen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente.

VAPTYR: volúmen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA.

VAPRH: volúmen de agua correspondientes a reservas, reglamentos y programación hídrica.

DMA: disponibilidad media anual de agua subterránea.

Se puede observar que la disponibilidad media anual de agua considera varios componentes, uno de ellos es la recarga total media, que es toda el agua que llega al acuífero de forma natural a través de la lluvia y que pasa el ciclo hidrológico anteriormente mostrado, el cual es de 78.1 mill. de m^3 . La descarga natural comprometida es una fracción de la descarga natural que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a una unidad hidrogeológica, la cual es cero. El VCAS, son todas las concesiones que se registran en el REPDA y que están basadas en estudios técnicos para poder solicitar el volúmen que se desea extraer, el cual es analizado y autorizado por la CONAGUA y debe cumplir las especificaciones que marca la reglamentación para no afectar el ecosistema o contaminar la fuente del recurso, en este caso es de 154.52 mill. de m^3 , cantidad mucho mayor que la recarga natural, sólo con esos dos datos es evidente que el acuífero ya no se encuentra en condiciones de permitir más extracción de agua. Como consecuencia, el nivel del agua del acuífero profundo descende de 1 a 4 m/año y las perforaciones de nuevos pozos se hacen a una profundidad de 700 m con altos costos de inversión, mantenimiento y operación principalmente para el pago de energía eléctrica.

El cuestionamiento que se puede plantear observando el déficit que presenta el acuífero es ¿cómo es que se ha llegado a esa condición de sobreexplotación?. El agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo y supervivencia de un país. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos declara que el agua es de libre alumbramiento, sin embargo, la CONAGUA ha establecido en el 2013 la suspensión de esta condición derivado del incremento tan acelerado de la población, la tecnología, el desarrollo económico, entre otros. Dicha suspensión tiene su fundamento en mejorar la sustentabilidad hídrica de los acuíferos, para lo cual la CONAGUA ha establecido una serie de reglamentaciones que apoyan el cuidado del recurso.

Aunado a lo anterior, dentro de las causas que CONAGUA explica de la sobreexplotación de los acuíferos al norte del país es que, el clima afecta la disponibili-

dad del recurso, pero en la última década, un grupo de agricultores con capacidad económica importante se expandieron al norte del país construyendo de forma incontrolada pozos para su actividad económica y eso incrementó considerablemente la situación de los acuíferos sobreexplotados.

En la siguiente figura se muestran los principales usos respecto a la actividad económica en cifras relativas. Se observa que el acuífero abastece mayormente a la ciudadanía en general.

Cuadro 2.3. Usos del agua del acuífero de San Luis Potosí

Usos del agua	%
Público Urbano	66%
Agrícola	20%
Industrial	8%
Servicios	5%
Pecuario	1%
	100%

Fuente: CONAGUA, Actualización de la DMA de SLP(2411), 2018

2.5. Marco legal del uso del agua

La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece el marco a través del cual se administrarán los recursos naturales; por lo que en base a los artículos 27, 115 y 124 de la misma se fundamenta la regulación de las aguas, la jurisdicción estatal, y expide las bases para la prestación del servicio público de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales.

De los lineamientos anteriores se deriva la Ley de Aguas Nacionales y para el caso que nos compete la Ley de Aguas de San Luis Potosí, donde se manifiesta explícitamente la escasez del agua, su desperdicio y falta de conciencia por parte de la población para cuidarla de forma eficiente. Asimismo la amenaza constante de cada vez más prescindir de dicho elemento vital para las futuras generaciones.

Dentro de los aspectos que abarca dicha Ley se encuentra:

- Planeación de su uso, explotación y aprovechamiento.
- Prevenir su contaminación.
- Identifica a las instituciones públicas que administran el agua, así como sus responsabilidades (CEA, CONAGUA).
- Norma la política hidráulica.
- Establece las bases para la prestación del servicio, tarifas, así como derechos y obligaciones de los usuarios.

- Establece la cultura del agua.

Dicho marco legal establece a detalle las políticas, normas y reglamentos que se deben seguir y llevar a cabo para preservar el vital líquido; las anteriores políticas también consideran los acuíferos, cuando una persona física o moral solicita la explotación de un acuífero, se le solicitan, mapas, dimensiones, uso para el cual va a ser aprovechado el acuífero, entre otros; una vez que se hace el trámite, la CONAGUA o el CEA tiene la autoridad de evaluar la solicitud y entonces delibera en base a la disponibilidad media de agua de la zona a la que pertenece el acuífero en cuestión y determina si se otorga o no el permiso.

Dentro del marco legal se considera la determinación de las tarifas que se cobran a la población. El Decreto 594 establece la metodología para el cálculo de cuotas y tarifas para los Servicios Públicos de Agua Potable, Drenaje, Alcantarillado, Tratamiento y Disposición de sus Aguas Residuales en el estado de San Luis Potosí con fecha 14 de septiembre de 2006, dentro de la cual son considerados los costos de producción la energía eléctrica uno de ellos, gastos de operación, el incremento en el INPC que a su vez impacta en los sueldos y prestaciones, depreciaciones, inversiones en la infraestructura para su extracción, costos financieros y la cantidad de agua entregada, es decir la demanda.

Asimismo el Decreto 409 Ley de Cuotas y Tarifas para la Prestación de Servicios Públicos del Organismo Operador INTERAPAS con fecha 28 de diciembre de 2013, establece la tarifa que considera los aspectos mencionados en el Decreto 594 y también las cuotas por clasificación de zonas, popular, económica y residencial; cuota fija como servicio medido.

En el presente trabajo, son consideradas las cuotas establecidas en el Decreto 594 antes mencionado para llevar a cabo el cálculo del monto pagado por el servicio de agua.

El marco legal en cualquier país es sumamente importante para garantizar el vital líquido a los ciudadanos, existen algunos aspectos primordiales en los que influye directamente el gobierno dentro de la regulación del agua, a continuación se mencionan algunos de ellos:

- Afecta directamente al consumidor final con la determinación de las tarifas, las cuales incentivan en determinado momento el cuidado o desperdicio del agua. La determinación de las mismas deben estar actualizadas según las condiciones de la población en cuanto a la demanda se refiere y por otro lado, vigilar y procurar el buen estado del acuífero que es la oferta con la que se cuenta.
- Aunado a lo anterior las entidades gubernamentales se encuentran con la gran responsabilidad de proveer a las clases sociales más desprotegidas el recurso.

- Administrar adecuadamente las concesiones nuevas o de renovación de los derechos de agua de un pozo, los cuales pueden pertenecer a agricultores, a empresas productivas, a particulares, a las entidades proveedoras de agua.

En el presente capítulo se ha descrito las condiciones físicas, las características y problemática que existe en el acuífero de San Luis Potosí, el cual provee a San Luis Potosí capital y algunas porciones de municipios aledaños como se mostró en la Figura x. Dichas características sirven para visualizar y establecer las variables que son utilizadas para alimentar el modelo de optimización objeto de este trabajo.

CAPÍTULO 3

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se expone el marco teórico a partir del cual surge la iniciativa de llevar a cabo la aplicación de un modelo de optimización dinámica para proponer una solución económica en la obtención de un punto óptimo de extracción de agua.

Se parte de la teoría relacionada a la herramienta de teoría de control para la resolución de problemas de optimización de recursos naturales. Asimismo la teoría relativa al establecimiento de la función de demanda de agua.

Posteriormente se desarrolla el modelo de control óptimo donde se maximiza la diferencia del beneficio social, es decir la diferencia entre la curva del precio de la demanda y el costo marginal de extracción que por ser un bien común el valor es determinado como cero y es afectado a su vez por el factor de descuento para considerar pesos reales y también se presenta el modelo econométrico auxiliar que es utilizado para estimar la demanda de agua y la curva de costos.

3.1. Bases teóricas

Se han desarrollado diversos estudios técnicos donde indican los niveles de agua a los que puede llegar un acuífero en determinado tiempo, sin embargo, dichos análisis se han realizado desde el punto de vista técnico, es decir, analizando las condiciones estrictamente físicas del acuífero y que arrojan el tiempo estimado de la extinción del recurso natural, la composición del agua y la calidad de la misma. Implícitamente dentro de la explotación de un acuífero se encuentra el factor demanda de agua, al respecto hay bastantes documentos que estudian y/o estiman la demanda de agua con métodos clásicos econométricos, adicional a este componente, también se ha estudiado conjuntamente o de forma individual la estructura de la tarificación del agua vigente. En función de los tópicos anteriormente mencionados y que son base para iniciar el desarrollo de este trabajo, se consultaron una serie de documentos, los cuales se mencionan a continuación:

Caracterización hidrogeológica de los acuíferos de Aspe y la Horna, tesis doctoral de la Universidad de Alicante publicada en 2016, donde presenta la definición y actualización del estado en el que se encuentran los mencionados acuíferos y características de sus aguas para realizar una correcta gestión del acuífero.

Manejo y recarga de los acuíferos, publicado por el IMTA publicada en 2017, donde describe las condiciones físicas de varios acuíferos dentro de la República Mexicana y sugiere aplicar las técnicas del Manejo de Recarga de Acuíferos (MAR,

Managed Acuífer Recharge), describiendo ejemplos de acuíferos en México y el mundo.

Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model, publicado por la revista Agricultural Systems de Elsevier en 1999, donde el modelo de optimización lineal está diseñado para servir como una herramienta de toma de decisiones para los planificadores de la producción agrícola a nivel distrital y nacional. Las soluciones de salida proporcionan la combinación óptima de actividades que consumen agua para maximizar el ingreso neto de la producción agrícola de los distritos y las demandas de agua a diferentes precios.

Modelo de administración de acuífero: MADA, emitido por el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de Cuba en 2011, a través de un modelo de programación lineal y revisando la cantidad extraída de agua de los acuíferos propone una solución para evitar la intrusión salina y satisfacer la demanda de agua de acuerdo a la recarga del acuífero.

En 1982 la revista Western Journal of Agricultural Economics de la Universidad de California publicó el artículo: *The use and potencial of optimal control models in agricultural economics*, escrito por David Zilverman en el cual se expone la metodología de optimización a través de la teoría de control y hace mención que para alimentar al modelo es necesario una infraestructura avanzada en cuanto a bases de datos se refiere ya que al momento no se tenía, pero que con el paso del tiempo, la tecnología iría avanzando y se podría aplicar este tipo de modelos a problemas reales arrojando una importante herramienta de predicción de la realidad considerando distribución y equidad.

Otro documento que también considera optimización dinámica empleando teoría de control es el de *Optimal and sustainable groundwater extraction* emitido en la revista *Sustainability* por la Universidad de Hawaii en 2010, donde la función objetivo incluye adicional a la función de costos, un factor de desalinización, la recarga del acuífero la maneja como una función del nivel del mismo y llega a la conclusión que bajo ciertas circunstancias del modelo la solución óptima es el valor mínimo de capacidad del acuífero.

Abordando el tema de las tarifas, el documento *Propuesta de estructura tarifaria de agua potable para los organismos operadores de los servicios de agua y drenaje en la frontera México-EUA*, emitido por el Centro de Estudios del Agua y el Banco de Desarrollo de América del Norte, en el año de 2007, arroja un comparativo de tarifas considerando los costos en los que incurre cada uno de los organismos operadores de esa zona a través de una metodología que emplea índices y así realizar la comparación entre tarifas, concluye varios aspectos relacionados hacia la eficiencia técnica y comercial de los organismos operadores.

Dentro de los documentos que estiman la demanda de agua se encuentra el que realizó CONAGUA, *Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México* en el año 2012; la estimación la realizó en base a una muestra de más de 6,500 viviendas pertenecientes a las

localidades más pobladas del país y el objetivo dentro de los más relevantes era estimar curvas de demanda por clima, aunque también se comentaron otros factores que influyen en el consumo del agua como su precio y el ingreso del hogar.

El Colegio de Sonora publicó en 2008 el documento *Tarifas y consumo de agua en el sector residencial de la Comarca Lagunera* en el cual estima las funciones de demanda a través de modelos econométricos con el fin de establecer los factores que influyen en su demanda, así como el factor precio de la misma. Llega a la conclusión de que para reducir el consumo de agua se debe subir el precio a la energía eléctrica y de que el costo de operación cobrado a través de la tarifa está siendo alto.

Una vez revisada la literatura existente, se procedió a elegir el modelo base de esta tesis, el cual será desarrollado en la siguiente sección.

3.2. Modelo de control óptimo

Alrededor de todo el mundo se encuentra la preocupación generalizada de la adecuada optimización de los recursos naturales renovables, en virtud del crecimiento de la población, el desarrollo de la tecnología que hace que se llegue a consumir mayor volumen de agua, sin contar con todo el sector agrícola; asimismo la contaminación es un factor también determinante para establecer la óptima administración de los acuíferos.

Existen varias herramientas matemáticas para abordar este tipo de problemas, una de ellas es la optimización dinámica que emplea teoría de control óptimo y la cual establece un funcional a maximizar que involucra variables de control, es decir, las variables que pueden ser gestionadas por el administrador del recurso, asimismo contiene variables de estado, que son las que representan los niveles del recurso natural, en este caso puede ser un stock; las variables de control inciden en las variables de estado y la forma en que se relacionan las variables de control y de estado es a través de la restricción. Asimismo existen condiciones de transversalidad que son aquellas trayectorias o senderos que se deben cumplir de tal forma que se logre optimizar el modelo. Adicionalmente se tienen valores iniciales y finales de la variable de estado que es el horizonte a donde se tendrá que llegar optimizando todo el sistema considerando el tiempo, por eso es que es dinámico. Para algunos modelos de tipo económico también se considera un factor de descuento, con el fin de traer a valor presente las unidades monetarias, lo cual también es considerado en el presente trabajo.

Esta tesis utilizará como base un modelo de control óptimo (Rubio, Martínez, & Castro, 1993). Dicho modelo involucra la curva de demanda de agua, una curva de costos marginal de extracción y un factor de descuento. La diferencia de ambas curvas es considerado el beneficio neto social del acuífero y como es un bien común que afecta a toda una población, el valor de esta diferencia se considera como cero. Asimismo se contempla un factor de descuento para obtener el valor presente de

los montos expresados en pesos. Dicho problema es dinámico puesto que se quiere obtener el punto óptimo o estable de extracción de agua el cual implica que las decisiones de extracción en el presente implican para llegar a ese equilibrio en el futuro. A continuación se presenta el modelo.

Restricción dinámica: El crecimiento natural, es decir la recarga, tasa R está modelada como una constante y determinada exógenamente y x un escalar, la reserva de agua; entonces la restricción dinámica es $\dot{x} = R - (1 - \alpha)q$ donde q es la tasa de flujo de extracción y α es un coeficiente de flujo de retorno. La máxima capacidad de x es \bar{x} y su valor mínimo que es un valor compatible con la supervivencia del acuífero es \underline{x} .

Costos: El costo promedio y marginal del bombeo de agua está dada por $c(x)$ una función convexa, monótona decreciente y diferenciable de x . El costo marginal está acotado como sigue:

$$\lim_{x \rightarrow \bar{x}} c(x) \geq 0 \quad \lim_{x \rightarrow 0} c(x) < \infty \quad \lim_{x \rightarrow \bar{x}} c'(x) \geq 0 \quad \lim_{x \rightarrow 0} c'(x) < \infty$$

Se asume que el costo marginal puede ser tan grande como queramos pero finito, es decir,

$$\bar{x} \geq x \geq 0, \quad q \in [0, \infty)$$

Demanda: la preferencia de los consumidores está representada por una curva inversa de demanda $p(q)$ la cual es continuamente diferenciable. Se asume que la función es asintótica a los ejes.

Valor Presente de la Maximización: EL objetivo de la gestión de la administración es maximizar el valor presente del beneficio social neto el cual está definido como el excedente bruto del consumidor menos el costo total.

Por lo que el modelo queda como sigue:

$$\max_q \int_0^{\infty} e^{-rt} [p - c(x)] q dt \quad (3.1)$$

$$s.a. \quad \dot{x} = R - (1 - \alpha)q(p) \quad x(0) = x_0 > 0 \quad (3.2)$$

$$\bar{x} \geq x \geq 0, \quad q \in [0, \infty) \quad (3.3)$$

donde:

p : precio del agua

q : caudal de extracción, cantidad de agua extraída

$p(q)$: curva de demanda inversa, que es continuamente diferenciable y asintótica a los ejes, variable de control.

$q(p)$: función de demanda de agua

x : reserva de agua (nivel del acuífero), variable de estado.

x_0 : reserva inicial de agua

$c(x)$: función de costo marginal (diferenciable, convexa, monótona decreciente)

r : tasa de interés, tasa de descuento social
 R : tasa de crecimiento (recarga)
 α : coeficiente de flujo de retorno

Para resolver el problema se construye el Lagrangiano, definiendo:

$$F = e^{-rt} [p - c(x)] q$$

$$G = [p - c(x)] q$$

$$f = R - (1 - \alpha)q(p)$$

$$H = F + \lambda f \quad \text{pero } \lambda \text{ se redefine como } \bar{\lambda} = \lambda e^{rt} \quad \text{quedando como sigue el}$$

Hessiano a tiempo corriente:

$$\bar{H} = G + \bar{\lambda} f \quad \text{por lo tanto el Lagrangiano quedaría:}$$

$$L(x, q, \lambda, \eta_1, \eta_2) = \bar{H}(x, q, \lambda) + \eta_1(c_1 - g_1) + \eta_2(c_2 - g_2)$$

Por el supuesto de la función de demanda se evitan las soluciones esquina de $q = 0$ o ∞ , por lo tanto, se obtendrán las condiciones suficientes y de transversalidad.

$$L(x, q, \lambda, \eta_1, \eta_2) = [p - c(x)] q + \bar{\lambda} [R - (1 - \alpha)q] + \eta_1(\bar{x} - x) + \eta_2(0 - x)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} = p - c(x) - \bar{\lambda}(1 - \alpha) = 0 \quad \text{despejando } p \text{ se tiene:}$$

$$p = c(x) + \bar{\lambda}(1 - \alpha) \quad (3.4)$$

$$\dot{\bar{\lambda}} = -\frac{\partial L}{\partial x} = r\bar{\lambda} + c'(x)q + \eta_1 - \eta_2 \quad (3.5)$$

si $\dot{\bar{\lambda}} = 0$ se tiene:

$$\bar{\lambda} = \frac{-c'(x)q - \eta_1 + \eta_2}{r} \quad (3.6)$$

$$\dot{x} = -\frac{\partial L}{\partial \lambda} = R - (1 - \alpha)q \quad (3.7)$$

si $\dot{x} = 0$ se tiene $q = \frac{R}{1 - \alpha}$

$$\eta_1 \geq 0 \quad (= 0 \text{ si } \bar{x} > x) \quad (3.8)$$

$$\eta_2 \geq 0 \quad (= 0 \text{ si } x > 0) \quad (3.9)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \bar{\lambda}(t) \geq 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e^{-rt} \bar{\lambda}(t) x(t) \geq 0 \quad (3.10)$$

posteriormente se manejan las ecuaciones de p y $\dot{\bar{\lambda}}$ y obtenemos la siguiente expresión:

$$\dot{p} = r(p - c) + c'R + (1 - \alpha)(\eta_1 - \eta_2) \quad (3.11)$$

Si se considera una solución interior considerando los supuestos de transversalidad se tiene:

de $\dot{x} = 0$ se obtiene

$$R - (1 - \alpha)q(p) = 0 \quad (3.12)$$

de $\dot{p} = 0$ se tiene:

$$r(p - c) + c'R = 0 \quad (3.13)$$

como la primera ecuación no depende de x el estado estacionario de p resulta:

$$R = (1 - \alpha)q(p)$$

$q(p) = \frac{R}{(1-\alpha)}$ si se obtiene la función inversa

$$p(q) = p\left(\frac{R}{1-\alpha}\right)$$

$$\hat{p} = p\left(\frac{R}{1-\alpha}\right) \quad (3.14)$$

por otro lado, se puede derivar una función explícita para la isoclina del precio:

$$r(p - c) + c'R = 0$$

$$r(p - c) = -c'R$$

$$p = c - \frac{c'R}{r} \quad (3.15)$$

el cual da la condición de optimalidad que caracteriza el estado estacionario.

Esta condición nos indica que en el estado estacionario la renta es igual al efecto positivo de la recarga natural sobre el costo marginal de la extracción sobre la tasa de interés.

Por otro lado se tiene:

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{\dot{p}=0} = c' - \frac{R}{r}c'' < 0 \quad \forall x \in [0, \bar{x}]$$

De acuerdo a esto, habrá una solución en el intervalo $[0, \bar{x}]$ y será la única si:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left[c(x) - \frac{R}{r}c'(x) \right] > \hat{p} > \lim_{x \rightarrow \bar{x}} \left[c(x) - \frac{R}{r}c'(x) \right]$$

Para determinar su estabilidad se examinarán las raíces características:

Punto crítico $E = (\hat{p}, x^*)$, siendo x^* la solución a la ecuación.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{d\dot{p}}{dp} & \frac{d\dot{p}}{dx} \\ \frac{d\dot{x}}{dp} & \frac{d\dot{x}}{dx} \end{bmatrix}_{(\hat{p}, x^*)}$$

Valuando en el punto E se tiene:

$$J_E = \begin{bmatrix} r & -rc'(x^*) + c''(x^*)R \\ -(1-\alpha)q'(\hat{p}) & 0 \end{bmatrix}$$

obteniendo las raíces:

$$J_E = \begin{bmatrix} r - \lambda & -rc'(x^*) + c''(x^*)R \\ -(1 - \alpha)q'(\hat{p}) & -\lambda \end{bmatrix}$$

$$|J_E - \lambda I| = \lambda^2 - r\lambda + (1 - \alpha)q'(\hat{p}) [-rc'(x^*) + c''(x^*)R]$$

de aquí que:

$$\lambda_1 = \frac{r + \sqrt{r^2 - 4(1 - \alpha)q'(\hat{p})[-rc'(x^*) + c''(x^*)R]}}{2} > 0$$

$$\lambda_2 = \frac{r - \sqrt{r^2 - 4(1 - \alpha)q'(\hat{p})[-rc'(x^*) + c''(x^*)R]}}{2} < 0$$

El radical es positivo pero las raíces, una es positiva y otra negativa, por lo que implica que es un punto silla. Recordar que ésta es una solución interior.

3.3. Modelo econométrico previo auxiliar

Como se mencionó anteriormente, el modelo de optimización dinámica emplea para establecer el funcional dos curvas, la de demanda y la de costos. Se realizaron diferentes pruebas y se determinó la utilización en ambos casos del modelo de regresión lineal múltiple empleando el método de mínimos cuadrados ordinarios, de acuerdo a la teoría económica modelar la demanda de un producto resulta adecuado con el modelo log-log y es así como se modela la demanda de agua. Para la estimación de curva de costos el término constante que son los costos fijos se considera de forma independiente al modelo y se llevó a cabo la regresión para estimar los costos variables, uniendo el término de costos fijos más la regresión de costos variables es como se determina la función de costos A continuación se presenta el modelo:

$$y_i = x_{ij}\beta_j + \varepsilon_i$$

donde:

y_i variable dependiente, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, k$

x_{ij} variable independiente o variables explicativas, específicamente x_{1j} es una constante e $i = 1, 2, \dots, n$,

β_j parámetros, mide el cambio en y_i respecto a x_{ij} , manteniendo constantes todos los demás factores.

ε_i es el término de error, representa factores distintos a x_i que representan a y_i

Los supuestos del modelo son:

1. Existe una relación lineal entre y_i y x_{i1}

2. No multicolinealidad, es decir no existe una relación lineal entre las variables

independientes.
$$\sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{n,k} \lambda_j x_{ij} = 0$$

3. Exogeneidad de las variables independientes: $E(\varepsilon_i | x_1, x_2, \dots, x_k) = 0$, esto significa que para cualquier valor de las variables independientes el promedio de los errores es igual a cero.

4. Homoscedasticidad, cada error ε_i tiene la misma varianza y no está relacionada con ningún otro error.

5. Los errores se distribuyen normalmente.

Expresado de forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}_{n \times k} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}_{k \times 1} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}_{n \times 1}$$

$$Y = X\beta + \epsilon$$

Para poder estimar la función de regresión $\hat{y}_i = x_{i1}\hat{\beta}_1 + x_{i2}\hat{\beta}_2 + \dots + x_{ik}\hat{\beta}_k$ $\simeq \hat{Y} = X\hat{\beta}$ se empleará el método de mínimos cuadrados ordinarios que consiste en elegir las estimaciones de β_i que minimizan la suma de los residuales cuadrados,

$$\epsilon = Y - X\beta$$

$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = (Y - X\beta)(Y - X\beta)$ realizando las operaciones matriciales y optimizando

$$\min \left[\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \right] \Rightarrow \hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y, \text{ sustituyendo en } Y \text{ se tiene: } \hat{Y} = (X'X)^{-1}X'Y$$

donde la interpretación sería:

y_i variable explicada.

x_i variable independiente o variables explicativas, específicamente x_{1k} es una constante

β_1 el intercepto, el cual nos da el valor de y_i cuando el resto de las x_{ik} son iguales a cero.

β_i ($i = 2, \dots, n$) parámetros que miden el cambio en y respecto a x_{ik} , manteniendo constantes todos los demás factores.

Estimación de la demanda de agua

El modelo anterior es utilizado para estimar la demanda de agua y de acuerdo a la teoría microeconómica un modelo propio para describir la producción de un bien es el modelo log-log, donde se aplica logaritmo a una función exponencial como es el caso de la función Cobb-Douglas, aunque en nuestro caso existen tres variables que describen el consumo de agua en metros cúbicos. Asimismo, otra de las ventajas de este modelo es que los coeficientes β_i representan las elasticidades de cada una de las variables x_i respecto a la variable dependiente y .

El modelo que se empleará tiene la siguiente forma:

$$y = \beta_1 x_2^{\beta_2} x_3^{\beta_3} x_4^{\beta_4}$$

Al cual aplicando la función logaritmo quedaría como sigue:

$$\ln y = \beta_1 + \beta_2 \ln x_2 + \beta_3 \ln x_3 + \beta_4 \ln x_4 + u \quad (3.16)$$

Adicionalmente para corregir la heteroscedasticidad y la autocorrelación se emplearon datos robustos para realizar la regresión.

Estimación de los costos de extracción

Por otra parte para la estimación de los costos de extracción del agua, se considera el supuesto de que el costo total de producción de un bien depende de las cantidades producidas, donde dicha variable se puede expresar de forma lineal, al cuadrado y al cubo. En nuestra estimación como en muchos de los casos, se tiene un parte de costo fijo y otro variable, así que por simplicidad del modelo sólo se estimaron los costos variables, ya que el dato de los costos fijos se determinó analizando la información de INTERAPAS y se llegó al monto de \$298,724 miles de pesos. La estimación final queda con la siguiente estructura y al igual que la estimación anterior de la demanda de agua se aplicaron datos robustos.

$$y = \$298,724 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2^2 + u \quad (3.17)$$

Una vez que ya se realizó la presentación de los modelos empleados para la optimización del nivel óptimo de un acuífero, en el siguiente capítulo se detalla la información que alimenta a ambos modelos.

CAPÍTULO 4

FUENTES DE INFORMACIÓN

Dentro del INEGI existe una encuesta llamada ENIGH Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares, dentro de la encuesta que realizan, existe un apartado del último recibo de agua pagado, la información contenida en este apartado fue utilizada para obtener los metros cúbicos consumido por vivienda y se empleó la encuesta del 2014.

Por otro lado, dentro de la información anual que reporta INTERAPAS que es el Organismo Operador Intermunicipal Metropolitano de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Servicios Conexos de los Municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez encargado de administrar el servicio de agua extraída del acuífero de San Luis Potosí se obtuvieron los datos de los costos derivados de proporcionar dicho servicio.

A continuación se detallan cada uno de ellos.

4.1. Información de la ENIGH 2014

Para la estimación de la curva de demanda de agua es preciso obtener el consumo en metros cúbicos consumidos y el ingreso por cada familia. Para obtener dichas variables se utilizaron tres bases de datos: *Concentradohogar*, *Viviendas* y *Gastos Hogar*; se detallan las características descriptivas de la información obtenida, posteriormente la forma en que se estimó la cantidad de metros cúbicos consumidos por vivienda y finalmente se determina el ingreso por vivienda a considerar.

Bases de datos:

Concentradohogar: Este cuestionario contiene la información del último recibo pagado de la vivienda, entre los campos que obtuve de dicha base es estrato socioeconómico, clase de hogar, número de integrantes del hogar, ingreso corriente, entre otros.

Viviendas: Características de la vivienda como: tipo, si tiene cisterna, baño, fregadero, cisterna, bomba de agua, calentador, entre otros.

Gastos Hogar: Último recibo pagado, periodicidad, fecha, monto, gasto trimestral tanto de agua como de energía eléctrica.

El listado de variables completo se encuentra en el Apéndice Tabla de Variables de la ENIGH 2014.

Se hizo un *merge*¹ de las tres bases para organizar la información de acuerdo al folio de la vivienda, folio del hogar y ubicación geográfica, cabe mencionar que se consideró el folio vivienda finalmente ya que hay una correspondencia uno a uno de folio vivienda con folio hogar.

4.1.1. Características de las Viviendas

En el cuadro siguiente se muestran los siete municipios que son considerados para obtener la demanda de agua, los metros cúbicos consumidos y el precio pagado de agua en pesos de 2014. Entre San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez representan el 74 % del precio pagado y el 67 % de los m^3 consumidos, es decir, la mayor parte de la información.

Cuadro 4.1. Número de viviendas, consumo de m^3 y precio pagado por municipio

Municipio	No. de Viviendas	%	m^3	%	Precio Pagado de Agua	%
Ciudad Valles	20	10%	730	10%	\$ 3,708	7%
Matehuala	27	13%	859	12%	\$ 5,880	11%
San Luis Potosí	104	50%	3,769	51%	\$ 29,889	58%
Santa María del Río	10	5%	385	5%	\$ 963	2%
Soledad de Graciano Sánchez	33	16%	1,175	16%	\$ 8,154	16%
Tamazunchale	13	6%	425	6%	\$ 2,904	6%
Total	207	100%	7,344	100%	\$ 51,497	100%

Fuente: ENIGH 2014, Cifras en pesos de 2014

En el siguiente cuadro se muestra la dotación de agua con la que cuenta cada una de esas viviendas, se puede observar que el 90 % cuenta con el servicio de manera frecuente.

Cuadro 4.2. Porcentaje de viviendas de acuerdo a la dotación de agua

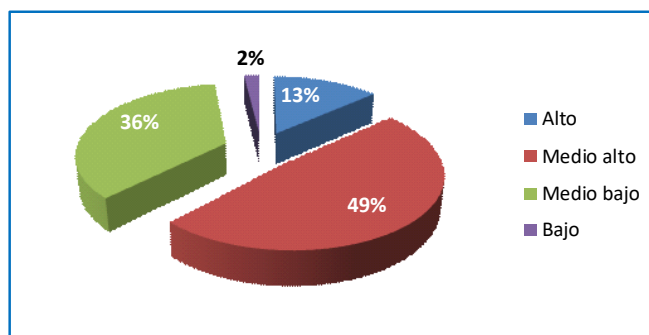
Dotación de Agua	No. De Viviendas	%
Diario	141	68.1%
Cada tercer día	45	21.7%
Dos veces por semana	12	5.8%
Una vez por semana	5	2.4%
De vez en cuando	3	1.4%
No disponible	1	0.5%
Total	207	100%

Fuente: ENIGH 2014

¹mezcla de bases de datos en función de un campo clave: folioviv, foliohog y ubi-ca_geo.

En el siguiente cuadro se muestra la composición de las viviendas respecto al estrato socioeconómico. Se puede observar que el 85 % pertenecen a la clase media alta y media baja.

Gráfica 4.1. Porcentaje de viviendas por estrato socioeconómico



Fuente: ENIGH 2014, Cifras en pesos de 2014

A continuación se muestra qué porcentajes por estrato social cuentan con sistemas de almacenamiento de agua, como lo es tinaco y cisterna, así como los que cuentan con medidor de luz y bomba de agua, cabe mencionar que generalmente si cuentas con medidor de luz es factible que se induzca al consumidor a comprar cierto tipo de productos que romuevan el mayor consumo de agua. Se puede observar que todas cuentan con medidor de luz, con bomba de agua el 54 %, con tinaco el 86 % y cisterna 53 %; no todos cuentan con bomba de agua y cisterna pero con lo que si cuenta la mayoría es el tinaco.

Cuadro 4.3. Porcentaje de viviendas por estrato socioeconómico que cuentan con medidor de luz, bomba de agua, tinaco y/o cisterna

Estrato Socioeconómico	Medidor de Luz	%	Bomba de Agua	%	Tinaco	%	Cisterna	%
Alto	28	100%	23	82%	26	93%	25	89%
Medio alto	100	99%	57	56%	93	92%	53	52%
Medio bajo	71	96%	30	41%	56	76%	28	38%
Bajo	4	100%	2	50%	4	100%	4	100%
Promedio Total	203	98%	112	54%	179	86%	110	53%

Fuente: ENIGH 2014, Cifras en pesos de 2014

En el siguiente cuadro se puede observar el nivel educacional del jefe de familia por sexo, donde se puede observar la relación entre su educación con el ingreso, la edad y el promedio de residentes por vivienda. Se puede observar la diferencia en cuanto a la predominancia del sexo masculino al ser jefe de familia, así como el nivel de ingresos aún teniendo el mismo nivel educacional el ingreso es más bajo en las mujeres.

Cuadro 4.4. Promedio de ingreso, edad y número de residentes por vivienda, de acuerdo al nivel educacional del jefe de familia y sexo

Educación del Jefe de Familia	Masculino				Femenino			
	No. de Viviendas	Promedio de Residentes	Promedio de Edad Jefe	Promedio de Ingreso	No. de Viviendas	Promedio de Residentes	Promedio de Edad Jefe	Promedio de Ingreso
Sin instrucción	6	5	77	\$ 9,723	4	3	75	\$ 9,484
Primaria incompleta	11	4	65	\$ 7,950	11	3	71	\$ 12,168
Primaria completa	28	4	58	\$ 11,421	10	3	58	\$ 11,467
Secundaria completa	28	4	42	\$ 10,364	21	4	50	\$ 11,706
Secundaria incompleta	8	4	51	\$ 14,864	3	3	65	\$ 7,468
Preparatoria incompleta	11	3	39	\$ 19,802	3	3	32	\$ 10,978
Preparatoria completa	23	4	40	\$ 16,737	4	4	42	\$ 11,424
Profesional incompleta	4	4	44	\$ 19,365				
Profesional completa	21	4	45	\$ 19,906	4	4	49	\$ 25,366
Posgrado	4	5	46	\$ 52,316	3	2	45	\$ 26,500
Promedio Total	144	4	49	\$ 15,154	63	3	56	\$ 12,925

Fuente: ENIGH 2014, Cifras en pesos de 2014

4.1.2. Consumo de Agua

Para poder obtener los m^3 consumidos de cada una de las viviendas se consideraron aquellas que les es suministrado el servicio de agua potable a través de un Organismo Operador o Municipio y que contaran con drenaje conectado a la red pública, ya que solo así contarían con recibo pagado de agua, el cual se les solicita en la encuesta. El recibo de agua desglosa el precio total pagado como resultado de los m^3 consumidos mas impuestos, mantenimiento, drenaje, alcantarillado y otros cargos; para poder despejar el precio pagado exclusivamente por el consumo de m^3 de agua, se identificó de cada uno de los Organismos Operadores o Municipios, los porcentajes o cuotas fijas que correspondían a estos rubros. Dicha información se obtuvo del Periódico Oficial del Gobierno del Estado “Plan de San Luis” vigente al 2014. En los casos de los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez se consideró la del 5º bimestre ya que en ese año se aplicaron tarifas diferentes para cada bimestre por cuestiones de incremento. Los niveles de consumo 1 y 2 se unificaron para los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez; para el municipio de Santa María del Río se unieron los niveles 2,3 y 4, 5 y 6 por tener el mismo precio por m^3 .

Al observar la información referente a la frecuencia de pago del recibo más del 70% de los datos se encuentra de forma bimestral, por lo que en todos los municipios donde se les cobra de forma mensual se calcularon los m^3 consumidos mensualmente y luego se duplicó esa cantidad con el fin de tener el dato de forma bimestral. Se consideró también el descuento de las personas de la tercera edad para poder reflejar el consumo efectivo sin el descuento. A continuación el cuadro

con los m^3 agrupados de los dos municipios más grandes.

Cuadro 4.5. Consumo de m^3 y precio pagado por municipio

Municipio	m^3	%	Precio Pagado de Agua	%
San Luis Potosí	3,769	51%	\$ 29,889	58%
Soledad de Graciano Sánchez	1,175	16%	\$ 8,154	16%
Subtotal	4,944	67%	\$ 38,043	74%
Matehuala	859	12%	\$ 5,880	11%
Ciudad Valles	730	10%	\$ 3,708	7%
Santa María del Río	385	5%	\$ 963	2%
Tamazunchale	425	6%	\$ 2,904	6%
Total	7,344	100%	\$ 51,497	100%

Fuente: ENIGH 2014, Cifras en pesos de 2014

4.1.3. Ingreso de las Viviendas

Respecto al ingreso de las viviendas, se consideró el ingreso corriente el cual contempla los ingresos por trabajo, rentas, transferencias, estimación del alquiler y de otros ingresos. Dicho ingreso ya considera pagos extraordinarios como lo es aguinaldo, utilidades, entre otros. Es importante considerar todo el ingreso anual de la familia, ya que si se considerara sólo el de los meses encuestados, se tendría una subestimación de este y eso afectaría el consumo de agua estimado. A continuación el ingreso promedio por municipio y por sexo.

Cuadro 4.6. Ingreso promedio por municipio y sexo

Municipio	Masculino	Femenino
Ciudad Valles	\$ 10,757	\$ 9,726
Matehuala	\$ 12,615	\$ 10,119
San Luis Potosí	\$ 18,777	\$ 15,087
Santa María del Río	\$ 14,987	\$ 15,301
Soledad de Graciano Sánchez	\$ 11,203	\$ 7,958
Tamazunchale	\$ 9,440	\$ 13,008

Fuente: ENIGH 2014, Cifras en pesos de 2014

4.2. Información de otras fuentes

Otras variables necesarias para la estimación de la demanda de agua y que influyen en el consumo de la misma, es el precio de la energía eléctrica, el clima y las precipitaciones. A continuación se detalla las fuentes de información de estos aspectos.

4.2.1. Energía Eléctrica

En la obtención del consumo de la energía eléctrica de la CFE se consideró también el último recibo de pago que es bimestral se tomó la tarifa del mes de septiembre de 2014² y fueron contemplados los tres niveles de consumo, hasta 150 *kwh*, hasta 280 *kwh* y el excedente para obtener el precio del *kwh* promedio. Al precio pagado por energía eléctrica se le descontó el IVA y así despejar el precio pagado por energía eléctrica.

4.2.2. Precipitación Pluvial y Temperatura

Las encuestas fueron realizadas en los meses de agosto a noviembre de 2014, así que para obtener la Precipitación Pluvial y la Temperatura³ se consideraron los promedios de los meses de junio, julio, agosto y septiembre, en virtud de que los recibos de pago se pagan con posterioridad al servicio uno o dos meses.

Con los datos anteriores ya se tiene la información para realizar la estimación de la curva de demanda de agua.

4.3. Información de INTERAPAS

Para determinar la función de costos de extracción del agua potable, se consideró el Organismo Operador INTERAPAS, en virtud de que dicho organismo extrae el agua del acuífero a través de bombeo, se obtuvieron los datos de los informes anuales de INTERAPAS, la información contenida en dichos informes aportaron los elementos necesarios para identificar los costos fijos y los variables y se determinó que aproximadamente el 60% de los costos totales pertenecen a los fijos; la información que proporcionan los informes son desde el 2006 hasta 2014. Una vez separados los costos fijos de los variables se trajeron a valor presente del año 2014 de acuerdo a la inflación de los años mencionados publicada por el Banco de México⁴.

²Fuente: https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas_casa.asp

³Fuente: es.weatherspark.com y es.climate-data.org

⁴Fuente: <http://www.anterior.banxico.org.mx/portal-inflacion/inflacion.html>

Cuadro 4.7. Costos de extracción de agua por año

año	m ³ extraídos (miles)	% de Variación m ³ extraídos	Costo Total	Inflación Anual	factor inflacionario pesos de 2014	Costo Total	Costo Fijo	Costo Variable
2014	98,650	-7%	\$ 514,213	4.08%	1.0000	\$ 514,213	\$ 298,724	\$ 215,489
2013	106,530	2%	\$ 465,696	3.97%	1.0408	\$ 484,696	\$ 298,724	\$ 185,972
2012	104,450	6%	\$ 464,247	3.57%	1.0821	\$ 502,371	\$ 298,724	\$ 203,647
2011	98,500	4%	\$ 351,893	3.82%	1.1208	\$ 394,385	\$ 298,724	\$ 95,661
2010	94,920	2%	\$ 336,011	4.40%	1.1636	\$ 390,970	\$ 298,724	\$ 92,246
2009	93,230	2%	\$ 312,117	3.57%	1.2148	\$ 379,148	\$ 298,724	\$ 80,424
2008	91,630	-3%	\$ 308,886	6.53%	1.2581	\$ 388,618	\$ 298,724	\$ 89,894
2007	94,230	2%	\$ 270,647	3.76%	1.3403	\$ 362,744	\$ 298,724	\$ 64,020
2006	92,200		\$ 238,045	4.05%	1.3907	\$ 331,044	\$ 298,724	\$ 32,320

Cifras en miles de pesos de 2014.

Fuente: Informes Anuales INTERAPAS.

Con la información anterior ya se tienen los elementos para estimar la curva de costos.

En este capítulo se determinaron las fuentes de información y criterios que se consideraron para realizar la estimación del modelo. Es importante mencionar que la obtención de información no es sencillo ya que en muchas ocasiones no se cuenta con la micromedición publicada en internet. CONAGUA o el IMTA han desarrollado estudios en los que cuentan con las bases de datos proporcionadas directamente por los organismos operadores y es así como han desarrollado diversos estudios de gran utilidad que muestran un panorama más general de la situación del agua en México. No obstante, la extracción y análisis de datos que se hizo en el presente estudio se realizó de una forma minuciosa para que los datos pudieran reflejar la situación real del consumo en metros cúbicos de agua, el ingreso de cada una de las viviendas y los costos de extracción que reporta el organismo operador del acuífero de San Luis Potosí

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO

Existen varios estudios de acuíferos desde el punto de vista técnico, es decir elaborados por Ingenieros, donde establecen los niveles que se deben considerar para no sobreexplotar el acuífero, sin embargo, los modelos de optimización dinámica utilizando teoría de control son empleados para estimar el punto óptimo en la explotación de recursos naturales pero desde el punto de vista social, ya que al ser un bien común, se considera la demanda del bien comparado con los costos en los que se incurre dependiendo de la demanda del mismo.

El modelo que aquí se emplea, considera tanto la demanda del agua como los costos de extracción de la misma y trae a valor presente los montos con una tasa que ha sido elegida comúnmente para este tipo de estudios que es la tasa de descuento social en México. A continuación el detalle de la estimación de la función de demanda, de costos y la aplicación al modelo de gestión óptima.

5.1. Estimación de la demanda

Para determinar la curva de demanda se emplearon los datos de la información de la ENIGH descrita en el capítulo 4. La base de datos utilizada para estimar la curva de demanda considera las variables de municipio, nivel de tarifa, precio por metro cúbico de agua de acuerdo a la tarifa vigente de cada municipio, monto pagado por agua bimestral, ingreso bimestral por vivienda, temperatura y precipitación pluvial promedio del municipio y el precio promedio por *kwh*.

Se plantearon varios modelos con las variables antes mencionadas y se les aplicó logaritmo para considerar elasticidades (indicado con una \ln antes de cada variable). Finalmente las variables a considerar en el modelo definitivo quedaron como sigue:

m3cons: metros cúbicos consumidos bimestralmente.

preciom3: precio promedio por metro cúbico.

ingr: ingreso bimestral por vivienda.

temp: temperatura media mensual de los municipios considerados en los meses de estudio.

El modelo quedó como se muestra a continuación:

$$\ln(m3cons) = \beta_1 + \beta_2 \ln(\text{precio}) + \beta_3 \ln(\text{ingr}) + \beta_4 \ln(\text{temp}) + u \quad (5.1)$$

Cuadro 5.1. Estimación de la curva de demanda de agua

Variabes	ln(m3cons)
ln(precio)	-1.388***
	(0.486)
ln(ingr)	1.380**
	(0.523)
ln(temp)	-2.374*
	(1.386)
Constante	0.265
	(8.183)
Observaciones	50
R-cuadrada	0.282

Errores estándar robustos en paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia en STATA con datos del ENIGH 2014.

$$\ln(\widehat{m3cons}) = 0,265 - 1,39 \ln(\text{precio}) + 1,38 \ln(\text{ingr}) - 2,37 \ln(\text{temp}) + \varepsilon \quad (5.2)$$

El cual también puede ser expresado así:

$$\widehat{m3cons} = e^{0,265} \cdot \text{precio}^{-1,39} \cdot \text{ingr}^{1,38} \cdot \text{temp}^{-2,37} \quad (5.3)$$

Se puede observar que la elasticidad de la demanda de metros cúbicos de agua respecto al precio es negativa; es decir, si el precio del metro cúbico de agua se incrementa en un 1%, el consumo de agua en metros cúbicos se reduce en 1.39% manteniendo fijas las demás variables. Este caso es ciertamente acorde a la ley de la oferta y la demanda, el consumidor disminuye su consumo cuando el bien aumenta su precio.

La elasticidad de la demanda de metros cúbicos de agua respecto al ingreso es positiva; es decir, si el ingreso se incrementa en un 1%, el consumo de agua en metros cúbicos se incrementa en 1.38% manteniendo fijas las demás variables. Cuando tenemos mayor ingreso, generalmente incurrimos en adquirir o consumir más bienes, en este caso, si contamos con mayor ingreso, podríamos regar el pasto más frecuentemente o bien, aumentar mobiliario en nuestra casa a través del cual se incurra en un mayor consumo de agua.

La elasticidad de la demanda de metros cúbicos de agua respecto a la temperatura es negativa; es decir, si la temperatura se incrementa en un 1%, el consumo

de agua en metros cúbicos se disminuye en 2.37% manteniendo fijas las demás variables. Hay que considerar que la zona de estudio pertenece a un clima seco, donde las tarifas de agua son más elevadas que en las zonas donde hay más humedad y mayor disponibilidad de agua, por lo que si se consume más agua, el precio se eleva considerablemente y esa es la razón por la cual se disminuye su consumo, aunado a lo anterior,

La función de demanda queda así:

$$q(p) = e^{0,265} \cdot ingr^{1,38} \cdot temp^{-2,37} \cdot p^{-1,39} = \frac{e^{0,265} \cdot ingr^{1,38}}{temp^{2,37} \cdot p^{1,39}} \quad (5.4)$$

y la función inversa de demanda que se empleará en la aplicación del modelo de optimización:

$$p(q) = \left[\frac{e^{0,265} \cdot ingr^{1,38}}{q \cdot temp^{2,37}} \right]^{\frac{1}{1,39}} \quad (5.5)$$

5.2. Estimación de la función de costos

Para determinar la función de costos se empleará la información obtenida de INTERAPAS descrita en el capítulo 4.

Es muy usual realizar los modelos de costos con expresiones en donde el costo se encuentra en función de la cantidad producida, se podría expresar con un solo regresor, sin embargo, es muy común utilizar funciones cúbicas. Después de varios ensayos, se apreció que el costo fijo lo podemos considerar independiente para la proyección del modelo, por lo que la regresión explica el costo variable en función de los metros cúbicos extraídos, las variables que quedaron son las siguientes:

cv: costo variable en miles de pesos mexicanos

m3: miles de metros cúbicos extraídos anualmente

m3_2: miles de metros cúbicos extraídos anualmente elevada al cuadrado

El modelo quedó como se muestra a continuación:

$$cv = \beta_1 m3 + \beta_2 m3_2 + u \quad (5.6)$$

Cuadro 5.2. Estimación de la curva de costos

Variables	CV
m3	-7.335***
	(1.829)
m3_2	0.0000877***
	(0.0000189)
Observaciones	9
R-cuadrada	0.925

Errores estándar robustos en paréntesis

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

Fuente: Elaboración propia en STATA con datos del ENIGH 2014.

$$\hat{c}v = -7,33m3 + 0,0000877m3_2 + \varepsilon \quad (5.7)$$

Se aprecia que el costo variable depende negativamente de los metros extraídos, es decir, si se extraen 1000 metros cúbicos adicionales, el costo variable decrece \$7.33 miles de pesos y el otro regresor es positivo incrementando el costo variable en \$0.0000877 miles de pesos, ahora se le agrega el elemento del costo fijo y se tiene la siguiente estimación de los costos totales de extracción expresado en miles de pesos:

$$CostoTotal = 298,724 - 7,33m3 + 0,0000877m3_2 \quad (5.8)$$

Por lo tanto, la función de costos que se utilizará en la aplicación del modelo queda como sigue:

$$c(x) = 298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2 \quad (5.9)$$

x : agua extraída en miles de m^3

5.3. Aplicación al modelo de gestión óptima

Con los datos mencionados en los capítulos anteriores del acuífero, de la ENIGH y las funciones de demanda y costos, se procede a sustituir en el problema de optimización.

Curva de demanda	Curva de costos
$q(p) = \frac{e^{0,265} \cdot ingr^{1,38}}{temp^{2,37} \cdot p^{1,39}}$	$c(x) = 298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2$
Curva inversa de demanda	
$p(q) = \left[\frac{e^{0,265} \cdot ingr^{1,38}}{q \cdot temp^{2,37}} \right]^{\frac{1}{1,39}}$	

$$\begin{aligned} & \max_q \int_0^{\infty} e^{-rt} [p - c(x)] q dt \\ & \max_q \int_0^{\infty} e^{-0,1t} \left[\left(\frac{e^{0,265} \cdot ingr^{1,38}}{q \cdot temp^{2,37}} \right)^{\frac{1}{1,39}} - (298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2) \right] q dt \end{aligned}$$

$$s.a. \quad \dot{x} = R - (1 - \alpha)q(p)$$

$$s.a. \quad \dot{x} = 78,100 - (1 - 0,06) \frac{e^{0,265} \cdot ingr^{1,38}}{temp^{2,37} \cdot p^{1,39}}$$

se sustituyen los siguientes valores:

$ingr = \$14,04$ miles de pesos

$temp = 17,5^\circ$ celsius

$\bar{x} = 78,100 m^3$ (en miles)

$r = 10\%$ tasa de descuento social¹

$R = 78,100 m^3$ (en miles) anuales de recarga

$\alpha = 6\%$ flujo de retorno

y entonces las funciones quedan como sigue:

$$p(q) = 0,1266q^{-\frac{1}{1,39}}$$

$$q(p) = 0,0566p^{-1,39}$$

$$q'(p) = -0,0786p^{-2,39}$$

$$c(x) = 298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2$$

$$c'(x) = -7,33 + 0,0001754x$$

$$c''(x) = 0,0001754$$

Modelo de gestión óptima con los datos empíricos

$$\max_q \int_0^{\infty} e^{-0,1t} \left[0,1266q^{-\frac{1}{1,39}} - (298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2) \right] q dt$$

$$s.a. \quad \dot{x} = 78,100 - 0,0532p^{-1,39}$$

¹Fuente: CONAGUA&SEMARNAT, Metodologías de Evaluación Socioeconómica y Estructuración de Proyectos de Inversión, pp. 33

5.3.1. Solución Interior

Si se considera una solución interior donde el óptimo se encuentre estrictamente entre los niveles mínimos y máximos del acuífero se tiene:

$$\begin{aligned} \text{de } \dot{x} = 0 \text{ se obtiene} \\ 78,100 - 0,0532p^{-1,39} &= 0 \\ p &= 0,00003658 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{de } \dot{p} = 0 \text{ se tiene:} \\ 0,1 \left[0,1266q^{-\frac{1}{1,39}} - (298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2) \right] + (-7,33 + 0,0001754x)78,100 = \\ 0 \\ 0,01266q^{-\frac{1}{1,39}} - 29,872,4 + ,733x - 0,00000877x^2 - 572,473 + 13,6987x = 0 \\ 0,01266q^{-\frac{1}{1,39}} - 602,345,4 + 14,4317x - 0,00000877x^2 = 0 \\ q = (47,578,625,59 - 1,139,94x + 0,000692733x^2)^{-1,39} \end{aligned}$$

Como la primera ecuación no depende de x el estado estacionario de p resulta:

$$\begin{aligned} R &= (1 - \alpha)q(p) \\ q(p) &= \frac{R}{1-\alpha} \text{ si se obtiene la función inversa} \\ p(q) &= p\left(\frac{R}{1-\alpha}\right) = 0,1266 \left(\frac{78,100}{1-0,06}\right)^{-\frac{1}{1,39}} \\ \hat{p} &= p\left(\frac{R}{1-\alpha}\right) = 0,00003658 \end{aligned}$$

Por otro lado, se puede derivar una función explícita para la isoclima del precio, empleando $\dot{p} = 0$:

$$\begin{aligned} \dot{p} &= r(p - c) + c'R \\ 0 &= r(p - c) + c'R \\ r(p - c) &= -c'R \\ p &= c - \frac{c'R}{r} \\ p &= 298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2 - \frac{78,100}{0,1}(-7,33 + 0,0001754x) \\ p &= 298,724 - 7,33x + 0,0000877x^2 + 5,724,730 - 136,99x \\ p &= 6,023,454 - 144,317x + 0,0000877x^2 \end{aligned}$$

Para graficar sustituiremos los valores extremos:

$$\begin{aligned} \text{si } x = 0 \text{ entonces } p &= 6,023,454 \\ \text{si } x = \bar{x} = 78,100 \text{ entonces } p &= -4,712,767,903 \end{aligned}$$

Por otro lado se tiene:

$$\left. \frac{dp}{dx} \right|_{\substack{\bullet \\ \hat{p}=0}} = c' - \frac{R}{r}c'' < 0 \quad \forall x \in [0, \bar{x}]$$

$$-7,33 + 0,0001754x - \frac{78,100}{0,1}(0,0001754) = 0,0001754x - 144,32 < 0$$

en efecto se cumple esta condición, si sustituimos \bar{x} que es lo máximo que puede valer x .

De acuerdo a lo anterior, habrá una solución en el intervalo $(0, \bar{x})$ y será la única si:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left[c(x) - \frac{R}{r}c'(x) \right] > \hat{p} > \lim_{x \rightarrow \bar{x}} \left[c(x) - \frac{R}{r}c'(x) \right]$$

sustituyendo en:

$$c(x) - \frac{R}{r}c'(x) = 6,023,454 - 144,317x + 0,0000877x^2$$

calculando el límite:

$$6,023,454 > 0,00003658 > -4,712,767,903$$

por lo tanto, sí se cumple la desigualdad.

Raíces características

Para determinar su estabilidad se examinarán las raíces características:

Punto crítico $E = (\hat{p}, x^*)$, siendo x^* la solución a la ecuación $p = c - \frac{c'R}{r}$, las cuales para este caso son:

sustituyendo \hat{p} en la ecuación anterior:

$$0,00003658 = 6,023,454 - 144,317x + 0,0000877x^2$$

$$0 = 6,023,453,999963423 - 144,317x + 0,0000877x^2$$

despejando la x se tiene:

$$x_1^* = 1,602,725,38 \quad \text{y} \quad x_2^* = 42,853,64$$

hay dos soluciones para x^* .

Continuando con el Jacobiano

$$J = \begin{bmatrix} \frac{d\hat{p}}{dp} & \frac{d\hat{p}}{dx} \\ \frac{dx^*}{dp} & \frac{dx^*}{dx} \end{bmatrix}_{(\hat{p}, x^*)}$$

Valuando en el punto E se tiene:

$$J_E = \begin{bmatrix} r & -rc'(x^*) + c''(x^*)R \\ -(1-\alpha)q'(\hat{p}) & 0 \end{bmatrix}$$

obteniendo las raíces:

$$J_E = \begin{bmatrix} r - \lambda & -rc'(x^*) + c''(x^*)R \\ -(1-\alpha)q'(\hat{p}) & -\lambda \end{bmatrix}$$

$$|J_E - \lambda I| = \lambda^2 - r\lambda + (1-\alpha)q'(\hat{p}) [-rc'(x^*) + c''(x^*)R]$$

de aquí que:

$$\lambda_1 = \frac{r + \sqrt{r^2 - 4(1-\alpha)q'(\hat{p})[-rc'(x^*) + c''(x^*)R]}}{2}$$

$$\lambda_2 = \frac{r - \sqrt{r^2 - 4(1-\alpha)q'(\hat{p})[-rc'(x^*) + c''(x^*)R]}}{2}$$

se procede a sustituir los valores en cada λ , pero antes se necesita calcular $q'(\hat{p})$:

$$q'(\hat{p}) = -0,0786(0,00003658)^{-2,39} = -3,157,586,302$$

Obtención de lambdas

para $x_1^* = 1,602,725,39$

$$c'(x_1^*) = -7,33 + 0,0001754(1,602,725,38) = 273,78$$

$$c''(x_1^*) = 0,0001754$$

$$\lambda_1 = \frac{,1 + \sqrt{(.1)^2 - 4(.94)(-3,157,586,302)[-(.1)273,78 + (0,0001754)78,100]}}{2} = 0,05 + 201,499i$$

$$\lambda_2 = \frac{,1 - \sqrt{(.1)^2 - 4(.94)(-3,157,586,302)[-(.1)273,78 + (0,0001754)78,100]}}{2} = 0,05 - 201,499i$$

es un espiral retractor.

para $x_2^* = 42,853,64$

$$c'(x_2^*) = -7,33 + 0,0001754(42,853,64) = 0,186528$$

$$c''(x_2^*) = 0,0001754$$

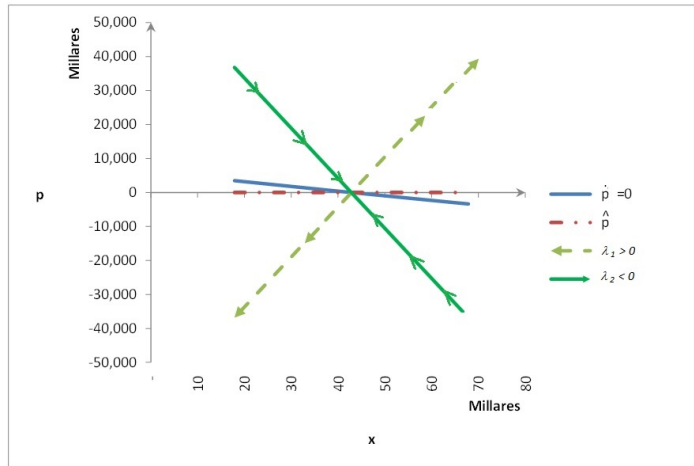
$$\lambda_1 = \frac{,1 + \sqrt{(.1)^2 - 4(.94)(-3,157,586,302)[-(.1)0,186528 + (0,0001754)78,100]}}{2} = 201,506 > 0$$

$$\lambda_2 = \frac{,1 - \sqrt{(.1)^2 - 4(.94)(-3,157,586,302)[-(.1)0,186528 + (0,0001754)78,100]}}{2} = -201,506 < 0$$

es un punto silla.

Esta es una solución interior y aunque es un punto silla, se puede considerar como una opción aceptable de equilibrio, puesto que indica que el nivel óptimo de extracción son 42,854 miles de m^3 , siendo que la recarga máxima que se ha tenido es de 78,100 miles de m^3 .

Gráfica 5.1. Diagrama de fase solución interior



Fuente: Elaboración propia

Lo que nos indica que:

Sólo hay un estado estacionario (\hat{p}, x^*) con $0 < x^* < \bar{x}$, la trayectoria óptima conduce al estado estacionario.

El estado estacionario es un punto silla y la trayectoria óptima se aproxima asintóticamente a él.

Si la reserva inicial es más grande (menor) que la reserva en el estado estacionario, entonces el precio inicial es más bajo (más alto) que el precio del estado estacionario y el precio se incrementa (decrementa) a lo largo del camino óptimo.

5.3.2. Solución esquina con $x^* = 0$

Otra opción para estudiar es donde la solución sea la capacidad mínima del acuífero. En este caso, aunque la solución se establece como $x^* = 0$, cabe mencionar que el nivel de esta reserva inicial coincide con aquel nivel en donde no se encuentra en peligro la supervivencia del acuífero ya que es el mínimo requerido para conservar la vida del acuífero.

Entonces en este caso se tiene:

La condición de transversalidad es:

$$\lim_{x \rightarrow 0} [c(x) - \frac{R}{r} c'(x)] \leq \hat{p}$$

Se tienen las ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= R - (1 - \alpha)q(p) \quad y \\ \dot{p} &= r(p - c) + c'R - (1 - \alpha)\eta_2 \quad \text{con } \eta_2 \geq 0 \end{aligned}$$

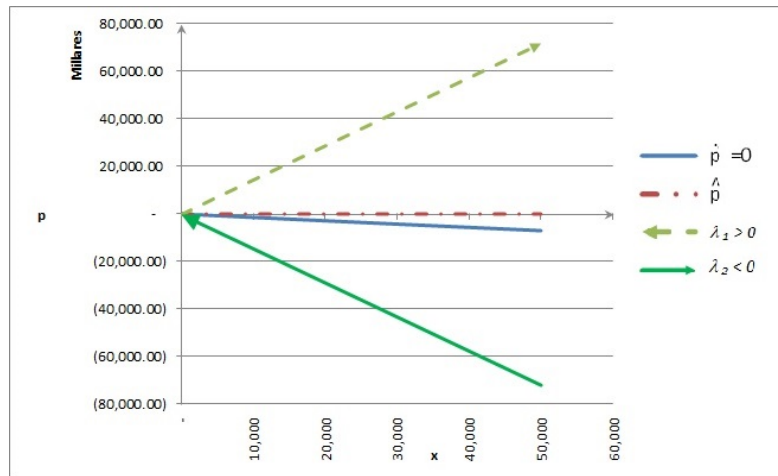
y la isoclina ahora será:

$$\begin{aligned} p &= c(x) - \frac{c'(x)R - (1 - \alpha)\eta_2}{r} \\ p &= 6,023,454 - 144,317x + 0,0000877x^2 - 9,4\eta_2 \end{aligned}$$

El valor de η_2 será elegido para la isoclina p tal que intersecte a la isoclina $\dot{x} = 0$ en el punto $(\hat{p}, 0)$.

Y el jacobiano no cambia ya que al derivar las funciones las η_i son constantes, por lo tanto, sigue siendo un punto silla el estado estacionario.

Gráfica 5.2. Diagrama de fase solución esquina con $x^* = 0$



Fuente: Elaboración propia

En este caso sólo tiene una trayectoria estable que conduce al equilibrio, para cualquier valor inicial de la reserva de agua.

Es óptimo agotar físicamente las reservas de agua iniciales del acuífero o es óptimo explotarlo a la capacidad mínima compatible con la supervivencia del acuífero.

Si la condición de transversalidad es:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left[c(x) - \frac{R}{r} c'(x) \right] = \hat{p} \quad \text{entonces, lleva un tiempo infinito agotar las reservas.}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \left[c(x) - \frac{R}{r} c'(x) \right] < \hat{p} \quad \text{entonces, lleva un tiempo finito agotar las reservas.}$$

5.3.3. Solución esquina con $x^* = \bar{x}$

Analizando otra opción donde la solución sea la capacidad máxima de acuífero se tiene:

La condición de transversalidad es:

$$\lim_{x \rightarrow \bar{x}} [c(x) - \frac{R}{r}c'(x)] \geq \hat{p}$$

Se tienen las ecuaciones diferenciales:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= R - (1 - \alpha)q(p) \quad y \\ \dot{p} &= r(p - c) + c'R + (1 - \alpha)\eta_1 \quad \text{con } \eta_1 \geq 0 \end{aligned}$$

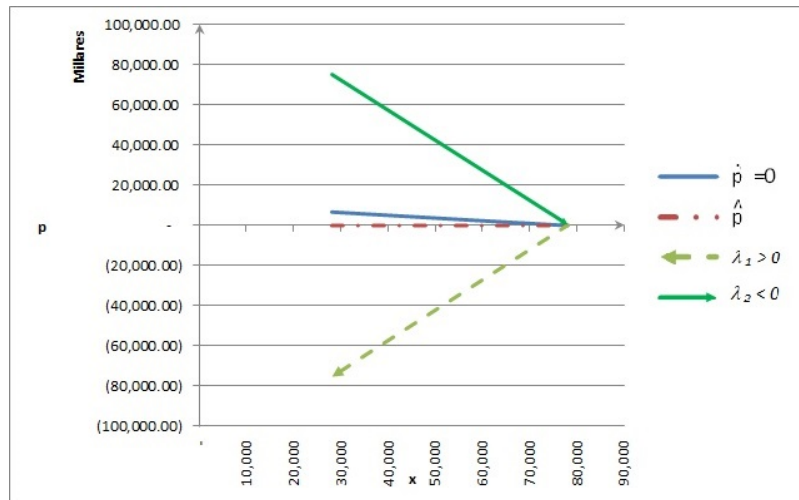
y la isoclina ahora será:

$$\begin{aligned} p &= c(x) - \frac{c'(x)R + (1 - \alpha)\eta_1}{r} \\ p &= 6,023,454 - 144,317x + 0,0000877x^2 - 9,4\eta_1 \end{aligned}$$

El valor de η_1 será elegido para la isoclina p tal que intersecte a la isoclina $\dot{x} = 0$ en el punto (\hat{p}, \bar{x}) .

Y el jacobiano no cambia ya que al derivar las funciones las η_i son constantes, por lo tanto, sigue siendo un punto silla el estado estacionario.

Gráfica 5.3. Diagrama de fase solución esquina con $x^* = \bar{x}$



Fuente: Elaboración propia

En este caso sólo tiene una trayectoria estable que conduce al equilibrio, es óptimo explotar el acuífero a su máxima capacidad de almacenamiento.

Si la condición de transversalidad es:

$\lim_{x \rightarrow \bar{x}} \left[c(x) - \frac{R}{r} c'(x) \right] = \hat{p}$ entonces, se necesita un tiempo infinito para alcanzar la capacidad máxima de almacenamiento del acuífero.

$\lim_{x \rightarrow \bar{x}} \left[c(x) - \frac{R}{r} c'(x) \right] > \hat{p}$ entonces, se necesita un tiempo finito para alcanzar la capacidad máxima de almacenamiento del acuífero.

En ambos casos, el precio inicial es mayor que el estado estacionario y el precio está disminuyendo a lo largo del óptimo

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

La escasez del agua y en específico en los acuíferos es un problema mundial y que involucra muchos aspectos sociales, culturales, políticos, técnicos y también de sustentabilidad. La economía tal como las otras áreas, se encuentran involucradas para la resolución de este tipo de problemas. Como se explicó en esta tesis abordar la optimización de este tipo de recursos naturales a través de la herramienta del control óptimo nos conduce a realizar una serie de análisis previos que tienen que ver con el marco legal, la disponibilidad de la información y las condiciones físicas de cada uno de los acuíferos. Una vez que se obtienen los resultados se deben analizar para observar si la descripción de la realidad está siendo explicada por el modelo ya que de esa forma se tiene la posibilidad de plantear dicha solución a las demás áreas involucradas y proponerlo como una posible solución.

Dentro del estudio que se realizó para proponer este modelo de gestión óptima se pudo observar que es un modelo poco usado en México, este tipo de modelos es más comúnmente usado en España por ejemplo, en la India y sus orígenes se fundamentaron en el sector agrícola, en función de que su proceso productivo depende netamente del consumo y calidad de agua, asimismo han habido estudios de explotación pesquera.

Una vez que se aplicaron los datos empíricos al modelo propuesto se puede concluir que el nivel óptimo de reserva de agua más estable es el nivel mínimo del acuífero ya que si se parte de un nivel arriba del equilibrio, la dinámica del precio indica que el precio tiende a subir a medida que la reserva va disminuyendo y la trayectoria óptima va tendiendo al nivel mínimo, una vez que llega a ese punto de equilibrio ahí es donde se establece y ya no sale de ese punto estable, es decir no rebota, por lo que se considera un mejor punto para establecer el equilibrio. Asimismo, si se parte de un precio menor que el de equilibrio pero que se va incrementando a medida que las reservas bajan, se puede considerar apegado a la realidad. A medida que existen menores reservas de agua, el precio tiende a subir por la escasez y se llega en un tiempo finito a agotar las reservas.

Dentro de los resultados que se observaron, se puede concluir que la metodología para abordar la optimización de un acuífero, involucra de primera instancia información disponible para establecer la demanda de agua y los costos de extracción, cuestión que en la práctica, comentado en diferentes estudios y en este en particular fue difícil de encontrar ya que los organismos encargados no proporcionan dicha información, por lo que se tuvo que realizar un análisis de datos minucioso para poder establecer la base de datos necesaria. Dentro del internet, la información

que se tiene a la mano generalmente es condensada y no se tiene al detalle que se requiere. Por lo que se sugeriría, establecer vínculos con dichos organismos a cambio de entregar un análisis detallado del estudio y de esa forma se pueda trabajar conjuntamente para resolver la problemática existente de la sobreexplotación de los acuíferos.

En segundo término se observó la importancia del establecimiento de políticas acorde a la situación crítica que se vive en relación a las tarifas de agua y a la concesión de derechos de agua, puesto que el establecimiento o aumento de tarifas en la práctica sólo se remite a una evaluación somera de la inflación o algunos otros factores económicos o circunstanciales a través de los cuales establecen las tarifas los organismos operadores, asimismo, la concesión o renovación de derechos de agua no se encuentra totalmente revisado para evitar otorgar concesiones que sigan sobreexplotando el acuífero. Algunas recomendaciones serían aprovechar los estudios ya realizados por Instituciones especializadas como la CONAGUA e IMTA o Universidades reconocidas, relativos al establecimiento de tarifas, ya que sí cuentan con una base teórica económica y sustentable para poder ser aplicadas por los Organismos Operadores estudiando evidentemente las condiciones de cada ciudad. Administrativamente, que los Organismos Operadores distingan claramente el detalle de los costos de extracción de cada uno de los acuíferos, en virtud de que uno de los principios básicos para establecer el precio de un bien, es conocer a detalle los gastos en los que se incurre.

Referente al modelo, se podría sugerir adicionar otras variables como externalidades tales como contaminación o intrusión salina. Asimismo, establecer como una función la recarga del acuífero para poder describir mejor su comportamiento.

Finalmente respecto a las condiciones físicas del acuífero, existen estudios y aplicaciones en México y varios países para ayudar a la recarga del acuífero a través de construir sistemas artificiales, como se pudo observar en la Figura 2.6 las cuencas superficiales son también de vital importancia para la recarga de los acuíferos, por lo que un factor que no ha ayudado al acuífero de San Luis Potosí es el hecho de invadir los cerros con construcciones residenciales, ya que esto ha afectado notablemente la recarga del acuífero.

APPENDICES

A.. Abreviaturas

CEA: Comisión Estatal de Agua

CFE: Comisión Federal de Electricidad

CIDE: Centro de Investigación y Docencia Económicas A.C.

CNSM: Comisión Nacional de los Salarios Mínimos

COLSAN: Colegio de San Luis A.C.

CONAGUA: Comisión Nacional de Agua

DMA: Disponibilidad Media Anual de Agua

ENIGH: Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares

IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INPC: Índice Nacional de Precios al Consumidor

INTERAPAS: Organismo Operador Intermunicipal Metropolitano de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Servicios Conexos de los Municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez.

IVA: Impuesto al Valor Agregado

km: kilómetro

km²: kilómetro al cuadrado

kwh: kilowatt-hora

mm: milímetros

msnm: metros sobre el nivel del mar

PIB: Producto Interno Bruto

REPDA: Registro Público de Derechos de Agua

SEGOB: Secretaría de Gobernación

SEMARNAT: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

UAG: Universidad Autónoma de Guadalajara

B.. Glosario

Abatimiento del agua subterránea: Distancia provocada por la evolución del límite superior del nivel freático a través del tiempo al estar bombeando el agua.

Acuífero. Formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectados entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsue-

lo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

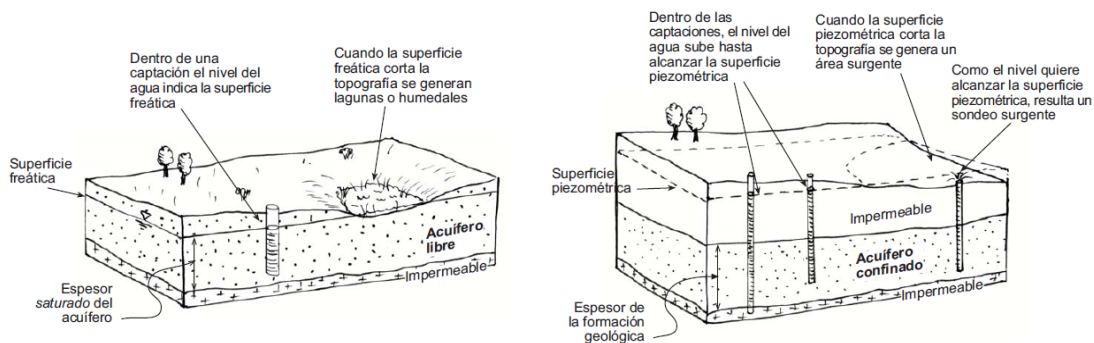
Acuífero colgado: Masa de agua subterránea, generalmente de dimensiones moderadas, situada sobre un estrato relativamente impermeable, y que está ubicada entre un nivel freático y la superficie del terreno. (también ver Superficie freática).

Acuífero confinado: Su límite superior se encuentra a presión superior a la atmosférica: es una capa impermeable.

Acuífero libre: Acuífero que se encuentra limitado por una capa confinante en la base del acuífero, mientras que la porción superior está limitada por el nivel freático, el cual se encuentra a presión atmosférica. El nivel superior del acuífero es libre de ascender o descender.

Acuífero semiconfinado: Acuífero limitado por formaciones menos permeables (acuitardo) que el mismo, pero a través de las cuales puede recibir ó ceder volúmenes significativos de agua. El acuífero semiconfinado contiene agua a mayor presión que la atmósfera. El agua es libre de moverse a través de los acuitardos en sentido vertical, hacia arriba o hacia abajo.

Acuitardo: Formación geológica que es mucho menos permeable que el acuífero que esta abajo o encima de él y casi siempre es mucho más delgado. Se comporta como una membrana delgada semipermeable a través de la cual puede haber filtraciones entre acuíferos separados por ella. El acuitardo es casi siempre llamado formación semipermeable o filtrante.



Fuente: Aragués Lafarga, 2013

Agua concesionada. Volumen de agua que otorga el Ejecutivo Federal a través de la Conagua mediante un título.

Caudal. Cantidad de escurrimiento que pasa por un sitio determinado en un cierto tiempo, también se conoce como gasto. Este concepto se usa para determinar el volumen de agua que escurre en un río.

Concesión. Título que otorga el Ejecutivo Federal para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, y de sus bienes públicos inherentes, a las personas físicas o morales de carácter público y privado.

Conductividad Hidráulica o Permeabilidad. La facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, para nuestro caso el agua.

Cuenca hidrológica. Es la unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas —aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad—, en donde ocurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aún sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con estos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica puede incluir aguas superficiales y acuíferos.

Cuerpo receptor. La corriente o depósito natural de agua, presas, cauces, zonas marinas o bienes nacionales donde se descargan aguas residuales, así como los terrenos en donde se infiltran o inyectan dichas aguas, cuando puedan contaminar los suelos, subsuelo o los acuíferos.

Descarga. La acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor.

Descarga natural comprometida: fracción de la descarga natural de un acuífero, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a un acuífero.

Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica: volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

Escurrimiento superficial. Es el agua proveniente de la precipitación que llega a una corriente superficial de agua.

Evaporación: es el proceso por el cual el agua, en la superficie de un cuerpo de agua natural o artificial o en la tierra húmeda, adquiere la suficiente energía cinética de la radiación solar, y pasa del estado líquido al gaseoso.

Evapotranspiración: es la cantidad total de agua que retorna a la atmósfera en una determinada zona por evaporación del agua superficial y del suelo, y por transpiración de la vegetación.

Hogar: Conjunto formado por una o más personas, que residen habitualmente en la misma vivienda y se sostienen de un gasto común, principalmente para alimentarse, y pueden ser parientes o no.

Humedales. Las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos.

kwh: kilowatt-hora, medida de potencia eléctrica, unidad de trabajo o energía, equivale a la energía producida o consumida por una potencia de 1 kilovatio (1000 vatios) en 1 hora.

Libre Alumbramiento: Es la condición en que un interesado puede construir una captación de agua del subsuelo y extraer con ella la cantidad de agua que requiera para cualquier uso, sin necesidad de contar con un permiso o título de concesión y sin más obligación que dar aviso de ello a la Autoridad del Agua.

Nivel estático: Elevación de la capa freática o de la superficie piezométrica cuando no está influenciada por bombeo u otras formas de extracción de agua.

Nivel freático: Límite superior de la zona saturada en el cual el agua contenida en los poros se encuentra sometida a la presión atmosférica.

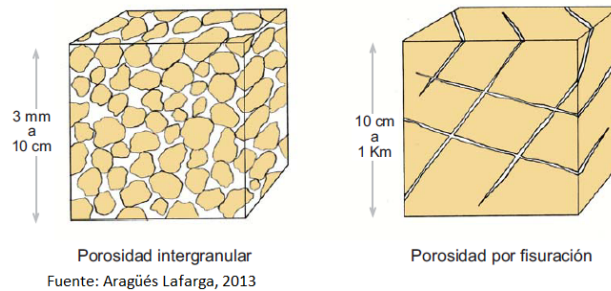
Nivel piezométrico o carga hidráulica: Ver superficie piezométrica.

Percolación: Movimiento (lento) y filtrado de fluidos a través de materiales porosos.

Piroclasto: Fragmentos de lava de tamaño, morfología y color variado que se emite a la atmósfera en las erupciones volcánicas.

Porosidad: La porosidad (n) es una medida de la cantidad de vacíos que tiene un material y se define como la relación entre su volumen de vacíos (V_v) y el volumen total (V_t), esto es: $n = V_v / V_t$, expresada como un porcentaje. Como en la zona saturada los huecos están completamente llenos de agua, la porosidad resulta también ser una medida de la cantidad de agua que el material puede contener por unidad de volumen.

Al hablar de porosidad, se piensa en los poros de un material detrítico como unas arenas, pero las rocas compactas también pueden contener agua en su interior en sus fisuras, estas fisuras son fracturas producidas por esfuerzos tectónicos, pero también se puede deber a enfriamiento (rocas volcánicas), discontinuidades sedimentarias, etc., tras su formación, estas fisuras pueden ser ocluidas por los minerales arcillosos resultantes de la alteración, o por el contrario la disolución hace aumentar la abertura, a veces hasta formar amplios conductos.



Precipitación. Agua en forma líquida o sólida, procedente de la atmósfera, que se deposita sobre la superficie de la tierra; incluye el rocío, la llovizna, la lluvia, el granizo, el aguanieve y la nieve

Recarga artificial. Conjunto de técnicas hidrogeológicas aplicadas para introducir agua a un acuífero, a través de obras construidas con ese fin.

Recarga media anual. Es el volumen medio anual de agua que ingresa a un acuífero.

Recarga incidental: Aquella que es consecuencia de alguna actividad humana, como riego de jardines, fugas de agua en redes de distribución y alcantarillado, descargas de fosas sépticas e infiltraciones en canales de tierra y otros; que no cuenta con la infraestructura específica para la recarga artificial.

Recarga natural. La generada por infiltración directa de la precipitación pluvial, de escurrimientos superficiales en cauces o del agua almacenada en cuerpos de agua.

Región hidrológica. Área territorial conformada en función de sus características morfológicas, orográficas e hidrológicas, en la cual se considera a la cuenca hidrológica como la unidad básica para la gestión de los recursos hídricos. Una región hidrológica puede contener una o varias cuencas hidrológicas.

Región hidrológico-administrativa. Área territorial definida de acuerdo con criterios hidrológicos en la que se considera a la cuenca como la unidad básica más apropiada para el manejo del agua y al municipio como la unidad mínima administrativa del país. La república mexicana se ha dividido en 13 regiones hidrológico-administrativas.

Retornos de riego. Son todos los flujos de agua que provienen del regadío y son exportados del mismo de forma superficial o subterránea. Estos flujos retornan generalmente a los ríos y a las aguas subterráneas, pero también pueden hacerlo directamente al mar o a otros cuerpos de agua (lagunas, etc.). Los flujos de retorno de riego (FRR) se consideran los mayores contribuyentes difusos (no puntuales) de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. También se les define como: los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua.

Rocas clásticas o detríticas: son una clase de rocas sedimentarias compuestas de fragmentos de roca y minerales pre-existentes acumulados mecánicamente,

que se han consolidado en mayor o menor grado. Cuando no se ha consolidado se prefiere emplear los términos sedimento o depósito.

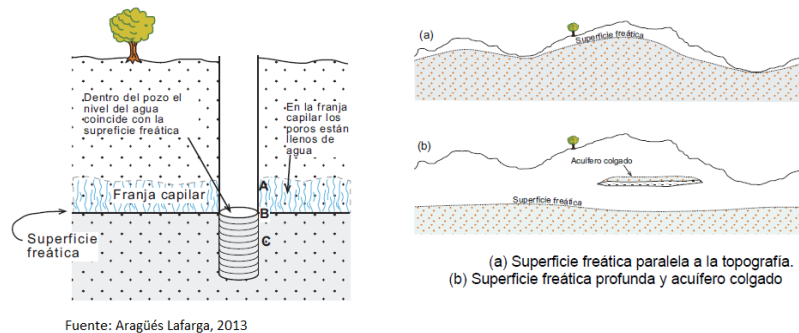
Sedimento: Dicho de las materias suspendidas en un líquido.

Superficie freática: Es la superficie formada por los puntos con una presión igual a la presión atmosférica.

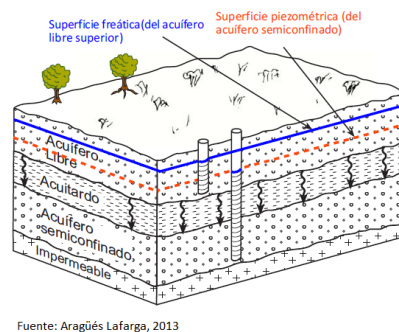
En B la presión del agua *igual* presión atmosférica.

En A la presión del agua *menor* presión atmosférica.

En C la presión del agua *mayor* presión atmosférica.



Superficie piezométrica: Es la superficie virtual formada por los puntos que alcanzaría el agua si se hicieran infinitas perforaciones en el acuífero y en un pozo se le llama nivel piezométrico o carga hidráulica.



C.. Variables de la ENIGH 2014

Tabla CONCENTRADOHOGAR	
Num. y Nombre de la Variable	Concepto
1 folioviv	Identificador de la vivienda
2 foliohog	Identificador del hogar
3 ubica_geo	Ubicación geográfica
6 est_socio	Estrato socioeconómico
14 tot_integ	Número de integrantes del hogar
19 p12_64	Integrantes de 12 a 64 años
20 p65mas	Integrantes de 65 años y mas
24 ing_cor	Ingreso corriente

Tabla GASTOSHOGAR	
Num. y Nombre de la Variable	Concepto
1 folioviv	Identificador de la vivienda
2 foliohog	Identificador del hogar
3 clave	Clave de gasto
4 tipo_gasto	Tipo de gasto
6 forma_pago	Forma de pago
8 orga_inst	Organismo que provee el servicio
13 gasto	Gasto efectuado
14 pago_mp	Pago mes pasado
19 num_meses	Meses pagados
21 ultim_pago	Fecha del último pago
22 gasto_tri	Gasto trimestral

Tabla VIVIENDAS	
Num. y Nombre de la Variable	Concepto
1 folioviv	Identificador de la vivienda
2 tipo_viv	Tipo de vivienda
3 mat_pared	Material de paredes
4 mat_techos	Material de techos
5 mat_pisos	Material de pisos
12 disp_agua	Disponibilidad de agua
13 dotac_agua	Dotación de agua
16 sanit_agua	Sanitario conexión agua
18 bano_comp	Sanitario excusado regadera
19 bano_excus	Sanitario excusado
20 bano_regad	Sanitario regadera
21 drenaje	Destino de drenaje
22 disp_elect	Disponibilidad eléctrica
41 lavadero	Dispone de lavadero
42 fregadero	Dispone de fregadero
43 regadera	Dispone de regadera
44 tinaco_azo	Dispone de tinaco
45 cisterna	Dispone de cisterna
46 pileta	Dispone de pileta o tanque
47 calent_sol	Dispone de calentador solar de agua
48 calent_gas	Dispone de calentador de gas
49 medidor_luz	Dispone de medidor de luz
50 bomba_agua	Dispone de bomba de agua
52 aire_acond	Dispone de aire acondicionado
53 calefacc	Dispone de calefacción
54 tot_resid	Total de residentes de la vivienda
58 ubica_geo	Ubicación geográfica

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Accinelli, E. (2009). Optimización Dinámica. Notas preparadas para el Banco de Guatemala.

- [2] Amir, I., & Fisher, F. (1999). Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. Elsevier, 45-56.

- [3] Aragüés Lafarga, R. (2013). ¿Qué son los retornos de riego? Zaragoza, España: Comunidad General de Riegos del Alto Aragón.

- [4] BANXICO. (2019). Inflación. Obtenido de <http://www.anterior.banxico.org.mx/portal-inflacion/inflacion.html>

- [5] Cabrera-Estupiñán, H., & Dilla-Salvador, F. (2011). Modelo de administración de acuíferos: MADA. Tecnologías y ciencias del agua, II(4), 5-24.

- [6] Carrión, F., & Sánchez-Vizcaino, J. (2015). Extracción de agua subterránea con el mínimo coste. Aplicación a sistemas de riego por aspersión para maíz en España. IV Jornadas de Ingeniería del Agua. Córdoba, España.

- [7] Casparri, M., García Fronti, V., & Ana Silvia, V. (2016). Aplicación de control óptimo en un modelo económico de explotación pesquera. Revista de Investigación de Modelos Matemáticos Aplicados a la Gestión y la Economía(3), 235-250.

- [8] Cázares Rivera, D. (2007). Propuesta de estructura tarifaria de agua potable para los organismos operadores de los servicios de agua y drenaje en la fron-

- tera México-EUA. Monterrey, Nuevo León, México: Centro de Estudios del Agua CEA, Banco de Desarrollo de América del Norte.
- [9] CEA. (2016). Estudio Técnico para la reserva de aguas superficiales de la cuenca del Río Pánuco para el estado de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México: Gobierno del estado de San Luis Potosí.
- [10] CFE. (2014). Tarifas Domésticas. Obtenido de https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_casa.asp?Tarifa=DACTAR1&Anio=2014&mes=10&imprime=
- [11] CFE. (2017). Tarifas Domésticas. Obtenido de https://app.cfe.mx/aplicaciones/ccfe/tarifas/tarifas/tarifas_casa.asp
- [12] Chiang, A. (1992). Elements of Dynamic Optimization. Singapore: McGraw-Hill.
- [13] CIDE, & CONAGUA. (2012). Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable. México: CIDE.
- [14] CNSM. (Julio de 2017). Evolución de los precios. Obtenido de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/244595/XI-EvolucionDeLosPrecios-julio2017.pdf>
- [15] COLSAN. (2012). Análisis de la oferta de agua. Caso: San Luis Potosí (1992-2012). San Luis Potosí, México: COLSAN.
- [16] CONAGUA. (20 de Abril de 2015). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero de San Luis Potosí(2411) Estado de San Luis Potosí. DOF.
- [17] CONAGUA, & SEMARNAT. (2014). Estadísticas del Agua en México 2014. México.

- [18] CONAGUA, & SEMARNAT. (2014, 2018). Estadísticas del Agua en México 2018. México.
- [19] CONAGUA, & SEMARNAT. (s.f.). Metodologías de Evaluación Socioeconómica y Estructuración de Proyectos de Inversión. Libro 2 , México.
- [20] García Salazar, J., & J. Saturnino, M.-F. (2008). Tarifas y consumo de agua en el sector residencial de la Comarca Lagunera. *Región y Sociedad*, XX(42).
- [21] García Sánchez, E. (2016). Caracterización hidrogeológica de los acuíferos de Aspe y la Horna. Tesis Doctoral. Alicante, España: Universidad de Alicante.
- [22] Gobierno de España, M. y. (2019). Libro Blanco de España. Obtenido de http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEH/Documentos_Descargas/LB_LibroBlancoAgua.htm
- [23] Gobierno de la República. (2014). Plan Nacional de Desarrollo. Programa Nacional Hídrico. México.
- [24] Gobierno de la República. (Marzo de 2016). Ley de Aguas Nacionales. México: Diario Oficial de la Federación.
- [25] Gobierno de la República. (2019). CONAGUA. Retrieved from <https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/sections/Edos/sanluispotosi/sanluispotosi.html>
- [26] Gobierno del Estado de San Luis. (Mayo de 2016). Ley de Aguas para el Estado de San Luis Potosí. Decreto 476. San Luis Potosí, México: Diario Oficial Plan de San Luis.
- [27] Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2019). Periódico Oficial de San Luis Potosí. Obtenido de <http://apps.slp.gob.mx/po/>

- [28] Greene, W. (2003). *Econometric Analysis* (5a. ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- [29] Gujarati, D., & Porter, D. (2010). *Econometría* (5a. ed.). México: McGraw Hill.
- [30] IMTA, & UNAM. (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica*. Jiutepec, Morelos, México: IMTA, UNAM.
- [31] IMTA, UAG, & SEMARNAT. (2008). *La gestión de los recursos hídricos: realidades y perspectivas*. México: IMTA, UAG, SEMARNAT.
- [32] INTERAPAS. (2010 al 2015). *Informes Anuales*. San Luis Potosí, México.
- [33] Lomelí, H., & Rumbos, B. (2001). *Métodos Dinámicos en Economía. Otra búsqueda del tiempo perdido*. México: Instituto Tecnológico Autónomo de México.
- [34] Rodríguez Rodríguez, D. (2017). *Eficiencia y Legislación en la extracción de agua potable: caso de tres comunidades en el municipio de Mexquitic en San Luis Potosí*. Tesis de Licenciatura. San Luis Potosí, México: UASLP.
- [35] Roumasset, J., & Wada, C. (2010). Optimal and sustainable groundwater extraction. *Sustainability*(2), 2676-2685.
- [36] Rubio, S., Martínez, C., & Castro, J. (1994). Optimal Management of Groundwater with Increasing Demand. *Revista Española de Economía*, 11(Extra 1), 161-190.
- [37] Sánchez San Román, F. (Septiembre de 2017). Universidad de Salamanca. Hidrología. Obtenido de <http://hidrologia.usual.es>
- [38] Seierstad, A., & Sydsaeter, K. (2002). *Optimal Control Theory with Eco-*

- conomic Applications. Advanced Textbooks in Economics, 24. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
- [39] SEMARNAT. (19 de Mayo de 2010). ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de SanLuis Potosí. DOF.
- [40] SEMARNAT. (27 de Marzo de 2015). NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. DOF.
- [41] SEMARNAT, & CONAGUA. (2016). Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016. México.
- [42] Sethi, S., & Thompson, G. (2006). Optimal Control Theory, Application to Management Science and Economics (2a. ed.). United States of America: Springer.
- [43] Sitender , M., & Rajeshwari. (2015). Estimation of ground water resource of Gurgaon District. Journal of Land use and Water Management, 14(1), 25-36.
- [44] Weather Spark. (2019). Clima. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/map?id=6140&pageType=1>
- [45] Wooldridge, J. (2010). Introducción a la Econometría. Un enfoque moderno. (4a. ed.). México: CENGAGE Learning.
- [46] Zilberman, D. (1982). The use and potencial of optimal control models in agricultural economics. Western Journal of Agricultural Economics, 395-405.