

Universidad Autónoma de Baja California

Instituto de Ingeniería

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Tesis para obtener el grado de:

Doctor en Ingeniería

**“Modelización y valuación de los servicios ecosistémicos hidrológicos del
acuífero Valle de Mexicali como instrumentos de gobernanza”**

Estudiante:

M.I. Frida Sofía Cital Morales

Directora de tesis:

Dra. Jesús Eliana Rodríguez Burgueño

Codirectora de tesis:

Dra. Concepción Carreón Diazconti

Mexicali, Baja California a enero de 2023

Dedicatoria para

Dios, por darme la vida y fortaleza de seguir adelante.

mi madre, por su apoyo y amor incondicional, por alentarme a no desistir y apoyarme en todo momento.

mi padre, por su amor y apoyo.

Moisés Nicolás, por su amor, paciencia y apoyo.

Eliana, por creer en mí.

Agradecimientos a:

Eliana, por su apoyo incondicional en esta investigación, por el apoyo, compartir parte de su conocimiento conmigo, tutoría, paciencia, comprensión, por ser una fuente de inspiración, por brindarme palabras de esperanza y apoyo cuando más las necesitaba y su valiosa amistad.

Mis padres, por su apoyo incondicional, por cada una de las palabras de fortaleza y esperanza que me brindaron, por demostrarme cuanto me aman y sobre todo por su apoyo y paciencia.

Dra. Concepción Carreón por su apoyo y aportaciones a esta investigación.

Héctor, por sus contribuciones, por su amistad y por hacer mi estadía en el laboratorio divertida y menos cansada

Dr. Alfonso Rivera por su valiosa contribución en la realización de esta investigación.

Dr. Jorge por su apoyo brindando en la realización de esta investigación.

Mis compañeros del laboratorio de Ciencias de la Tierra y todos aquellos que apoyaron en alguna actividad realizada en esta investigación, por su compañía durante las salidas a campo y su apoyo.

Janeth Camacho por su apoyo con los trámites administrativos durante la realización de esta investigación.

CONACYT por brindarme la beca nacional No. 763422 para esta investigación.

Al PRODEP por el financiamiento del proyecto UABC-PTC-749 “Análisis temporal-espacial de la calidad y niveles del acuífero del Valle de Mexicali”.

Al Instituto de Ingeniería por su apoyo con recursos administrativos y financieros para la estancia de intercambio internacional.

Al Babbitt Dissertation Fellowship del Lincoln Institute of Land Policy por su apoyo con recursos financieros para esta investigación.

Al Institute National de la Recherche Cientifique por su apoyo con recursos administrativos durante la estancia de intercambio internacional.

Resumen

La escasez del agua se considera el principal problema para el desarrollo de la humanidad y uno de los principales desafíos del siglo XXI, por ello el estudio del recurso hídrico en ambientes controlados y modificados antropogénicamente es de suma importancia, como lo son las aguas subterráneas, que representan el 97% de la disponibilidad hídrica global, su conocimiento es el primer paso a la gestión integral de las aguas subterráneas. En la presente investigación se planteó como objetivo aportar elementos de gobernanza en el acuífero del Valle de Mexicali el cual se encuentra en condición de sobreexplotación, mediante el análisis de la gobernanza actual, la evaluación hidrogeológica y la valuación los servicios ecosistémicos hidrológicos que el acuífero provee en la zona de estudio. Para ello se estudiaron 1) la gobernanza del agua subterránea, que se analizó mediante los indicadores de Demanda Relativa de Agua y el Índice de Cambio de Almacenamiento y, del análisis de los marcos regulatorios normativo, institucional, hidráulico y ambiental, además de los mecanismos de participación social, 2) el análisis de las condiciones hidrogeológicas, para lo cual se construyó y calibró un modelo hidrogeológico numérico; y 3) los servicios ecosistémicos hidrológicos que proveen las aguas subterráneas mediante métodos directos e indirectos. Como resultado se encontró que, el uso del agua en la zona de estudio no es sustentable, abundan los problemas de gobernanza y consecuencias de la sobreexplotación, falta financiamiento para el monitoreo y las mediciones de las extracciones de agua subterránea y aumente la capacidad técnica y humana de las agencias y organizaciones locales. De la simulación del modelo hidrogeológico para el año 2018-2019 y 16 escenarios predictivos de gestión y manejo del agua; se encontró que el escenario con mayor efecto positivo es el de disminución de la extracción en un 38.4% que generaría en un incremento del nivel freático de hasta 2 m anuales, en cambio, los escenarios de reducciones de agua superficial del Río Colorado simuladas como cambios en la recarga de 0.08 a 10.8% y compensación de estos volúmenes con agua subterránea generarían cambios de entre -0.22 y -3.07 m anuales en el nivel freático. La valuación de los

servicios ecosistémicos se estimaron en 90'844,251 millones de dólares anuales. La presente investigación aportó elementos de gobernanza del agua, mediante la realización de un modelo hidrogeológico que permitió conocer los procesos actuales del balance e identificar los servicios ecosistémicos hidrológicos que provee. Este elemento podría ser utilizado para la toma de decisiones basadas en ciencia y las políticas públicas en materia de agua.

Abstract

Water scarcity is considered the main problem for humanity's development and one of the main challenges of the 21st century. Therefore the study of water resources in controlled and anthropogenically modified environments is of utmost importance, such as groundwater, which represents 97% of global water availability, and its knowledge is the first step to the integrated management of groundwater. The objective of this research was to provide elements of governance in the Mexicali Valley Aquifer, which is overexploited, through hydrogeological evaluation and assessment of the hydrological ecosystem services that the aquifer provides within the study area. For this purpose, we studied 1) groundwater governance, which was analyzed through the indicators of Relative Water Demand and the Storage Change Index and, from the analysis of the normative, institutional, hydraulic and environmental regulatory frameworks, in addition to the mechanisms of social participation; as a result, it was found that water use in the study area is not sustainable, there are many governance problems and consequences of overexploitation, there is a lack of financing to contribute to monitoring and measuring groundwater extractions, and to increase the technical and human capacity of local agencies and organizations; 2) the analysis of hydrogeological conditions, for which a numerical hydrogeological model was built and calibrated, hydrogeological conditions were simulated for the year 2018-2019 and 16 predictive scenarios of water management and management; the scenario with the most significant positive effect was found to be that of decreasing extraction by 38.4% would generate an increase in the water table of up to 2 m per year; on the other hand, the scenarios of surface water reductions of the Colorado River simulated as changes in recharge of 0.08 to 10.8% and compensation of these volumes with groundwater would generate changes of between -0.22 and -3.07 m per year in the water table; and, 3) the hydrological ecosystem services provided by groundwater were analyzed using direct and indirect methods, the resulting estimated value was 90'844,251 million dollars per year. The objectives of the present work were met, and it is concluded that the use of water from the

aquifer is not sustainable; however, if the volume of water withdrawn is decreased, the availability of water would increase, and the effects of the surface water cutbacks established in the Contingency Plan for Water Scarcity in the Colorado River Basin on the aquifer could be insignificant. This work provided water governance elements by developing a hydrogeological model that allowed to understand the current hydrogeologic balance processes and identify the hydrological ecosystem services it provides. This work can be used for science-based decision-making and public water policies.

Contenido

| | |
|---|----|
| Capítulo I. Introducción..... | 15 |
| Capítulo 2. Antecedentes | 19 |
| 2.1 Elementos de investigación | 28 |
| Objetivo general | 28 |
| Objetivos específicos:..... | 28 |
| Objetivo metodológico: | 28 |
| Metas | 28 |
| Hipótesis..... | 29 |
| 2.2 Área de estudio | 30 |
| 2.2.1 Descripción del área de estudio..... | 31 |
| 2.2.1.1 Clima | 31 |
| 2.2.1.2 Geología..... | 31 |
| 2.2.1.2.1 Fisiografía..... | 31 |
| 2.2.1.2.2 Materiales geológicos..... | 33 |
| 2.2.1.2.1 <i>Unidades hidrogeológicas</i> | 34 |
| 2.2.1.2.2 <i>Propiedades geohidrológicas del acuífero</i> | 35 |
| 2.2.2 Balance de agua..... | 36 |
| 2.2.2.1 Entradas de agua | 37 |
| 2.2.2.1.1 <i>Recarga</i> | 37 |
| 2.2.2.1.2 <i>Infiltración como fuente de recarga vertical</i> | 38 |

| | |
|---|----|
| 2.2.2.1.3 <i>Flujos ambientales</i> | 38 |
| 2.2.2.2 Salidas de agua | 39 |
| 2.2.2.2.1 <i>Bombeo de agua en pozos de extracción</i> | 40 |
| 2.2.2.2.2 Descarga al Río Colorado, Río Hardy y Río Nuevo..... | 40 |
| 2.2.3 Niveles de agua subterránea y su evolución | 42 |
| 2.2.4 Usos del agua..... | 44 |
| Capítulo 3. Marco teórico conceptual | 48 |
| 3.1 Hidrología | 48 |
| 1.1.1 Hidrología superficial..... | 48 |
| 1.1.2 Hidrología subterránea..... | 48 |
| 3.1.2.1 Acuífero..... | 49 |
| 3.2 Modelo y simulación | 50 |
| 3.2.1 Modelo..... | 50 |
| 3.2.2 Modelización..... | 50 |
| 3.2.2.1 Tipos de software de modelización (ventajas y desventajas)..... | 50 |
| 3.2.3 MODFLOW | 52 |
| 3.2.3.1 Ecuación gobernante | 52 |
| 3.2.3.2 Discretización..... | 56 |
| 3.2.3.1 Paquetes..... | 57 |
| 3.3 Gestión y gobernanza del agua | 61 |
| 3.3.1 Gestión | 61 |

| | |
|--|----|
| | 10 |
| 3.3.1.1 Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) | 62 |
| 3.2.2 Manejo..... | 67 |
| 3.2.3 Gobernanza del agua subterránea..... | 67 |
| 3.4 Servicios ecosistémicos..... | 68 |
| 3.4.1 Ecosistema | 68 |
| 3.4.2 Servicios ecosistémicos | 68 |
| 3.4.2.1 Servicios ecosistémicos hidrológicos..... | 69 |
| Capítulo 4. Materiales y métodos | 74 |
| 4.1. Trabajo de campo..... | 74 |
| 4.1.1 Nivelación de pozos de monitoreo | 74 |
| 4.1.2 Monitoreo de nivel piezométrico de agua subterránea | 76 |
| 4.2. Trabajo de gabinete..... | 78 |
| 4.2.1 Análisis de la información de nivel freático..... | 78 |
| 4.2.2 Análisis de la gobernanza del AVM..... | 78 |
| 4.2.2.1 Definición de indicadores..... | 79 |
| 4.2.2.2 Marco Institucional..... | 80 |
| 4.2.2.3 Análisis de la normativa hídrica | 80 |
| 4.2.2.3.1 Escenarios de usos consuntivos del agua..... | 80 |
| 4.2.3 Construcción del modelo conceptual..... | 80 |
| 4.2.3.1 Modelo litológico..... | 80 |
| 4.2.3.1.1 Recopilación, integración y unificación de registros litológicos de pozos..... | 81 |

| | |
|--|----|
| 4.2.3.1.2 Modelización estratigráfica tridimensional | 83 |
| 4.2.4 Modelo hidrogeológico numérico | 84 |
| 4.2.4.1 Definición de las condiciones de frontera | 85 |
| 4.2.4.2 Identificación de paquetes a utilizar | 85 |
| 4.2.4.3.1 Recarga | 85 |
| 4.2.4.3.2 Extracción de agua subterránea | 88 |
| 4.2.4.3.3 Evapotranspiración | 90 |
| 4.2.4.3.4 Río | 90 |
| 4.2.4.7 Simulación..... | 93 |
| 4.2.4.7.1 Calibración inversa | 94 |
| 4.2.4.7.2 Corrida de escenarios de los usos consuntivos del agua | 94 |
| 4.2.5 Servicios ecosistémicos | 94 |
| 4.2.5.1 Definición e indicadores para identificación y valuación | 94 |
| 4.2.5.1.1 Servicio de aprovisionamiento de aguas para uso agrícola..... | 95 |
| 4.2.5.1.2 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso industrial | 95 |
| 4.2.5.1.3 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso doméstico, urbano y rural | 96 |
| 4.2.5.1.4 Conservación de agua | 97 |
| 4.2.5.1.5 Purificación de agua..... | 97 |
| 4.2.5.1.6 Recreación..... | 98 |
| Capítulo 5. Resultados y discusión..... | 99 |
| 5.1 Trabajo de campo..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| 5.1.1 Monitoreo de los niveles piezométricos de agua subterránea | 99 |
| 5.2 Trabajo de gabinete..... | 102 |
| 5.2.1 Análisis de la información de nivel freático..... | 102 |
| 5.2.2 Análisis de la gobernanza del AVM..... | 103 |
| 5.2.2.1 Definición de indicadores..... | 103 |
| 5.2.2.2 Marco Legal..... | 103 |
| 5.2.2.3 Marco Institucional..... | 104 |
| 5.2.2.4 Instrumentos de gestión | 109 |
| 5.2.2.4.1 Programas Hídricos Nacionales y Regionales..... | 109 |
| 5.2.2.4.2 Registro Público de Derechos de Agua..... | 110 |
| 5.2.2.4.3 Veda | 111 |
| 5.2.2.4.4 Plan Integral de los acuíferos Valle de Mexicali y San Luis Río Colorado .. | 111 |
| Escenarios de usos consuntivos del agua | 111 |
| 5.2.3 Modelo conceptual | 112 |
| 5.2.4 Modelo hidrogeológico numérico | 113 |
| 5.2.4.1 Condiciones del medio físico | 114 |
| 5.2.4.2 Condiciones de frontera..... | 115 |
| 5.4.2.1 Recarga (RCH) | 116 |
| 5.4.2.2 Extracción (WEL)..... | 116 |
| 5.4.2.3 Evapotranspiración (ET) | 116 |
| 5.4.2.4 Río (RIV)..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| 5.4.2.5 Dren..... | 117 |
| 5.4.2.6 Frontera de carga general (GHB)..... | 118 |
| 5.2.4.3 Simulación..... | 118 |
| 5.2.5 Servicios ecosistémicos | 122 |
| 5.2.5.1 Servicios de provisión..... | 122 |
| 5.2.5.1.1 Servicio de aprovisionamiento de aguas para uso agrícola..... | 122 |
| 5.2.5.1.2 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso industrial | 125 |
| 5.2.5.1.3 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso doméstico, urbano y rural | 126 |
| 5.2.4.2 Servicios ecosistémicos de regulación | 127 |
| 5.2.4.2.1 Conservación de agua | 127 |
| 5.2.4.2.2 Purificación de agua..... | 127 |
| 5.2.4.3 Servicios ecosistémicos culturales | 128 |
| 5.2.4.3.1 Recreación..... | 128 |
| Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones | 130 |
| Capítulo 7. Referencias | 132 |
| Anexo 1. Profundidad al nivel freático en los pozos de monitoreo. | 144 |
| Anexo 2. Condiciones del medio físico asignadas al modelo..... | 152 |
| Anexo 3. Datos de entrada al paquete Recarga (RCH) | 154 |
| Anexo 4. Datos de entrada al paquete Extracción (WEL) | 155 |
| Anexo 5. Datos de entrada al paquete Río (RIV)..... | 156 |
| Anexo 6. Datos de entrada al paquete Dren (DRN) | 165 |

| | |
|--|-----|
| Anexo 7. Datos de entrada al paquete GHB..... | 170 |
| Anexo 8. Descripción del reservorio de agua..... | 179 |

Capítulo I. Introducción

Desde el comienzo del siglo XXI la humanidad tiene conciencia de que vive con recursos naturales limitados, esto debido al incremento en la demanda de los recursos ocasionado por el creciente aumento de la población y la expansión de los sistemas de producción altamente consumidores de materiales y energéticos, así como productores de residuos y contaminantes (Dell'Angelo, Rulli y D'Odorico, 2018). La escasez de los recursos hídricos se considera el principal problema para el desarrollo de la humanidad ya que su uso ha aumentado seis veces más en los últimos 100 años, además de que una quinta parte de la población mundial actual no tiene acceso al agua (WWAP, 2018).

El agua, ha sido definida como uno de los principales desafíos del siglo XXI. Es considerada un recurso único que apuntala todos los motores de crecimiento (agrícola, energético, industrial, entre otros) y que, además conecta los diferentes sectores en un sistema que debe equilibrar el desarrollo social, económico y los intereses ambientales. De tal forma que la decisión de asignar más agua a cualquier sector implica que disminuirá la disponibilidad para otros usos económicos, suministro público, servicios sociales y para la protección ambiental (World Economic Forum, 2018). Para el siglo XXI, se determinaron seis principales retos relacionados con el agua: 1) la escasez; 2) la falta de acceso; 3) el deterioro de su calidad; 4) concientización por parte de los tomadores de decisiones; 5) la disminución de recursos financieros y 6) la fragmentación en su manejo (WWC, 2000).

Derivado de lo anterior, el estudio de los recursos hídricos en ambientes controlados y modificados antropogénicamente, es de suma importancia, sobre todo cuando se trata de las fuentes que abastecen a las poblaciones y a las principales actividades económicas. Este es el caso de las aguas subterráneas, las cuales constituyen la mayor reserva de agua dulce en el mundo y representan más del 97% del total de agua disponible en el planeta, excluyendo los glaciares y casquetes polares. El 3% restante corresponde a aguas superficiales como lagos, ríos, humedales y humedad en el suelo (Comisión Europea, 2008). Del volumen total de agua

dulce disponible en el planeta, aproximadamente el 69% es utilizado en el sector agropecuario, 19% en la industria y únicamente el 12% en el sector municipal (CONAGUA, 2017).

A medida que aumenta la dependencia y el uso del agua subterránea, los administradores y políticos responsables deben prestar mayor atención a la cantidad y calidad de esta (Megdal, 2018). El conocimiento de los sistemas acuíferos es un primer paso a la gestión integral de las aguas subterráneas (RIOG y GWP, 2012), el carente conocimiento limita la gobernanza de este recurso, por lo tanto, es necesario coadyuvar esfuerzos para mejorar las estimaciones del almacenamiento del agua subterránea.

Mientras tanto y a consecuencia de esta situación, actualmente una tercera parte de los sistemas de agua subterráneas más grandes en el mundo se encuentran en situación de peligro (Richey et al., 2015) y los desafíos físicos del agua subterránea se hacen cada vez más evidentes. Por ejemplo, la sobreexplotación por el bombeo excesivo, la contaminación, la degradación del acuífero y de sus funciones ecológicas y ambientales (FAO, 2016b).

Las aguas subterráneas juegan un papel fundamental en el bienestar humano y en el desarrollo sustentable de los ecosistemas y la sociedad, una forma de pensar beneficios potenciales que proporciona el agua es en términos de servicios ecosistémicos (SE) (Young y Loomies, 2014). Algunos de los SE que brindan las aguas subterráneas son la provisión de agua, la mitigación ante inundaciones y sequías, la provisión de flujo base para el mantenimiento de ecosistemas y biodiversidad, la purificación de agua, actividades culturales y recreativas, entre otros (CGIAR, 2015; Griebler y Avramov., 2015; 2019; Yang y Liu, 2020; Favretto et al., 2016). En el planeta, el sector agrícola es el usuario con mayor demanda y asignación de agua y al mismo tiempo es el principal impulsor del agotamiento de las aguas subterráneas a nivel global (WWAP, 2018). En México, las aguas del subsuelo representan el 16% de la disponibilidad hídrica del país (CONAGUA, 2017) y aproximadamente el 39.2% del volumen total concesionado para usos consuntivos por año procede de esta fuente (CONAGUA, 2019). Administrativamente, están divididas en 653 acuíferos, de los cuales 115 de ellos se encuentran con en estado de

sobreexplotación de sobreexplotación ([CONAGUA, 2019](#)), además de que, de acuerdo con la [ONU Medio Ambiente \(2018\)](#) cuenta con una implementación a nivel nacional de la gestión integral de los recursos hídricos (GIRH) media-baja, situación que hace evidente la urgencia de implementar estrategias para la gestión integral. Algunos de los desafíos de implementación y deficiencias son; 1) falta de coordinación y armonización entre los sectores relacionados con el agua y las partes interesadas, 2) financiación insuficiente, 3) capacidad reducida de las instituciones para vigilar el cumplimiento de la legislación, así como para desarrollar e implementar los programas intersectoriales, 4) monitoreo insuficiente y falta de intercambio de datos e información, 5) marcos jurídicos desfasados y/o ineficaces, y 6) escasa apreciación del valor de la implementación de la GIRH entre los sectores relacionados con el agua y las instituciones gubernamentales ([PNUMA, 2021](#)).

Cabe resaltar que México se caracteriza por ser de los países con mayor infraestructura de riego en el mundo ([CONAGUA, 2017](#)), particularmente en la zona norte, como el Valle de Mexicali, uno de los valles más productivos a nivel nacional, que utiliza como fuentes de abastecimiento de agua en un 72.9% el agua superficial del Río Colorado y 27.1% de agua subterránea de los acuíferos Valle de Mexicali (VM) y Valle de San Luis Río Colorado (VSLRC) para el riego de cultivos ([CEA, 2016](#)).

De acuerdo con cifras oficiales, el AVM se encuentra sobreexplotado y bajo el fenómeno de salinización de suelos y presencia de agua subterránea salobre ([CONAGUA, 2017](#); [DOF, 2018](#)). Pese a estas condiciones el volumen de agua extraída del acuífero no es contabilizada de manera sistemática, ya que no se cuenta con mediciones y, los estudios que sobre este acuífero ([Jacobo Villa, 1990](#); [Díaz, 2001](#); [Pérez González, 2008](#); [Rodríguez-Burgueño, 2012](#); [CONAGUA, 2015b](#)) se basan en información antigua procedente del estudio realizado por [Ariel \(1968\)](#), por lo que no se cuenta con una actualización de las características geohidrológicas del acuífero.

Generalmente las estimaciones de agua subterránea se centran en el estudio de un acuífero a la vez, despreciando de cierta forma las interacciones que ocurren entre acuíferos, o bien, con el agua superficial. Sin embargo, es conocido que, el bombeo excesivo y continuo, así como la falta de prácticas de gobernanza y gestión ([Megdal, 2018](#)), generan afectaciones en los acuíferos adyacentes y en las aguas superficiales, provocando un desequilibrio en los sistemas hidrológicos ([Neven, 2009](#)). Incluidos aquellos que comparten sus recursos hídricos entre países, estados o municipios, como lo es el acuífero del Valle de Mexicali que se encuentra delimitado administrativamente dentro de una unidad geohidrológica trasfronteriza.

Los modelos hidrogeológicos son instrumentos de gobernanza de las aguas subterráneas puesto que brindan información cuantitativa del estado del acuífero, ayudan a identificar y comprender los procesos e interacciones que ocurren en el mismo y son imprescindibles en la predicción de las consecuencias de cambios en el sistema, aunado a estos modelos se encuentran las evaluaciones de los sistemas sociales, normativos, institucionales y de participación ciudadana nos permiten comprender el comportamiento de los usuarios y de las partes interesadas con la finalidad de promover el cuidado del agua y concientizar sobre su valor y su importancia en la prestación de los servicios ecosistémicos hidrológicos que brinda para garantizar una gestión y manejo eficaz hacia un futuro con seguridad hídrica ([GWP, 2018](#)).

Capítulo 2. Antecedentes

En México, el recurso hídrico se divide en aguas del subsuelo (subterráneas) y superficiales (ríos, lagos, cauces, embalses, etc.), ambas denominadas Aguas Nacionales en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Artículo 27), el órgano administrativo y normativo de estas fuentes es la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Con la finalidad de administrar, gestionar, manejar y preservarlas, desde 1997 el país se dividió en 13 Regiones Hidrológicas Administrativas (RHA) (CONAGUA, 2017). Las RHA son áreas formadas por agrupaciones de cuencas hidrológicas, consideradas como unidades básicas para la gestión de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos. Los límites territoriales de las RHA respetan los límites municipales (CONAGUA, 2017).

Es importante resaltar que, de manera general, a nivel nacional, el grado de presión hídrica es bajo (19.2%) (CONAGUA, 2017). Sin embargo, la distribución espacio temporal del recurso hídrico provoca que el promedio nacional no represente las condiciones particulares algunas RHA. Tal es el caso de las RHA donde el porcentaje de presión hídrica sobrepasa la clasificación de alta (mayor al 40%), en Aguas del Valle de México (139.20%), Noroeste (81.60%) y Península de Baja California (81.20%) (CONAGUA, 2017). Aunado a los altos grados de presión hídrica, existe otra serie de condiciones, como la sequía hidrológica, fenómeno que impacta en la disponibilidad de las aguas nacionales.

El estado de Baja California, al igual que el municipio de San Luis Río Colorado, Sonora (SLRC), se ubican dentro de la RHA Península de Baja California definida como la tercera con mayor presión hídrica a nivel nacional, además, presenta condiciones de sequía hidrológica que van desde severa a extrema (SMN, 2018), en el área de esta región habitan 3'315,766 personas (INEGI, 2010).

Para el abastecimiento de agua potable, Baja California enfrenta un reto doble, por un lado, las condiciones de escasez de agua y, por el otro, las elevadas tasas de crecimiento poblacional.

Sus principales fuentes de abastecimiento son dos: 1) el agua superficial del Río Colorado (RC), cuya cuenca es binacional y sus aguas se reparten entre México y Estados Unidos; y 2) los acuíferos VM y VSLRC, ambos se encuentran en condición de sobreexplotación (DOF, 2020).

Para fines de administración de aguas superficiales, Baja California posee 7 regiones hidrológicas, 1) Baja California Noroeste; 2) Centro-Oeste; 3) Suroeste; 4) Noroeste; 5) Centro-Este; 6) Sureste y 7) Río Colorado. Esta última considerada como la más importante debido a que representa el mayor volumen de agua disponible en el Estado (CONAGUA, 2010).

Respecto a las aguas subterráneas, en el estado de Baja California existen 87 acuíferos, de los cuales 18 se encuentran en déficit, 8 de ellos sobreexplotados y 10 bajo el fenómeno de salinización y/o intrusión salina (DOF, 2018). Entre los sobreexplotados y bajo el fenómeno de salinización de suelos y con presencia de agua subterránea salobre destaca el acuífero Valle de Mexicali (VM) por tener el mayor déficit a nivel de RHA, el cual actualmente es de aproximadamente 265 hm³ anuales (DOF, 2018). Además, el AVM desde el año 1965 se encuentra sujeto a las disposiciones del Decreto por el que se establece veda tipo III para el alumbramiento de aguas del subsuelo de Baja California (DOF, 1965). Esta veda establece que la capacidad del acuífero permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. Además, menciona que:

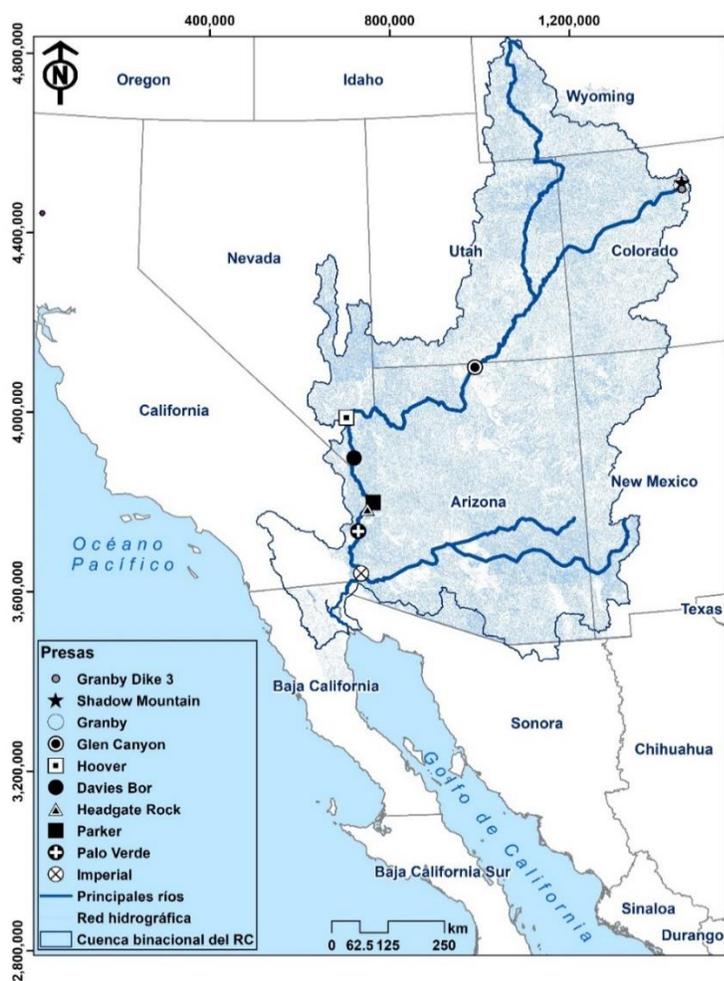
“Excepto cuando se trate de alumbramientos para usos domésticos, desde la vigencia de este decreto nadie podrá extraer aguas del subsuelo dentro de la zona vedada ni modificar los aprovechamientos existentes sin previo permiso por escrito de la autoridad del agua, la que sólo concederá permisos únicamente en los casos en que los de los estudios relativos se concluya que no se causarán los perjuicios que con el establecimiento de la veda tratan de evitarse” (DOF, 1965).

Las condiciones de sobreexplotación del acuífero han sido propiciadas por una serie de factores que afectan la dinámica geohidrológica natural. Uno de estos factores es la reducción

de las descargas de aguas superficiales del RC debido a la construcción de infraestructura hidráulica para el control, derivación y almacenamiento de sus flujos (Hinojosa-Huerta y Carrillo-Guerrero, 2010).

El RC nace en las montañas rocallosas, en los Estados Unidos, y recorre 2,300 km en dirección Suroeste, pasando por los estados de Wyoming, Colorado, Utah, Nevada, Arizona y California en Estados Unidos y por Baja California y Sonora en México. Los últimos 140 km del cauce del RC se encuentran en la porción mexicana terminando su recorrido en el Golfo de California (Figura 1).

Figura 1 Cuenca hidrológica del RC y principales construcciones de infraestructura hidráulica.



El cauce del RC se ve interrumpido por 25 presas de almacenamiento, cuya capacidad es de cuatro veces más su volumen de captación anual (Hinojosa-Huerta y Carrillo-Guerrero, 2010). Por su capacidad de almacenamiento las principales presas son Hoover (construida en 1935) y Glen Canyon (1963) y, por ser la última en su recorrido la Presa Derivadora Morelos (1950) que deriva el 90% de las aportaciones de agua superficial del RC a México. La premisa principal de la regulación y el control de los flujos del agua del RC es mejorar el aprovechamiento y fomentar el desarrollo agrícola y urbano.

Bajo la misma visión del desarrollo agrícola, se inicia la extracción de agua subterránea, los primeros pozos de los que se tienen registros fueron construidos en 1950, sin embargo, iniciaron operaciones hasta 1957, por lo que se considera este año como el inicio de la extracción de agua subterránea del AVM (Ariel, 1968). A partir de 1957 y hasta 1960 el bombeo de agua subterránea en el AVM fue de 780 hm³, posteriormente, entre 1961 y 1968 el volumen extraído del acuífero aumentó registrándose en promedio un bombeo de 1,127 hm³ por año.

Dicho incremento en la extracción ocasionó un aumento de la salinidad del agua, la preocupación de las autoridades se hizo evidente ante esta situación por lo que se realizó el estudio denominado "*Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos del Valle de Mexicali, B.C. y Mesa de San Luis, Son*" (Ariel, 1968) para la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (SARH).

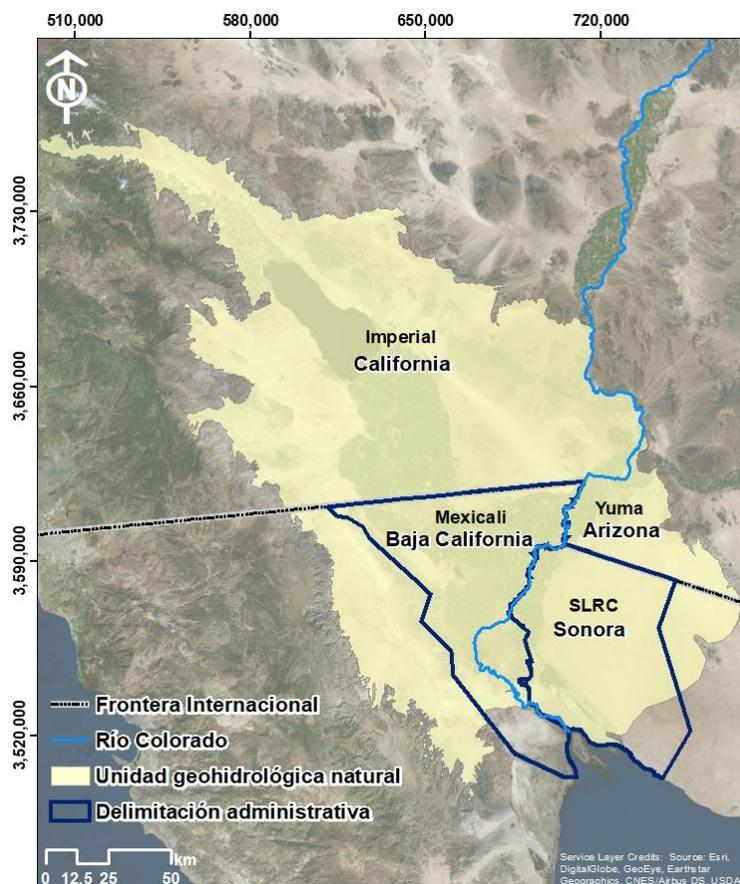
El estudio de Ariel (1968) es uno de los más relevantes en cuanto a la obtención de nuevo conocimiento sobre la hidrogeología de los acuíferos Valle de Mexicali y Mesa de San Luis. Entre la información más importante se encuentran la descripción geológica, los datos geofísicos, algunos parámetros geohidrológicos del acuífero, el carácter geoquímico del agua subterránea, así como la estimación de los flujos de entrada y salida en el balance hidrológico del acuífero. Las conclusiones de estudio fueron que el balance de agua subterránea acotaba la explotación del acuífero a 700 hm³, razón por la que se redujeron las extracciones de volúmenes de agua y se tomaron medidas para alcanzar el nivel freático deseado. A partir de

ese año el acuífero Valle de Mexicali se declaró como sobreexplotado, y el volumen concesionado administrativamente se limitó a los 700 hm³ (CONAGUA, 2006)

Cabe mencionar que, en el estudio de Ariel (1968), el acuífero Valle de Mexicali y la Mesa de San Luis (Valle de San Luis Río Colorado) eran considerados como una unidad hidrogeológica, es decir, subdivisiones litoestratigráficas con un conjunto de estratos geológicos hidráulicamente conectados entre sí, sin embargo, para fines administrativos de manejo, gestión y evaluación se definen convencionalmente los límites de estos acuíferos partiendo de los límites territoriales. De acuerdo con la información hidrogeológica natural, los acuíferos de los Valles de Mexicali, San Luis Río Colorado, Imperial y Yuma, pertenecen a la misma unidad (Figura 2), considerada como el acuífero transfronterizo de la Cuenca Baja del Río Colorado (UNESCO, 2007). Administrativamente, este acuífero está dividido por los límites fronterizo entre México y Estados Unidos, así como por los límites estatales entre Mexicali-San Luis Río Colorado e Imperial-Yuma.

La división administrativa del acuífero en la porción mexicana es un hecho relativamente nuevo. En el año 2001 se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) los vértices del acuífero Valle de Mexicali (0210), en los cuales se elimina la porción correspondiente al acuífero Mesa de San Luis, y, cinco años más tarde, se publicaron las coordenadas oficiales del acuífero denominado Valle de San Luis Río Colorado (2601).

Figura 2 Acuífero transfronterizo Cuenca Baja del Río Colorado (Datos vectoriales de Molina-Saldivar (2018)).



A partir de la publicación del [DOF \(2006\)](#) los acuíferos se consideraron como diferentes unidades administrativas. Sin embargo, el balance de agua subterránea del AVM contabiliza las entradas de provenientes de los tres acuíferos (SLRC, Imperial y Yuma), siendo la más importante, por volumen de recarga, la del acuífero Imperial, debido al aporte de las infiltraciones del Canal Todo americano (CTA) hacia el AVM. Sin embargo, en el 2006 el gobierno de Estados Unidos culmina el revestimiento con concreto de una sección de 37 km del CTA, con la finalidad de evitar pérdidas por infiltración. Las consecuencias previstas de este evento, como ya se habían previsto desde 1990 ([Jacobo Villa, 1990](#)), serían la reducción de la

recarga al acuífero y abatimientos del nivel freático, así como la modificación de la calidad del agua subterránea ([Jacobo Villa, 1990](#); [Cázares Zepeda, 2008](#); [Peregrina, 2010](#)).

Se infiere que la disminución de la recarga de agua del CTA representó uno de los tantos problemas relacionados con la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico en la región, que van de la mano con la gestión y el manejo no solo del AVM, sino de los tres acuíferos adyacentes. Lo anterior, aunado a la presión hídrica que existe entre los distintos actores sociales y económicos, ya sea por razones de disponibilidad o de calidad, o bien, por la creciente demanda inducida por el crecimiento poblacional o actividades económicas ([Van de Shoik, 2007](#)).

Dado el dinamismo de los componentes del balance geohidrológico, derivados del manejo, el control y la gestión de los acuíferos adyacentes, así como de las actividades propias en el acuífero del VM, es imperioso identificar y estudiar dichas variables, así como contar con herramientas para evaluarlas tales como lo son los modelos conceptuales y matemáticos del acuífero. Ante esta situación, en años posteriores (de 1990 a 2018) se han realizado esfuerzos por conocer la dinámica del acuífero Valle de Mexicali, aunque algunos de ellos abordan únicamente una porción de este y se resumen brevemente a continuación.

[Jacobo Villa \(1990\)](#) realizó un modelo matemático utilizando el código PLASMER 4 para simular el comportamiento del acuífero Valle de Mexicali y se simularon diferentes escenarios de manejo del agua, entre ellos, el revestimiento del CTA y la anulación del flujo subterráneo por la frontera con Yuma, Arizona. Años más tarde, [Díaz \(2001\)](#) simula el acuífero superior del Valle de Mexicali utilizando el código MODFLOW; los parámetros geohidrológicos utilizados se obtuvieron de la exhaustiva revisión de la litología de la zona de estudio.

Con un enfoque en la sustentabilidad y dirigido específicamente en la incorporación del estudio de la zona ribereña del Delta del Río Colorado, [Feirstein et al., \(2008\)](#) realizó una simulación en MODFLOW 2005 de las condiciones del agua subterránea en el Delta del Río Colorado, en esta simulación la evapotranspiración ribereña se incorporó y analizó en un modelo por primera

vez. Con un enfoque similar, [Pérez-González \(2008\)](#) modelizó el sistema hidrológico Río Colorado-acuífero en el tramo entre el Ferrocarril Mexicali-Peñasco y Vado Carranza.

Con la finalidad de analizar la relación entre el acuífero regional del VM y la zona riparia del DRC, [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#) desarrolló un modelo geohidrológico en MODFLOW 2005 del acuífero del VM con un refinamiento de malla (utilizando el LGR, por sus siglas en inglés) en la zona de restauración comprendida entre el Ferrocarril Mexicali-Peñasco y Vado Carranza, la cual era de interés por los planes de restauración de ese sitio, este modelo utilizaba como base la información geohidrológica de [Díaz \(2001\)](#) y [Feirstein et al., \(2008\)](#). En [Rodríguez-Burgueño \(2017\)](#) se evaluaron los efectos hidrológicos superficiales y subterráneos de los flujos ambientales (flujo pulso y flujo base) en la zona seca del cauce del Río Colorado, utilizando MODFLOW 2005 y el paquete de Difusión de onda (DFW por sus siglas en inglés). [Mohammed-Bushira \(2018\)](#) desarrolló la modelización del agua subterránea con MODFLOW-OVHM en un módulo de riego utilizando como base el modelo de [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#) del AVM, la finalidad de este estudio fue la de analizar el balance de agua subterránea a nivel módulo para proponer mejoras en el uso del recurso hídrico por parte del sector agrícola.

En la [figura 3](#) se presenta un concentrado en forma de línea de tiempo de las modelizaciones realizadas en el acuífero Valle de Mexicali, así como los objetivos de estos.

Figura 3

Línea de tiempo de los modelos numéricos del acuífero Valle de Mexicali



2.1 Elementos de investigación

Objetivo general

Aportar elementos de gobernanza en el acuífero del VM mediante la evaluación hidrogeológica y la valuación los servicios ecosistémicos hidrológicos que el acuífero provee dentro de los límites la zona de estudio.

Objetivos específicos:

1. Analizar la gobernanza del agua subterránea en la zona de estudio.
2. Construir, calibrar y simular un modelo numérico de la región hidrogeológica de la zona de estudio.
3. Establecer y analizar diferentes escenarios del manejo y la gestión del agua en los usos consuntivos de la zona de estudio.
4. Identificar y valorar los servicios ecosistémicos hidrológicos en la zona de estudio.
5. Determinar elementos de gestión para el bien hídrico en la zona de estudio.

Objetivo metodológico:

Simular las condiciones hidrogeológicas del acuífero en la zona de estudio, bajo diferentes escenarios de manejo y de gestión del bien hídrico, utilizando el programa MODFLOW.

Metas

Para el objetivo específico 1.

1. Recopilar y analizar la información bibliográfica sobre la gobernanza de la zona de estudio.
2. Analizar los marcos regulatorio, normativo, institucional, hidráulico y ambiental.
3. Identificar y analizar los mecanismos de participación social en la zona de estudio.
4. Estimar índices para evaluar la gestión del uso del agua en la zona de estudio.

Para el objetivo particular 2.

1. Recopilar información antecedente de modelos de agua subterránea realizados dentro de la zona de estudio.
2. Obtener las propiedades geohidrológicas del área de estudio.
3. Definir el modelo conceptual de la zona de estudio.
4. Estimar y analizar el balance geohidrológico de la zona de estudio.

Para el objetivo específico 3.

1. Definir escenarios de manejo y de gestión del recurso hídrico en el área de estudio.
2. Simular los escenarios en el modelo construido.

Para el objetivo específico 4.

1. Identificar los servicios ecosistémicos hidrológicos proporcionados por el agua subterránea en la zona de estudio.
2. Valuar los servicios ecosistémicos hidrológicos identificados.

Para el objetivo específico 5.

1. Analizar los resultados de los escenarios simulados.
2. Identificar acciones de manejo y de gestión para el uso sustentable del bien hídrico.
3. Aportar elementos de gestión del bien hídrico enfocados en los tomadores de decisiones de diferentes ámbitos.

Hipótesis

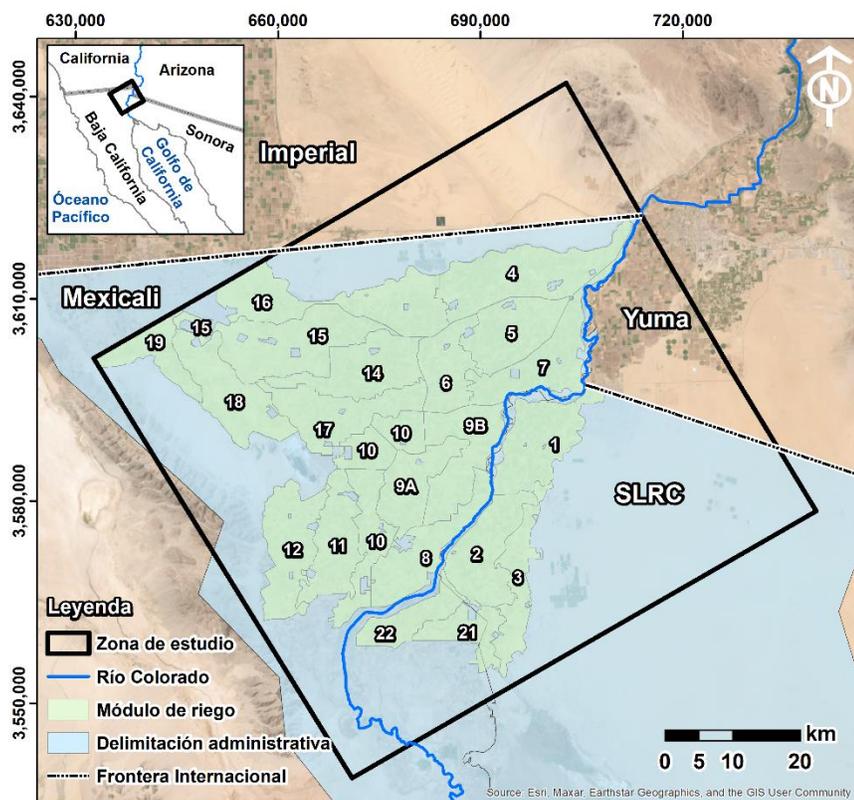
La modelización y simulación de las condiciones hidrogeológicas en la zona de estudio permite evaluar y analizar los servicios ecosistémicos hidrológicos que provee, además, de aportar elementos de manejo y de gestión para el uso sustentable del bien hídrico en la región.

2.2 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la delimitación administrativa oficial del acuífero Valle de Mexicali y parcialmente de la del acuífero Valle de San Luis Río Colorado (indicada en la [Figura 4](#) como dominio del modelo), ambos colindan al Norte con Estados Unidos y están en los valles agrícolas de Mexicali, Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora; entre las coordenadas 621,385 y 711,385 Este y 3'516,140 y 3'636,140 Norte.

La superficie en estudio es de aproximadamente 2,673 km², de los cuales 2,304 km² se encuentran en Mexicali y 368 km² en San Luis Río Colorado. Esta superficie forma parte del DR014 Río Colorado, el que a su vez está dividido administrativamente en 23 módulos de riego ([Figura 4](#)).

Figura 4 Localización geográfica del área de estudio, incluidas sus divisiones administrativas.



2.2.1 Descripción del área de estudio

2.2.1.1 Clima

La zona de estudio se caracteriza por su clima, particularmente por las temperaturas extremas, que van desde los 0°C hasta los 50°C, así como por tener una precipitación promedio anual de 65 mm y 58 mm para Mexicali y San Luis Río Colorado, respectivamente ([CONAGUA, 2015b](#)).

2.2.1.2 Geología

2.2.1.2.1 Fisiografía

El Valle de Mexicali debe su origen a una cuenca estructural se formó a consecuencia de la definición del nuevo límite entre las placas del Pacífico y Norteamericana y la incorporación de la Península de Baja California a la placa del Pacífico. Dicho proceso comenzó entre 10 y 12 millones atrás y se completó hace 3 a 4 millones de años ([Stock and Hodges, 1989](#)) y que fue rellenada principalmente por sedimentos continentales depositados por el RC ([Ariel, 1968](#)).

La zona de estudio se localiza en la Provincia Geológica denominada Delta del Río Colorado (DRC) ([UNAM, 1992](#)). En ella se distinguen cuatro unidades fisiográficas ([Figura 5](#)): 1) la planicie de inundación del RC, 2) las mesetas, 3) los abanicos aluviales y 4) los macizos montañosos de las sierras circundantes ([Ariel, 1968](#)).

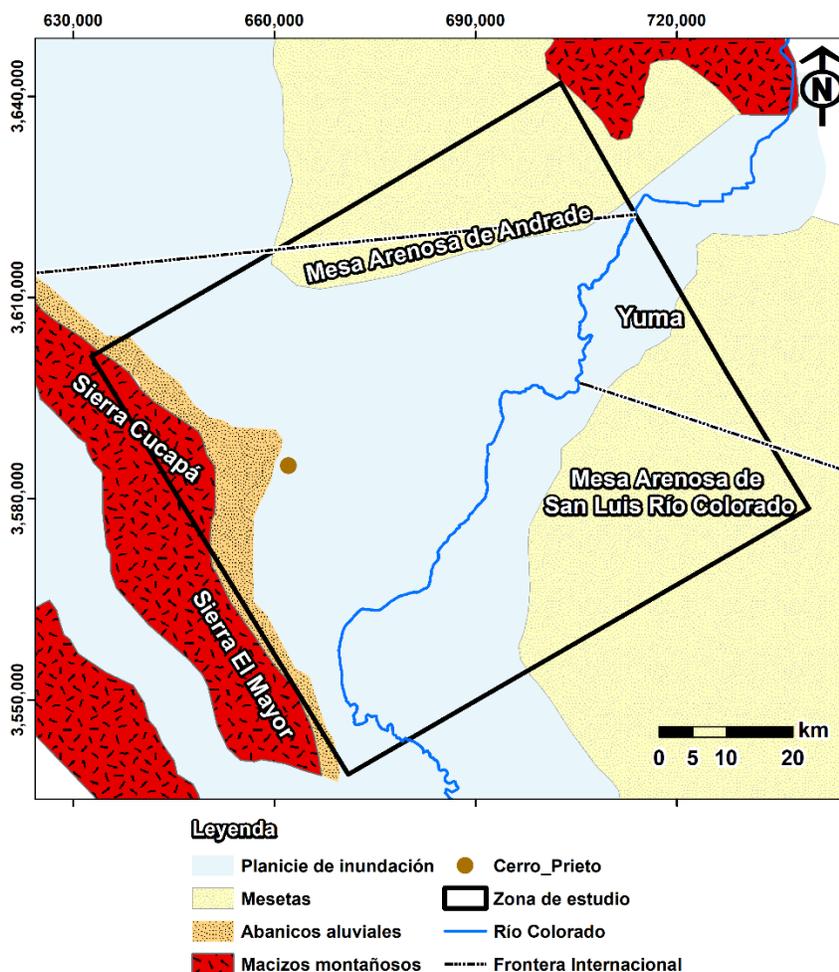
La planicie de inundación es atravesada por el RC en dirección Noreste- Suroeste y está constituida por materiales granulares, principalmente limos, arenas y arcillas y en menor proporción gravas de diferentes tamaños. Incluye terrígenos depositados en diferentes ambientes geológicos: 1) ambientes de planicie aluvial (deltaica) dominada por mareas, 2) ambientes de planicie aluvial dominada por el río, 3) depósitos de abanicos aluviales y 4) depósitos eólicos ([IMTA, 2018](#)).

Las mesetas se encuentran en la porción del Noroeste (Mesa Arenosa de San Luis Río Colorado) y al Norte del VM (Mesa de Arenosa de Andrade). Al Sur del VM, en la porción

oriente de la Sierra Cucapá y el Mayor se ubican los abanicos aluviales asociados a las diversas corrientes intermitentes que descienden de la sierra (Ariel, 1968).

Los macizos montañosos corresponden a las sierras Cucapá y El Mayor, localizadas al occidente del VM, están conformados por un complejo metamórfico de esquistos micáceos y pizarras de edad Paleozoico-Mesozoico intrusionado por granitoides cretácicos, ambos tipos de roca conforman el basamento en el borde occidental del VM (Barnard, 1968 y Díaz, 2001). En las proximidades a estos complejos, existe un afloramiento andesítico basáltico de edad del Cuaternario, conocido como Cerro Prieto, ligado a la actividad geotérmica (Ariel, 1968).

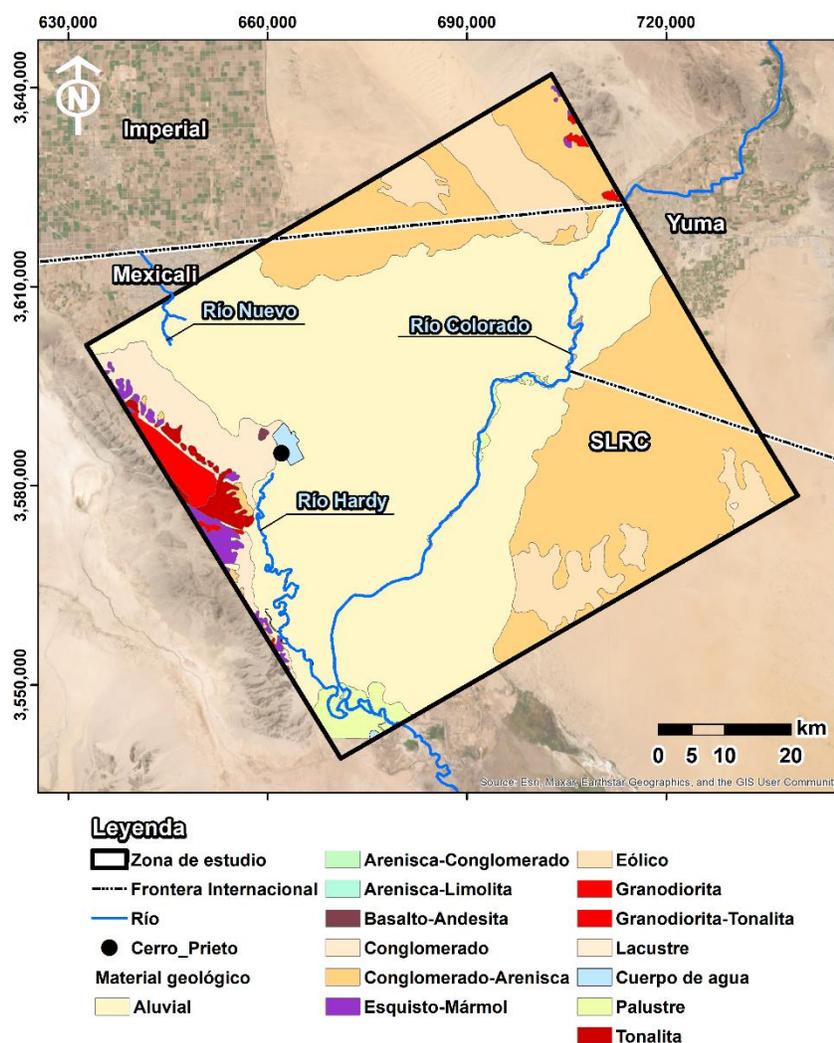
Figura 5 *Fisiografía del Valle de Mexicali. Modificada de Ramírez-Hernández, (1997).*



2.2.1.2.2 Materiales geológicos

De acuerdo con las cartas geológicas I1112 e I1103 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 1982) y de la carta Geológica-Minera del Servicio Geológico Nacional (SGM, 1997), los materiales que predominan en el área de estudio son principalmente de tipo aluvial, eólico y menor proporción, al Sur del VM se puede encontrar material lacustre (Figura 6).

Figura 6 Tipos de materiales geológicos presentes en la zona de estudio (datos espaciales de SGM, 1997 y USGS, 2010).



2.2.1.2.1 Unidades hidrogeológicas

- 1) **Planicies de inundación**, constituyen la unidad hidrogeológica regional de mayor importancia debido a que hospedan al acuífero en explotación y en ellas están ubicados la mayor parte de los pozos de extracción. Esta unidad está conformada por sedimentos aluviales no consolidados de al menos 1,000 m de profundidad que presentan variaciones transicionales en dirección poniente a oriente, desde materiales muy finos (arcillas) a gruesos (gravas de diferentes tamaños), su conductividad hidráulica se ha reportado en un rango entre 8 m/d a 8,640 m/d y el coeficiente de almacenamiento de 0.05 a 0.2 ([Ariel, 1968](#); [Díaz, 2001](#); [CONAGUA, 2006](#); [CONAGUA, 2015b](#)).
- 2) **Mesetas eólicas**, es una unidad local conformada por sedimentos de origen eólico como arenas finas a medias que presentan buenas condiciones para la infiltración superficial. La conductividad hidráulica de estos sedimentos se ha reportado en un rango entre 8 a 8,640 m/d y el coeficiente de almacenamiento de 0.05 a 0.2 ([Ariel, 1968](#); [Díaz, 2001](#); [CONAGUA, 2006](#); [CONAGUA, 2015b](#)).
- 3) **Abanicos aluviales**, esta unidad constituye los límites permeables en la frontera Oeste del acuífero, está constituida por materiales más gruesos que van desde arenas hasta gravas. Estos sedimentos presentan buenas condiciones para la infiltración superficial, cuya conductividad hidráulica reportada es de 200 a 10,000 m/d y el coeficiente de almacenamiento entre 0.2 a 0.3 ([Ariel, 1968](#); [Díaz, 2001](#); [CONAGUA, 2006](#); [CONAGUA, 2015b](#)).
- 4) **Terrazas fluviales**, esta unidad local está conformada por sedimentos finos a medios adyacentes de los ríos Colorado, Hardy y Nuevo. A pesar de que su extensión es limitada constituyen importantes zonas de recarga debido para los escurrimientos que presentan los ríos. La conductividad hidráulica de estos sedimentos se ha reportado en

un rango entre 8 a 8,640 m/d y el coeficiente de almacenamiento de 0.05 a 0.2 (Ariel, 1968; Díaz, 2001; CONAGUA, 2006; CONAGUA, 2015b).

- 5) **Acuitardo**, esta unidad conforma el basamento del acuífero. Está constituido por lutitas, areniscas y limolitas fracturadas cuya importancia desde el punto de vista de explotación de aguas es limitada (Ariel, 1968; Díaz, 2001; CONAGUA, 2006; CONAGUA, 2015b).
- 6) **Rocas cristalinas**, esta unidad constituye el basamento al Oeste de la zona de estudio. Está conformada por rocas que funcionan como barreras al flujo de agua, por lo que su conductividad hidráulica es prácticamente nula (Ariel, 1968; Díaz, 2001; CONAGUA, 2006; CONAGUA, 2015b).

2.2.1.2 Propiedades geohidrológicas del acuífero

Las propiedades geohidrológicas de la zona de estudio han sido estudiadas ampliamente en trabajos previos (Ariel, 1968; Díaz, 2001; LESSER, 2006; Feirstein et al., 2008; Rodríguez-Burgueño, 2012; Rodríguez-Burgueño, 2017; Mohammed-Bushira, 2018). Sin embargo, gran parte de éstas datan de las 84 pruebas de bombeo que la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos realizó entre 1957 y 1971, así como del análisis de 6 muestras de suelo colectadas en el en el Valle de Mexicali abajo del nivel freático durante ese periodo (SARH, 1972).

De la interpretación de las pruebas de bombeo por el esquema de Theis (1935) se sabe que la transmisividad (T) en la zona de estudio varía entre 0.05 a 0.35 m²/s, registrándose los valores más altos en la región Noroeste del Valle de Mexicali (Ariel, 1968; Díaz, 2001). De acuerdo con Freeze y Cherry (1979) estos valores de transmisividad indican estratos considerados como buenos para la explotación de agua subterránea. Respecto al rendimiento específico del acuífero (S_y), los valores reportados por Ariel (1968) son de 0.1 a 0.2, valores que se encuentran dentro del rango habitual de acuíferos libres (Freeze and Cherry, 1979), como es el caso del acuífero en estudio.

Otras propiedades geohidrológicas que han sido utilizadas en modelizaciones anteriores de zonas dentro del área de estudio se presentan de forma resumida en la [tabla 1](#), en la cual se puede apreciar que la transmisividad se encuentra en un rango de 0.05 a 0.35 m²/d, la conductividad hidráulica horizontal entre 0.001 a 10,000 m/d, la conductividad hidráulica vertical de 0.03 m/d, el coeficiente de almacenamiento entre 0.001 a 20, el rendimiento específico entre 0.18 a 0.35 y por último el almacenamiento específico entre 0.00003 a 0.001.

Tabla 1 *Propiedades geohidrológicas utilizadas en modelizaciones anteriores*

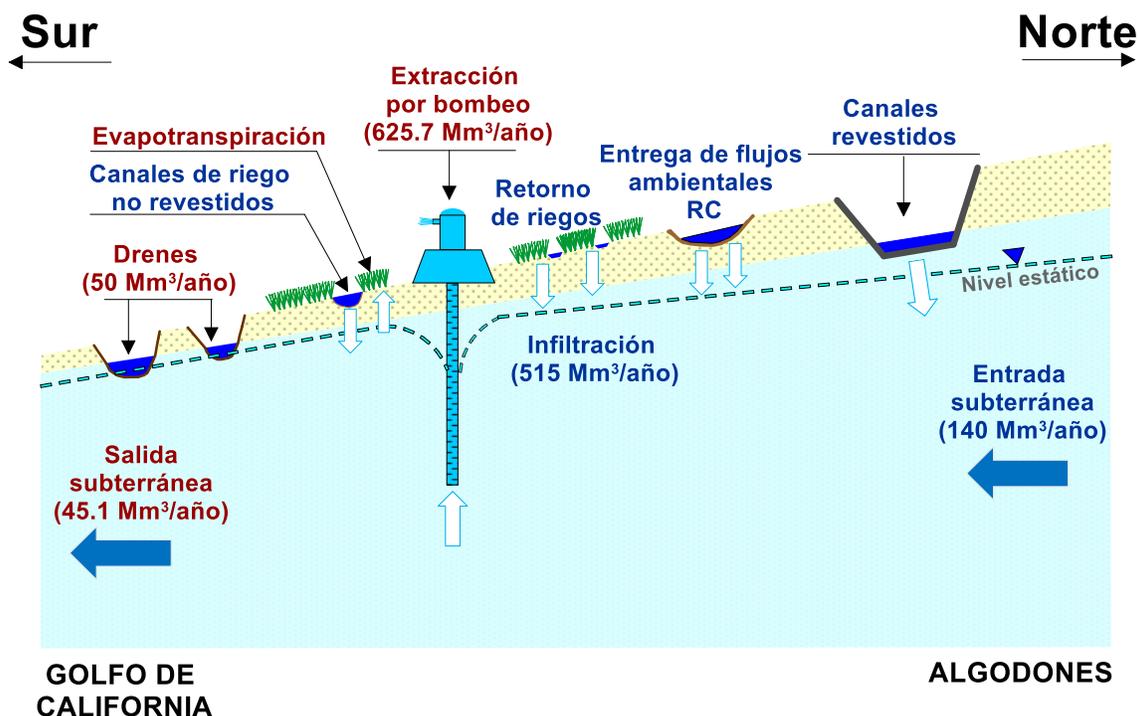
| Estudio | Transmisividad (T) m ² /d | Conductividad hidráulica (K _h) m/d | Conductividad hidráulica (K _v) m/d | Coficiente de almacenamiento (S) | Rendimiento específico (S _y) | Almacenamiento específico (S _s) 1/m |
|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|----------------------------------|--|---|
| <i>Jacobo Villa (1990)</i> | | 3.8-26.88 | | 0.072 | | |
| <i>Díaz (2001)</i> | 0.05-0.35 | 0.08-10,000 | | 0.001 a 20 | | |
| <i>Feirstein (2008)</i> | | 0.001-475 | 0.03 | | 0.2 | 0.00003 |
| <i>Pérez (2008)</i> | | 6.192-224.64 | | | | |
| <i>Rodríguez-Burgueño (2012)</i> | | 0.001-550 | 0.03 | | | 0.00003 |
| <i>Rodríguez-Burgueño (2017)</i> | | 100 | 0.03 | | 0.6 | 0.001 |
| <i>Mohammed (2018)</i> | | 15-400 | 0.03 | | 0.18-0.35 | 0.001 |

2.2.2 Balance de agua

El balance de agua de la zona de estudio ha sido estimado en estudios anteriores ([Jacobo Villa, 1990](#); [Díaz, 2001](#); [LESSER, 2006](#); [Cázares Zepeda, 2008](#); [Feirstein et al., 2008](#); [Pérez González, 2008](#); [Rodríguez-Burgueño, 2012](#); [Rodríguez-Burgueño, 2017](#); [Mohammed-Bushira, 2018](#)), bajo diferentes esquemas de análisis y variables de estudio, razón por la cual las cifras mostradas a continuación se deben utilizar con las restricciones que implican los límites y errores intrínsecos de estos estudios.

En la [figura 7](#) se muestran de forma esquemática en un corte transversal los componentes del balance de agua, desde la zona denominada Algodones al Golfo de California, es decir, de Norte a Sur de la zona de estudio, estos componentes son considerados en el presente estudio y se describen a continuación como entradas y salidas de agua.

Figura 7 Resumen del balance de agua en la zona de estudio. Modificado de LESSER (2006).



2.2.2.1 Entradas de agua

2.2.2.1.1 Recarga

Históricamente el RC constituía la principal fuente de recarga, sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, la construcción de embalses y presas agua arriba de la zona de estudio redujeron de manera sustancial los aportes de agua provenientes de las infiltraciones del río al acuífero. De manera que, actualmente las fuentes de recarga son las pérdidas de los sistemas de conducción de agua de irrigación, de retorno agrícola, así como los caudales extraordinarios del RC (Díaz, 2001; Rodríguez-Burgueño, 2012; Mohammed-Bushira, 2018).

Por otro lado, se tiene la recarga por flujos subterráneos, en Ariel (1968) estimaron un flujo horizontal de 200 hm³/año provenientes de la frontera con Estados Unidos. De este flujo, definieron que 100 hm³/año provenían de la frontera Norte de Baja California (Valle Imperial) de las infiltraciones del CTA, 70 hm³/año por la frontera con Arizona (Valle de Yuma), y el resto, 50 hm³/año del flujo horizontal de la Mesa Arenosa de SLRC (Tabla 2).

Tabla 2*Entradas subterráneas de agua a la zona de estudio (Díaz, 2001)*

| Entradas (Recarga) | hm ³ /año | Total hm ³ /año |
|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------|
| Imperial (Canal Todo Americano) | 100 | 220 |
| Yuma, Arizona (Ariel, 1968) | 70 | |
| San Luis Río Colorado (Ariel, 1968) | 50 | |

A raíz del revestimiento del CTA en el año 2006, se infiere que la recarga por la frontera Norte disminuyó hasta en un 80% (Cazares Zepeda, 2008). Por lo que, en la actualidad, las entradas subterráneas se estiman que son de 140 hm³/año, aproximadamente (Díaz, 2001; Rodríguez-Burgueño, 2012).

2.2.2.1.2 Infiltración como fuente de recarga vertical

En 1968, mediante la cuantificación de hectáreas irrigadas, los tipos de cultivo y la técnica de irrigación utilizada, se estimó una recarga vertical de 500 hm³/año, derivada de las infiltraciones del riego de cultivos (Ariel, 1968). Años más tarde, Escamilla (1991) estima una recarga vertical de 442 hm³/año, la que es menor a la estimada por Ariel en 1968. En el 2012, Rodríguez-Burgueño estimó una recarga de 515 hm³/año correspondiente a la recarga de agua en el Distrito de Riego 014. Sin embargo, las estimaciones anteriores son de manera general dado que los cultivos son temporales y las áreas de cultivo irrigadas fluctúan mensualmente.

Respecto a la infiltración por precipitación, ésta fue descartada en los estudios anteriores (Díaz, 2001; LESSER, 2006; Cazares Zepeda, 2008; Feirstein et al., 2008; Pérez González, 2008; Rodríguez-Burgueño, 2012; Rodríguez-Burgueño, 2017; Mohammed-Bushira, 2018), debido a que la evaporación potencial (2,300 mm) es aproximadamente 35 veces más grande de la precipitación promedio anual (65 mm) (CONAGUA, 2015a).

2.2.2.1.3 Flujos ambientales

La firma del Acta 319 (2012) la cual contiene las medidas Interinas de Cooperación Internacional en la Cuenca del Río Colorado hasta el 2017 y la ampliación de las medidas de Cooperación del Acta 318, para atender los prolongados efectos de los sismos de abril del

2010 en el Valle de Mexicali, Baja California, permitió el establecimiento de un programa piloto para destinar un volumen de agua para uso ambiental de 195 hm³ (CILA, 2018). De volumen anterior, aproximadamente 130 hm³ se liberaron al corredor ripario del Delta del Río Colorado en un evento denominado flujo pulso, la entrega se realizó mediante tres sitios: 1) Presa derivadora Morelos, 2) vertedor del Km 27, y 3) vertedor del Km 18; dicha entrega se realizó durante 8 semanas (del 23 de marzo al 18 de mayo de 2014). Aproximadamente, el 94 % (122 hm³) del agua del flujo pulso se infiltró. Este evento elevó localmente el nivel freático hasta 9 m de sus niveles antecedentes al flujo pulso, seis meses después este efecto se disipó en el acuífero local dinámico (CILA, 2018). Hasta el 31 de diciembre de 2017, el volumen de agua entregado como flujo base hacia las áreas de restauración de los sitios Miguel Alemán, Chausse, Laguna Grande y hacia el cauce del Río Colorado fue de 71.07 hm³.

En 2017, se firma el Acta 323 la cual especifica la ampliación de las medidas de cooperación y adopción de un plan binacional de contingencia ante la escasez de agua en la cuenca del Río Colorado. Esta Acta, contiene entre sus cláusulas el seguimiento a los objetivos de conservación ambiental del Delta del Río Colorado mediante la implementación de flujos ambientales y restauración de hábitat. Desde su firma a octubre del 2022 se han entregado volúmenes de agua de origen federal (aportaciones de los gobiernos de Estados Unidos o México, un tercio cada uno de los 259 hm³ pactados en el Acta 323 [CILA, 2017]) por 86.33 hm³ provenientes del gobierno de Estados Unidos. Los volúmenes entregados se derivaron en la zona sur del corredor ribereño desde el sitio de restauración Chausse y utilizando otras compuertas de derivación dentro del corredor cercanas a los sitios de restauración Laguna Larga y CORI. Estas entregas de agua además de beneficiar a los sitios de restauración recargaron al acuífero en estudio (CILA, 2018).

2.2.2.2 Salidas de agua

Las salidas representan aquellos volúmenes de agua que salen de la zona del acuífero en estudio. Éstas pueden ser salidas por flujos subterráneos, por descargas a la superficie, debido

a extracciones de agua mediante pozos de bombeo o bien, por evapotranspiración. Pese a la importancia que éstas representan en el balance de agua, ninguna de ellas es medida sistemáticamente en la zona de estudio, por lo que para este estudio se realizaron inferencias con los datos disponibles. Las salidas de agua consideradas en el balance del acuífero Valle de Mexicali son las siguientes:

2.2.2.2.1 Bombeo de agua en pozos de extracción

Los volúmenes de las salidas de agua del acuífero por medio del bombeo en pozos localizados en la zona de estudio corresponden únicamente a estimaciones realizadas, debido a que no existen mediciones sistemáticas de las extracciones del acuífero. La primera de ellas fue elaborada por Ariel (1968) en el cual se estimó un volumen de salida de 1,100 hm³/año. Años más tarde la CONAGUA reportó un volumen promedio de extracción para el periodo de 1957 a 1994 de 893 hm³/año (Díaz, 2001). En el año 2006, esta misma institución reporta en la Actualización geohidrológica integral Valle de Mexicali y San Luis Río Colorado, un volumen bombeado de 625.7 y 200.8 hm³/año, respectivamente (LESSER, 2006). Posterior a esta estimación, en el año 2015 la CONAGUA reporta un volumen bombeado de agua subterránea de 602 hm³/año (CONAGUA, 2015a). En la Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea del 2018 se reporta un volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas de 783.122 hm³/año para el AVM (DOF, 2018) y de acuerdo con el Registro público de Derechos de Agua el volumen concesionado es de 966.344 hm³/año con fecha de corte de abril del 2018 (REPDA, 2018) sin embargo, en la actualidad se desconoce la cifra real de la extracción de agua por bombeo del acuífero en estudio debido a la falta de mediciones sistemáticas.

2.2.2.2.2 Descarga al Río Colorado, Río Hardy y Río Nuevo

De acuerdo con Díaz (2001), la descarga superficial por los ríos es propiciada principalmente por la red drenaje agrícola en el DR014 al Golfo de California. Dicha red fue diseñada para

desalojar los excesos de riego aplicados a las parcelas, así como para abatir el nivel freático en las zonas de cultivo. Razón por la cual los drenes se consideran una descarga de agua subterránea. Además, seis plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que operan a través de un sistema de lagunas de oxidación y humedales se localizan en el área de estudio. Estas PTAR descargan sus efluentes en cuerpos de agua superficiales como drenajes agrícolas y ríos (Tabla 3).

Tabla 3 PTARs localizadas en el área de estudio. Datos de [CESPM \(2021\)](#).

| PTAR | Capacidad (l/s) | Sitio de descarga del efluente |
|---------------|-----------------|--------------------------------|
| Mexicali I | 1,300 | Dren Internacional (Río Nuevo) |
| Las Arenitas | 840 | Río Hardy |
| Los Algodones | 20 | Dren agrícola |
| Cd. Morelos | 30 | Canal Álamo |
| Km.43 | 70 | Dren agrícola |
| Km.57 | 20 | Dren agrícola |

La red de drenaje en el Valle de Mexicali está dividida en dos cuencas: 1) cuenca Norte y 2) cuenca Sur. La cuenca Norte drena hacia el Río Nuevo, el cual recibe agua residual tratada de tres plantas de tratamiento de aguas residuales (Zaragoza, Cd. Morelos y Los Algodones) y aguas de drenaje agrícola de la porción Noreste del Valle de Mexicali, este río desemboca en el Salton Sea, California en Estados Unidos. Los drenes principales de esta cuenca son: el dren Mesa, dren Culiacán, dren Tula, dren Mexicali, dren Colector del Norte, dren Ferrocarril, dren Xochimilco, dren Wisteria y el dren Internacional ([CONAGUA, 2013](#)).

De acuerdo con [LESSER \(2006\)](#) los drenes de la cuenca Norte que constituyen importantes descargas de aguas subterráneas son:

- 1) Dren Mesa, el localizado en al Sur de la Mesa Arenosa de Andrade, el cual intercepta el flujo subterráneo horizontal proveniente del norte. De acuerdo con [CONAGUA \(2005\)](#), se estima que drena un volumen de 150 hm³/año, de los cuales 100 hm³/año provienen de los drenes que confluyen en él, el resto proviene del dren Principal. Parte de este volumen de agua es bombeado mediante pozos de extracción y utilizado para riego en

la agricultura. De acuerdo con [Lesser, Mahlkecht y López-Pérez \(2019\)](#) durante 1960 a 2005 el Dren Mesa tenía un caudal constante de 1,600 l/s; en 2006 la descarga disminuyó a 557 l/s. Lo anterior como consecuencia del revestimiento del CTA, en años subsecuentes el caudal disminuyó hasta considerarse insignificante (23 l/s) ([CONAGUA, 2012](#)).

- 2) Dren Culiacán, de acuerdo con la [CONAGUA \(2012\)](#) la descarga de agua subterránea en este dren era de aproximadamente 200 l/s durante el periodo de 1960 a 2012.

Los drenes de la cuenca Sur desembocan a tres cuerpos de agua superficial: 1) Río Hardy, 2) Río Colorado y 3) La Ciénega de Santa Clara. El DR014 estimó la descarga de los drenes principales al Sur del Valle de Mexicali (Dren Menor Uno, Dren Dos Tubos, Dren Sonora, Dren Caimán, Dren Carranza, Dren Plan de Ayala) hacia los ríos Colorado y Hardy de 50 hm³/año. Para estos drenes [CONAGUA \(2006\)](#) infirió un volumen drenado de 160 hm³/año. Para toda la red de drenaje del DR014 estimó un volumen drenado de 310 hm³/año.

2.2.3 Niveles de agua subterránea y su evolución

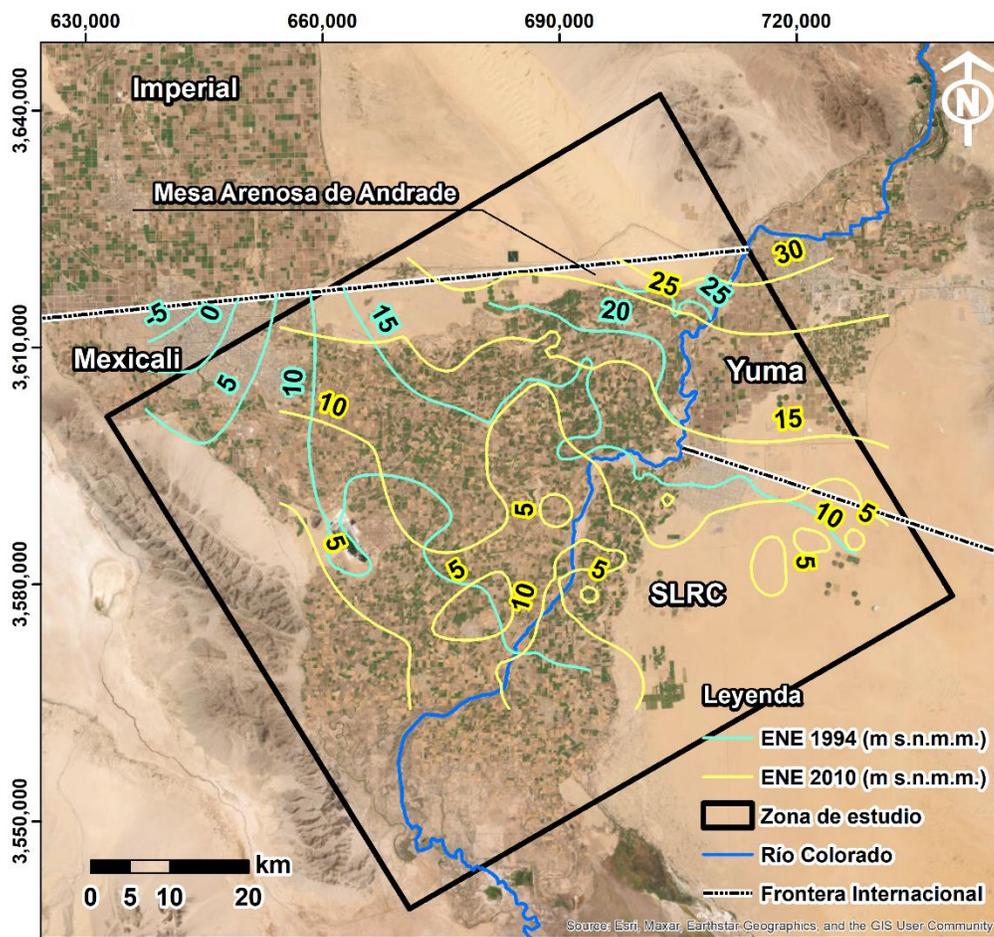
Los elementos del balance de aguas subterráneas mencionados en el apartado anterior influyen en la variación de los niveles de agua en el acuífero. Las mediciones de profundidad al nivel de agua subterránea (nivel freático, nivel piezométrico) en los acuíferos VM y VSLRC de acuerdo [Díaz \(2001\)](#) datan de 1957, año que se toma como referencia para el inicio de las extracciones. Sin embargo, la obtención continua de información piezométrica inicia a partir de los años sesenta con los estudios de la [SRH \(1972\)](#) y [Ariel Construcciones \(1968\)](#).

La información disponible es variable, tanto espaciotemporalmente como en confiabilidad, lo anterior derivado de la aplicación de diversos protocolos de medición por diversas instituciones que han generado, compilado y analizado datos piezométricos como la SRH, Ariel Construcciones, el Distrito de Riego, CONAGUA, LESSER, IMTA, así como universidades, incluida la UABC, entre otros.

En la actualidad, la entidad de gobierno encargada de realizar el monitoreo de los niveles piezométricos del acuífero es la CONAGUA, la cual hasta el año 2020 contaba con 31 pozos de observación que conformaban la red de monitoreo. Además, 19 de estos pozos han sido instrumentados con transductores para medir presión y determinar así las variaciones del nivel freático cada 24 h. Formalmente, las mediciones del nivel freático se realizan aproximadamente 72 h después del paro de los pozos de extracción, en ocasiones no es posible realizar dicho paro por parte del Distrito de Riego 014.

De la información recopilada y analizada de [Ariel \(1968\)](#), [Díaz \(2001\)](#), [CONAGUA \(2006\)](#), [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#), se encontró que para el periodo de 1972 a 2010 la tendencia de evolución de los niveles de agua es negativa, de 1 a 2 m en el área de la Mesa Arenosa de Andrade, de 1 al noreste de la zona de estudio, de hasta 6 m en la porción central, de 5 y 6 m al sur y de 7 a 10 m al Este en SLRC ([Figura 8](#)).

Figura 8 *Configuraciones de la elevación del agua subterránea para los años 1994 ([Díaz, 2001](#)) y 2010 ([Rodríguez-Burgueño, 2012](#)).*



2.2.4 Usos del agua

La disponibilidad y la evolución del agua están asociados a los usos, los cuales en México se encuentran estipulados por la normatividad federal. La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece en el artículo 27 que *“La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada”*.

Con respecto a la transmisión del dominio al que se refiere el artículo 27 constitucional, en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) en el artículo 3º en la fracción VIII y XIII se define:

Asignación: *“Titulo que otorga el Ejecutivo Federal, a través de “la Comisión” o del Organismo de Cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, para*

realizar la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, a los municipios o los estados o al Distrito Federal, destinadas a los servicios de agua con carácter público urbano o doméstico”.

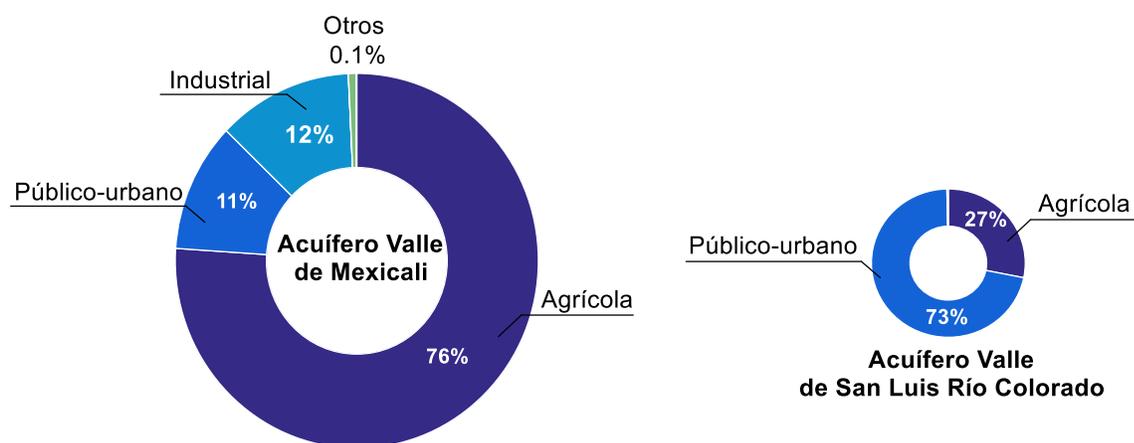
Concesión: *“Título que otorga el Ejecutivo Federal, a través de “la Comisión” o del Organismo de cuenca que corresponda, conforme a sus respectivas competencias, para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, y de sus bienes públicos inherentes, a las personas físicas o morales de carácter público y privado, excepto los títulos de asignación”.*

De igual forma, se establecen en la LAN los usos del agua y el orden de prelación de estos, los cuales serán aplicables para la concesión y asignación de la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales, dentro de las cuales se encuentran las aguas subterráneas, los cuales son:

- 1) Doméstico
- 2) Público urbano
- 3) Pecuario
- 4) Agrícola
- 5) Acuacultura
- 6) Usos para la conservación ecológica o uso ambiental
- 7) Generación de energía eléctrica para servicio público
- 8) Industrial
- 9) Generación de energía eléctrica para servicio privado
- 10) Lavado y entarquinamiento de terrenos
- 11) Usos para turismo, recreación y fines terapéuticos
- 12) Uso múltiple
- 13) Otros

La información de la inscripción de los títulos de concesión, asignación y permisos de descarga se puede encontrar en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). De acuerdo con los datos del REPDA al mes de abril de 2018, el volumen concesionado del acuífero Valle de Mexicali era de 966'344,855.21 m³ por año. De los cuales 83'573,441.55 m³ fueron extraídos del Yacimiento Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP). Sin considerar este volumen, las concesiones de agua se distribuyen tal como se muestra en la [figura 9](#).

Figura 9 Usos del agua de los acuíferos Valle de Mexicali y Valle de San Luis Río Colorado de acuerdo con el REPDA actualizado al mes de abril de 2018.



El volumen concesionado del acuífero Valle de San Luis Río Colorado fue de 166'767,889.17 m³ y su distribución en los diferentes usos se muestra en la [figura 9](#). Sin embargo, parte de este volumen es utilizado en el Estado de Baja California, principalmente para el abastecimiento público urbano de los municipios de Mexicali, Tecate, Tijuana y Rosarito. Tal como se observa en la [figura 14](#), el principal uso del agua varía entre acuíferos, por ejemplo, el 76% del volumen de agua del acuífero Valle de Mexicali es destinado para la agricultura, en cambio, en San Luis Río Colorado el 73% se utiliza en el abastecimiento público urbano. Cabe destacar que estos usos son de acuerdo con el REPDA, sin embargo, para fines de análisis y presentación de información como en las Estadísticas del Agua realizadas por la CONAGUA anualmente se agrupan los usos agrícola, acuicultura, pecuario, múltiples y otros en el uso agrícola; doméstico y público urbano en abastecimiento público; agroindustrial, servicios, industria

excluyendo termoeléctricas y comercio en industria autoabastecida; y por último termoeléctricas en energía eléctrica (CONAGUA, 2017).

Otro de los usos del agua del acuerdo con la LAN es el turismo y la recreación, los cuales han sido identificados y documentados previamente por Kerna et al., (2017) quien determino y clasificó como sitios recreativos de baja amenidad a la Presa Morelos y la Ciénega de Santa Clara, ambos sitios son públicos, es decir, no se requiere pagar alguna tarifa para acceder a ellos. En cambio, los sitios de alta amenidad identificados fueron los campos Mosqueda y Baja Cucapá, tan solo por mencionar algunos ejemplos, los cuales cuentan con tarifa para acceder a las áreas de campamento, a los asadores, restaurantes, entre otras amenidades.

Capítulo 3. Marco teórico conceptual

El agua es la sustancia más abundante en la Tierra, es el principal constituyente de los seres vivos y además es una fuerza importante que constantemente está cambiando la superficie terrestre (Chow, Maidment y Mays, 1994).

3.1 Hidrología

El término hidrología se deriva de las palabras griegas “hidro” y “logos” y se traduce en “estudio del agua”. Esta ciencia estudia las aguas de la Tierra, su ocurrencia, circulación y distribución, así como sus propiedades químicas y físicas y sus interacciones con su entorno, incluidas las relaciones con los seres vivos (Sivakumar, 2019).

Dentro de los objetivos de la hidrología se encuentran: 1) analizar los problemas relacionados con el agua y 2) proveer una guía para el planeamiento y el manejo de los recursos hidráulicos (Chow, Maidment y Mays, 1994).

Dentro de la hidrología existen diferentes campos de estudio, algunos de los que en esta investigación se abordarán son:

1.1.1 Hidrología superficial

Se refiere al estudio de las aguas terrestres que circulan por la superficie terrestre, tal es el caso de los ríos, lagos, pantanos, humedales, etc. (Breña y Jacobo-Villa, 2006).

1.1.2 Hidrología subterránea

Es una rama de la hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas terrestres del subsuelo, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus relaciones a la acción del hombre (Custodio y Llamas, 1983)

El agua subterránea es “el agua que llena continuamente los vacíos de la corteza terrestre y cuyo movimiento se rige casi exclusivamente por la gravedad y la fuerza de fricción causada

por el movimiento mismo (DIN-4049,1992). Cabe mencionar que este término no describe el origen de dicha agua.

3.1.2.1 Acuífero

La palabra acuífero proviene del latín *aqua* = agua y *fero* = llevar. En términos hidrogeológicos se refiere a una unidad o grupo de unidades geológicas permeables y saturadas, capaces de almacenar y transmitir agua (Freeze and Cherry, 1979). Los acuíferos se clasifican de acuerdo con sus características litológicas, los tipos de porosidad y la presión hidrostática a la que se encuentre (Leyva, 2010; Rodríguez-Burgueño, 2017).

- Litológica: aluvial, kárstico, volcánico, detrítico (Custodio y Llamas, 1983).
- Tipo de porosidad: kárstica, fracturada o porosa (Custodio y Llamas, 1983; Rodríguez-Burgueño, 2017).
- Presión hidrostática: acuífero libre, confinado o semiconfinado (Custodio and Llamas, 1983).

3.2.1.2 Ley de Darcy

La Ley de Darcy es la que controla el flujo o movimiento del agua subterránea. Esta descrita por la ecuación 1.

$$Q = KA \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Q es el flujo volumétrico ($L^3 T^{-1}$), K es la conductividad hidráulica del material en dirección del flujo (LT^{-1}), A es el área de la sección transversal perpendicular al flujo (L^2), Δh es la diferencia de potencial a través del prisma paralelo al flujo (L), y Δl es la longitud del prisma paralelo a la línea de flujo (L).

3.2 Modelo y simulación

3.2.1 Modelo

Un modelo es una representación simplificada de la realidad ([Anderson, Woessner y Hunt, 2015](#)). De acuerdo con [Anderson et al., \(2015\)](#) los modelos pueden ser:

- **Conceptual:** Simplifica y resume el estado pasado y actual de un sistema de aguas subterráneas basado en información de campo y conocimiento disponible. Se pueden representar en texto, diagrama, sección transversal, entre otros.
- **Físico:** se refiere a una representación de la realidad que puede o no ser a escala. En el caso de las aguas subterráneas los modelos a escalas pueden ser tanques y columnas en los cuales se pueden realizar mediciones de flujo y de carga hidráulica.
- **Matemático:** se simula el sistema de flujo de agua subterránea indirectamente mediante ecuaciones numéricas con valores específicos de condiciones de frontera para representar los procesos físicos que ocurren en el sistema ([Fetter, 2001](#)).

Particularmente, en los modelos matemáticos se requiere el uso de equipo de cómputo para resolver, de manera analítica o numérica, las ecuaciones. El conjunto de comandos utilizados para resolver el modelo matemático en una computadora constituye el programa o código. El código es genérico ya que se escribe una sola vez, mientras que el modelo requiere específicos de los parámetros para cada modelización ([Anderson y Woessner, 1992](#)).

3.2.2 Modelización

La modelización es una forma de crear una representación virtual de un sistema real que incluye software y hardware ([MATLAB, 2019](#)).

3.2.2.1 Tipos de software de modelización (ventajas y desventajas)

De acuerdo con [Anderson et al., \(2015\)](#) y [Díaz Noriega et al., \(2012\)](#) tres de los códigos de flujos más utilizados para la modelización de las aguas subterráneas son 1) MODFLOW y 2)

FEFLOW y 3) SUTRA. A continuación, se describen de manera general, además se mencionan sus ventajas y desventajas.

MODFLOW es un código desarrollado por [Harbaugh \(2005\)](#) del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) para métodos de diferencias finitas; es de uso libre, de código abierto, está bien documentado, es versátil debido a que se integran módulos (paquetes) y es ampliamente utilizado en todo el mundo, en los Estados Unidos es el código estándar en términos reglamentarios y legales para la modelización de las aguas del subsuelo ([Anderson et al., 2015](#)). Utiliza FORTRAN 66 como lenguaje de programación. Entre las desventajas que presenta MODFLOW se encuentra que no puede simular geologías complejas, como es el caso de las fallas en ángulo y gradientes hidráulicos pronunciados ([Kumar, 2019](#)).

FEFLOW fue desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (DHI), utiliza elementos finitos para resolver la ecuación de flujo de agua subterránea. FEFLOW utiliza una malla flexible (triangular) para representar el dominio del modelo ([DHI, 2019](#)). Esto representa una ventaja sobre los softwares mencionados en el presente apartado para modelización, debido a que los triángulos permiten el refinamiento alrededor de los pozos y de los límites del modelo, así como una mejor adaptación a las condiciones estratigráficas. Es capaz de modelizar: 1) los sistemas de aguas subterráneas con o sin superficie libre, 2) los problemas en zonas saturadas-insaturadas, 3) los fenómenos de dependen de la salinidad y temperatura y 4) situaciones geométricas complejas. El lenguaje de programación que utiliza es ANSI C/C++. Una de las principales ventajas que ofrece es que el preprocesamiento, el procesamiento y el post proceso están integrados a una interfaz de datos para el sistema de información geográfica (SIG) y una interfaz de programación ([Kumar, 2012](#)). La principal desventaja que presenta este código es que no es de libre uso ([Deeds and Jones, 2011](#)).

SUTRA ([Alden y Voss, 2019](#)) es un programa desarrollado por el USGS que simula el movimiento de fluidos de densidad variable y el transporte de energía o de sustancias disueltas en la subsuperficie. El código emplea un método de elementos y diferencias finitos 2D o 3D.

Como resultados primarios SUTRA provee las presiones de los fluidos y concentraciones de los solutos o temperaturas de fluido (Deeds and Jones, 2011). Una de las principales ventajas que ofrece es ser de dominio público, además que tiene integrado Argus ONE (Voss et al., 1997) para preproceso y post proceso.

Las desventajas que presentan estos tres códigos es que las capas del modelo deben ser continuas en todo el dominio del modelo. Sin embargo, cabe destacar que todos los modelos de flujo de agua subterránea, (GWF, por sus siglas en inglés), están basados en procesos que se derivan de dos principios básicos: 1) la conservación de la masa y 2) la Ley de Darcy.

En este trabajo se optó por utilizar MODFLOW en su versión 2005.

3.2.3 MODFLOW

MODFLOW-2005, consta de una estructura modular, que consiste en un programa principal y una serie de subrutinas que agrupan funciones de programas similares con las que se construyen opciones computacionales e hidrológicas específicas de tal manera que cada opción es independiente de las otras (Harbaugh, 2005).

3.2.3.1 Ecuación gobernante

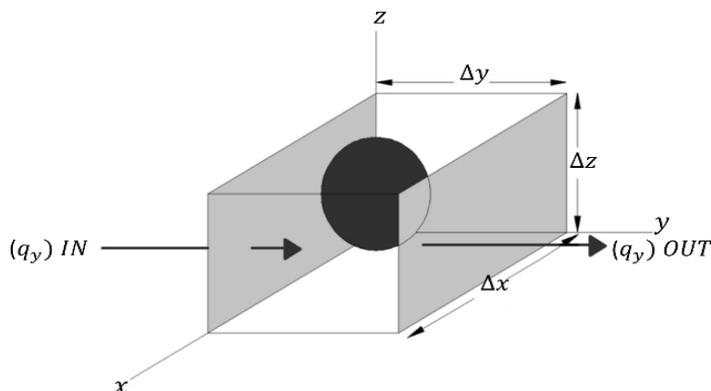
El modelo matemático de MODFLOW para el movimiento del agua subterránea a través del medio poroso se basa en la ecuación diferencial gobernante (Ecuación 2). Esta es una representación matemática de los procesos hidrogeológicos que contiene supuestos simplificadores, como, un fluido monofásico (agua), a densidad constante, en un medio poroso continuo y que se ajusta a la Ley de Darcy (Harbaugh, 2005; Anderson et al., 2015)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde K_x , K_y y K_z son los valores de conductividad hidráulica, h es el potencial hidráulico, W es el término general de fuente de recarga o extracción ($-W$) por unidad de volumen del acuífero por unidad de tiempo (T^{-1}), S_s es el almacenamiento específico y t es el tiempo.

La ecuación gobernante del flujo de agua subterránea se deriva de referirse al flujo de agua a través de un cubo de material poroso (Figura 10), conocido como un volumen elemental representativo (REV, por sus siglas en Inglés) con un volumen igual $\Delta x \Delta y \Delta z$ (Anderson et al., 2015).

Figura 10 Volumen elemental representativo (Rodríguez-Burgueño, 2012).



El flujo a través del REV, q , es un vector cuya magnitud es expresada por tres componentes, $q_x q_y q_z$. Este se define en la ecuación 3.

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z$$

Ecuación 3

Donde i_x , i_y e i_z son vectores unitarios a lo largo de los ejes x , y , z , respectivamente. La conservación de la masa es requerida en el balance de agua del REV (Ecuación 4).

$$\text{Salidas} - \text{Entradas} = \text{Cambio en el almacenamiento}$$

Ecuación 4

Si se considera el flujo a lo largo del eje y del REV. La entrada de agua ocurre a través de la cara $\Delta x \Delta z$ y es igual al flujo $q_y(IN)$. En cambio, la salida es $q_y(OUT)$. La tasa de flujo volumétrico de salida menos la entrada a lo largo del eje y es:

$$\frac{(q_y)OUT - (q_y)IN}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z)$$

Ecuación 5

O bien:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad \text{Ecuación 6}$$

Expresiones similares pueden describirse en la proporción de flujo en los ejes x y z . El cambio total de flujo es igual al cambio en el almacenamiento y se expresa en la [ecuación 7](#).

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) (\Delta x \Delta y \Delta z) = \text{Cambio de almacenamiento} \quad \text{Ecuación 7}$$

Es posible incluir una fuente de extracción o recarga en la celda. El cual se representa con la letra $W^* \Delta x \Delta y \Delta z$, donde se utiliza la convención de que W^* es positivo cuando es una entrada de agua. Por lo que se resta del lado izquierdo de la [ecuación 8](#). Nótese el signo de menos que se encuentra frente al término de entrada de agua de la [ecuación 8](#).

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - W^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Cambio de almacenamiento} \quad \text{Ecuación 8}$$

Considerando la porción derecha de la [ecuación 8](#). El cambio en el almacenamiento es representado por el término almacenamiento específico (S_s), el cual es el volumen de agua liberada del almacenamiento por unidad de cambio en el potencial (h) por unidad de volumen del acuífero ([Ecuación 9](#)).

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta z} \quad \text{Ecuación 9}$$

La convención utilizada en la [ecuación 9](#) es ΔV que es positivo cuando Δh es negativo. Es decir, cuando el agua es descargada del almacenamiento cuando existe un decremento en el potencial. Entonces el cambio de almacenamiento en el tiempo (Δt) en la [figura 16](#) es:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad \text{Ecuación 10}$$

Ahora, combinando las [ecuaciones 8 y 10](#) y dividiendo a través de $\Delta x \Delta y \Delta z$ se obtiene la ecuación de gobernante que representa el flujo tridimensional transiente del agua subterránea en un medio heterogéneo y anisotrópico del flujo de agua subterránea ([Ecuación 11](#)).

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - W^* = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{Ecuación 11}$$

Sin embargo, de acuerdo con [Anderson et al., \(2015\)](#) la [ecuación 11](#) es poco práctica, debido a que no es fácil medir q . Por lo que es necesaria una ecuación descrita en términos de potencial, debido a que esta variable puede ser fácilmente medida en los pozos. En la Ley de Darcy ([Apartado 3.1.1.2](#)) q y Δh son vectores, mientras que K es el tensor de la conductividad hidráulica. Por lo que se pueden describir los componentes del vector de la descarga específica q , como:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 12}$$

Sustituyendo la [ecuación 12](#) en la [ecuación 11](#) para obtener la ecuación diferencial gobernante es la [ecuación 13](#), cuando se trata del estado estacionario donde $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, y/o bidimensional (2D). Para flujo horizontal 2D a través de un acuífero confinado, parámetros integrados verticalmente, es decir que la transmisividad (T) y la capacidad de almacenamiento (S) pueden ser definidos. Entonces, los componentes de transmisividad en las direcciones x y y son $T_x = K_x b$ y $T_y = K_y b$, respectivamente donde, b es el espesor del acuífero; y $S = S_s b$. El término de extracción o recarga W^* , se convierte del volumen de agua multiplicado por el área del acuífero por el tiempo, R ([Ecuación 13](#)).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad \text{Ecuación 13}$$

Para un flujo en 2D en un acuífero libre, heterogéneo y anisotrópico, la ecuación diferencial es:

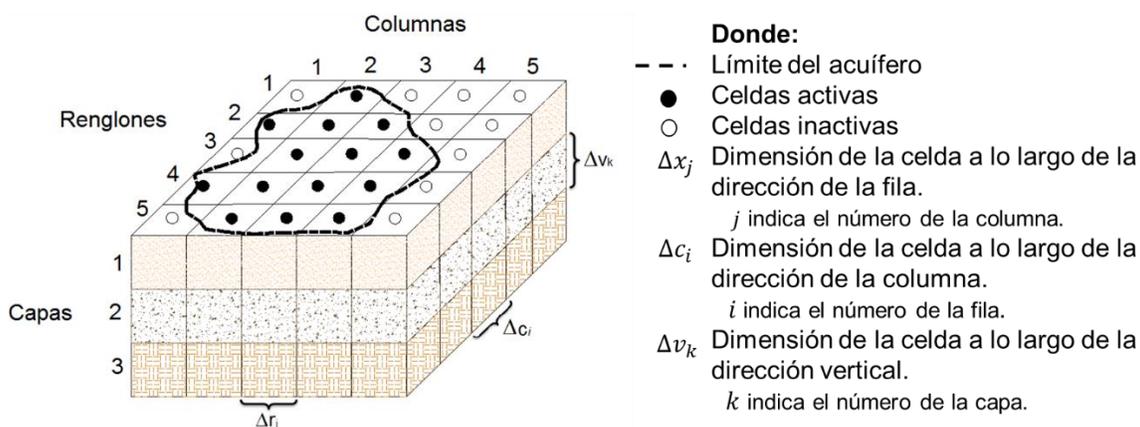
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde S_y es el rendimiento específico, R es la tasa de recarga, h es igual a elevación del nivel freático medido desde la base del acuífero.

3.2.3.2 Discretización

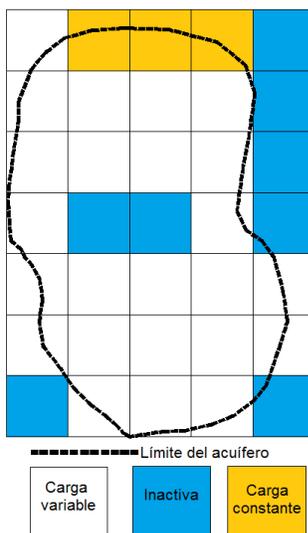
MODFLOW aborda la discretización horizontal leyendo el número de filas y columnas, así como el ancho de estas (Figura 11). Por el contrario, la discretización vertical en el modelo se trata mediante el número de capas y los parámetros hidráulicos de estas. Respecto al tiempo, éste se divide en una serie de periodos de estrés, dentro de los cuales los parámetros hidráulicos y otros datos son constantes. A su vez, cada periodo de estrés se divide en una serie de pasos de tiempo (Harbaugh, 2005).

Figura 11 Discretización hipotética de un sistema acuífero (Modificado de Rodríguez-Burgueño, 2012).



En el caso de las capas, estas pueden ser simuladas como libres, confinadas o una combinación de ambas, mientras que las celdas para simular las condiciones de frontera pueden ser de potencial (carga) o flujo constante, celdas sin flujo o inactivas y celdas de potencial variable (Harbaugh, 2005) (Figura 12).

Figura 12 Tipos de celdas en MODFLOW (Rodríguez-Burgueño, 2012).



3.2.3.1 Paquetes

El proceso de modelización del GWF en MODFLOW se ha dividido en paquetes y, a su vez, cada uno de ellos consta de múltiples subrutinas denominadas módulos. La función principal de los paquetes es abordar un aspecto específico del sistema hidrológico a ser simulado (Harbaugh, 2005). A continuación, se describen los paquetes que se utilizarán en esta investigación.

- **Basic package (BAS):** maneja algunas actividades administrativas del proceso de GWF, es el paquete base de la modelización. Por ejemplo, lee los nombres para abrir los archivos, las celdas activas e inactivas, las cargas iniciales, los datos de discretización en tiempo y espacio, las matrices de zonas utilizadas para definir parámetros, declara y asigna memoria para las variables y calcula el balance hídrico general, entre otros. Los datos del paquete BAS son utilizados por otros paquetes (Harbaugh, 2005).
- **Layer-Property Flow package (LPF):** este paquete se utiliza para especificar las propiedades que controlan el flujo entre las celdas (Harbaugh, 2005).
- **Well (WEL):** este paquete está diseñado para simular objetos como pozos que extraen o introducen agua al acuífero a una tasa constante en un periodo de estrés (Ecuación 15). Un

flujo positivo indica la adición de agua al acuífero, en cambio, una tasa negativa indica la extracción de agua.

$$\frac{Q_n}{Q_w} = \frac{T_n}{\sum T} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde Q_n es la recarga (negativa para simular el bombeo) desde una capa a un pozo específico en un periodo de estrés dado (L^3T^{-1}); Q_w es el volumen total de recarga o bombeo para un determinado pozo en el periodo de estrés (L^3T^{-1}); T_n es la transmisividad de la capa (L^2T^{-1}); y $\sum T$ representa la suma de las transmisividades de todas las capas penetradas por el pozo (L^2T^{-1}) (Harbaugh, 2005).

- **Recharge (RCH):** este paquete es utilizado para simular la recarga distribuida por zonas en el sistema de aguas subterráneas. La recarga se define en el modelo como se muestra en la ecuación 16 (Harbaugh, 2005).

$$QR_{i,j} = I_{i,j} DELR_j DELC_i \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde $QR_{i,j}$ es la tasa de recarga aplicada en el modelo en una celda de localización (i, j) (L^3T^{-1}); y $I_{i,j}$ es la lámina de recarga (LT^{-1}) aplicado a un área $DELR_j DELC_i$ de la celda.

- **General Head Boundary package (GHB):** este paquete es para simular el flujo que entra o sale de una celda i, j, k en proporción a la diferencia entre la carga de la celda y de la fuente externa. La constante de proporcionalidad es llamada conductancia de frontera. La relación entre el flujo que entra a la celda y la carga en la misma se establece con la ecuación 17 (Harbaugh, 2005).

$$QB_n = CB_n (HB_n - h_{i,j,k}) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde n es el número de frontera, QB_n es el flujo que entra a la celda i, j, k desde la frontera (L^3T^{-1}); CB_n es la conductancia (L^2T^{-1}); HB_n es la carga asignada a la fuente externa (L); y $h_{i,j,k}$ es la carga en la celda i, j, k (L) (Harbaugh, 2005).

- **River package:** este paquete simula los efectos del flujo entre el agua superficial y el agua subterránea. Para ello, los términos que representan a la infiltración hacia o desde la superficie deben añadirse en la ecuación de flujo de agua subterránea para cada celda afectada por la infiltración (Harbaugh, 2005). Se supone que las pérdidas de carga medibles entre el río y el acuífero se limitan a las que se producen a través de la propia capa del lecho del río. Además, se asume que la celda del modelo subyacente permanece totalmente saturada, es decir, que el nivel de agua no desciende por debajo del fondo de la capa del lecho del río. Bajo estos supuestos, el flujo entre el río y el sistema de agua subterráneas para el tramo n se da de acuerdo con la ecuación 18 (Harbaugh, 2005).

$$QRIV_n = CRIV_n(HRIV_n - h_{i,j,k}) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde $QRIV_n$ es el flujo entre el río y el acuífero (positivo si se dirige al acuífero) (L^3T^{-1}); $CRIV_n$ es la conductancia hidráulica de la conexión del río y acuífero (L^2T^{-1}) (Ecuación 19); $HRIV_n$ es el nivel de agua en el río (L); y $h_{i,j,k}$ es la carga en el nodo en la celda que subyace el segmento del río (L) (Harbaugh, 2005).

$$CRIV_n = \frac{K_n L_n W_n}{M_n} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde L_n es la longitud del bloque de conductancia (longitud del río al cruzar el nodo); W_n es el ancho del río; M_n es el espesor de la capa del lecho del río; y K_n es la conductividad hidráulica del material del lecho del río.

Drain package (DRN): simula los efectos de los drenes agrícolas, que eliminan agua del acuífero a una tasa proporcional a la diferencia entre la carga en el acuífero y la elevación del dren. De manera que, si la carga del acuífero se encuentra por debajo de la elevación del dren éste no tendrá efecto alguno (Ecuación 20). La conductancia del drenaje se le denomina una constante de proporcionalidad entre la carga de la celda y el flujo hacia la condición de frontera (Harbaugh, 2005).

Ecuación 20

$$Q_{out} = CD(h_{i,j,k} - HD); h_{i,j,k} > HD$$

$$Q_{out} = 0; h_{i,j,k} < HD$$

Donde Q_{out} es el flujo del acuífero al dren (L^3T^{-1}); CD es la conductancia del dren (L^2T^{-1}); HD es la elevación del dren (L); y $h_{i,j,k}$ es la celda que contiene al dren (L) (Harbaugh, 2005).

- **Evapotranspiration package (ET):** simula los efectos de la transpiración de las plantas y la evaporación directa en el proceso de extracción de agua del régimen de aguas subterráneas saturadas. El enfoque se basa en los siguientes supuestos; 1) cuando el nivel freático se encuentra en o por encima de una elevación específica denominada “superficie ET”; 2) cuando la profundidad del nivel freático queda por debajo de la elevación de la superficie ET y aún supera un intervalo específico denominado “profundidad de extinción”, la evapotranspiración cesa; y 3) entre estos límites, la evapotranspiración del nivel freático varía linealmente con la elevación del nivel freático (Ecuación 21) (Harbaugh, 2005).

$$RET = EVTT$$

$$h_{i,j,k} > SURF$$

Ecuación 21

$$RET = EVTR \frac{(SURF - EXDP)}{EXDP} \quad (SURF - EXDP) \leq h_{i,j,k} \leq SURF$$

$$RET = 0$$

$$h_{i,j,k} < SURF - EXDP$$

Donde RET es la tasa de pérdida del nivel freático por unidad de superficie del debido a la evapotranspiración (LT^{-1}); $h_{i,j,k}$ es la carga o la elevación del nivel freático en la celda en la que la evapotranspiración ocurre (L); $EVTT$ es el valor máximo de RET (LT^{-1}); $SURF$ es la elevación del nivel freático en la cual se produce el valor máximo de evapotranspiración (L); y $EXDP$ es la profundidad de corte o extinción (L). Cuando la distancia entre $h_{i,j,k}$ y $SURF$ supera la $EXDP$, la evapotranspiración cesa (Harbaugh, 2005).

- **Preconditioned Conjugate-Gradient package (PGC):** es el paquete solucionador utilizado en esta investigación. Este paquete utiliza la iteración interna y externa, el usuario debe especificar el número máximo de iteraciones externas (MXITER). La simulación se detendrá si los criterios de convergencia no se cumplen. La convergencia se determina con los criterios de cambio de la carga y los residuales ([Harbaugh, 2005](#)).

3.3 Gestión y gobernanza del agua

3.3.1 Gestión

La gestión se entiende como un conjunto de procesos y acciones necesarias para administrar los recursos humanos, económicos, logísticos y administrativos requeridos para conseguir el manejo integrado de los recursos hídricos ([UICN, 2012](#)). Particularmente, la gestión del agua subterránea se refiere al proceso de equilibrar la explotación del recurso (cantidad, calidad y vínculos relevantes con otros recursos naturales) con la creciente demanda para un amplio desarrollo económico y medios de vida, y que, debe considerar la eficiencia, equidad y la sostenibilidad a largo plazo, en términos de mantener tanto la calidad como la cantidad en los niveles deseados ([GWP, 2017](#)).

La Ley de Aguas Nacionales ([LAN, 2022](#)) define en el artículo 3ro fracción XXVIII a la gestión del agua como:

“Proceso sustentado en el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental, (1) el control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas incluyendo a los acuíferos, por ende su distribución y su administración, (2) la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua, y (3) la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la

ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente. La gestión del agua comprende en su totalidad a la administración gubernamental del agua”

3.3.1.1 Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH)

La Asociación Mundial para el Agua ([RIOCI y GWP, 2012](#)) y la Ley de Aguas Nacionales en el artículo 3º fracción XXI definen a la GIRH como el:

“Proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua con la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales...”

Otra definición de la GIRH que tiene un enfoque similar, pero con mayor funcionalidad por la integración de los ecosistemas es la propuesta por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional ([USAID, 2008](#)):

“Una planificación participativa y un proceso de implementación basado en conocimientos científicos sólidos que reúnen a las partes interesadas para determinar cómo satisfacer las necesidades de la sociedad a largo plazo relacionadas con el agua y los recursos costeros, mientras se mantienen los servicios ecológicos esenciales y los beneficios económicos. Ayuda a proteger al medio ambiente mundial, a fomentar el crecimiento económico y el desarrollo agrícola sostenible, a promover la participación democrática en la gobernanza y a mejorar la salud humana”.

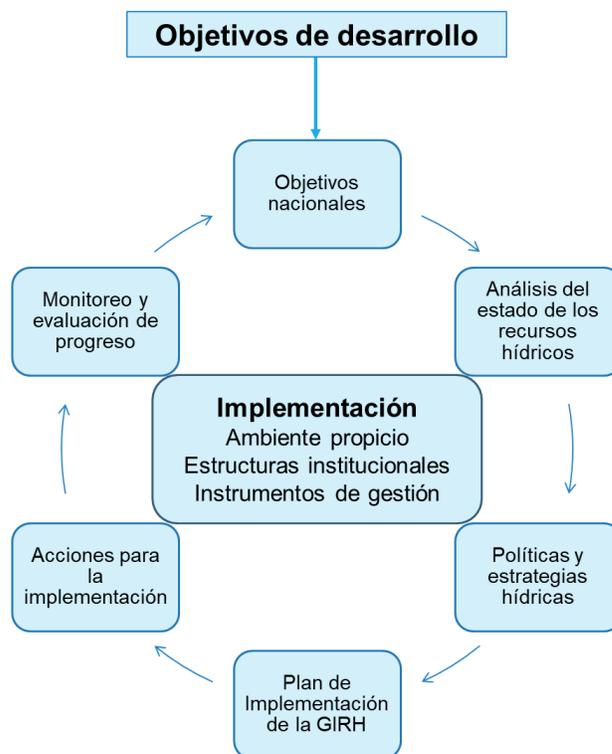
Por otro lado, [Dourojeanni et al., \(2002\)](#) menciona que la GIRH implica, además, la toma de decisiones y el manejo de los recursos hídricos para los diferentes usos, de tal forma que se consideren la demanda de los diferentes usuarios y las partes interesadas. Así mismo, engloba los recursos de aguas superficiales y subterráneas, en un sentido cualitativo, cuantitativo y ecológico desde una perspectiva multidisciplinaria y enfocada en los requerimientos de la sociedad en materia de agua.

Las fases de la planificación e implementación de la GIRH se muestran en la [figura 13](#). El ambiente propicio o facilitador, establece los derechos y las obligaciones de las partes interesadas (individuos, organizaciones, gobierno, empresas públicas y privadas, etc.) que se instauran para lograr un equilibrio sostenible entre las necesidades sociales, económicas y ambientales y el agua. Consiste en 1) la política, 2) el marco legal y 3) las estructuras de financiamiento e inversión. A continuación, se describen brevemente cada una de ellas ([GWP, 2018](#)):

- 1) **Política**, establece los objetivos para el uso protección, conservación, y gestión de los recursos hídricos, así como la prestación de servicios de agua.
- 2) **Marco legal**, son las reglas por seguir para los objetivos establecidos. Comprende la propiedad del agua, permisos de uso y su transferencia y los derechos consuetudinarios.
- 3) **Estructuras de financiamiento e inversión**: asignación de recursos para satisfacer las necesidades de demanda del agua.

Por otro lado, el término de estructuras institucionales se refiere en gran medida a la gobernanza del agua (Apartado 3.2.3). Estas estructuras comprenden, 1) la regulación y el cumplimiento del marco normativo, 2) los servicios de suministro de agua y saneamiento, 3) los mecanismos de coordinación y facilitación para un sistema de GIRH y 5) el desarrollo de capacidades en términos de GIRH en los tomadores de decisiones e involucrados ([GWP, 2018](#)).

Figura 13 Fases de la planificación e implementación de la Gestión Integral de los Recursos Hídricos. Modificado de *UN WATER (2001)*.



Por otra parte, gestión se apoya en instrumentos, estos son los métodos específicos que permiten tomar decisiones racionales, multidisciplinarias e informadas en términos de gestión del agua y adaptar las acciones a situaciones específicas (*GWP, 2018*). A continuación, se enlistan y describen brevemente cada uno de ellos de acuerdo con la información del *Global Water Partnership (GWP, 2018)*.

- 1) **Entender las dotaciones de agua:** sirve para comprender el agua como un recurso físico. Se considera el análisis de la oferta y demanda, los procesos del ciclo hidrológico, la valoración del recurso, el monitoreo de la calidad de agua y la evaluación de las políticas públicas referentes al agua.

- 2) **Evaluar:** ayuda a comprender las conexiones entre los recursos hídricos y sus usuarios, así como a calcular los impactos de eventos inciertos o medidas de política pública sobre el recurso y sus usuarios.
- 3) **Modelizar y tomar decisiones:** visualiza la información que se ha recopilado y ayuda a tomar decisiones de acuerdo con los criterios establecidos en conjunto con las partes interesadas.
- 4) **Planificar la GIRH:** sobre la base del conocimiento adquirido a través de las evaluaciones y proceso de modelización, se pueden realizar planes que integren aspectos ambientales, sociales y económicos de la gestión del agua a diferente nivel (cuenca hidrológica, acuífero, etc.).
- 5) **Comunicar:** permite el involucramiento de partes interesadas y depende en gran medida del intercambio de conocimientos para diseñar planes efectivos y fomentar la participación, la comunicación entre los usuarios e interesados es esencial.
- 6) **Eficiencia en la gestión del agua:** se refiere a las medidas que mejoran la gestión de la demanda y la oferta.
- 7) **Instrumentos económicos:** son las diferentes formas de garantizar la cantidad y la calidad de agua. Algunos ejemplos son los precios del agua, los mercados de agua, los permisos de contaminación negociables, los cargos por contaminación, los subsidios, los pagos por servicios ecosistémicos, etc.
- 8) **Promover el cambio social:** para garantizar la seguridad del agua, se puede fomentar un cambio en las actitudes mediante la integración de conocimiento sobre la gestión del agua en la educación y concientización pública.

3.3.2 Cogestión

Se le denomina cogestión al intercambio de poder y de responsabilidad entre el gobierno y los usuarios de las aguas subterráneas (generalmente organizados en distritos, asociaciones, etc.). En la cogestión la participación en la consulta, el intercambio de información y la toma de

decisiones es compartida (Molle y Closas, 2020). De acuerdo con Molle y Closas (2020) los elementos claves del contexto de la cogestión son:

- a. La naturaleza de la comunidad de usuarios: el número de usuarios de aguas subterráneas afectados por el futuro de un acuífero es una característica clave para la cogestión. Sin embargo, el número de usuarios no garantiza una gestión eficaz. Por otro lado, la homogeneidad y el capital social es otra característica que debe ser considerada, puesto que, cuando los usuarios tienen intereses, medios y poder desiguales, conciliar los objetivos será difícil (Molle y Closas, 2020).
- b. Una amenaza creíble: puede ser provocar el colapso de la economía de las aguas subterráneas y, en consecuencia, puede crearse la imposición por parte del Estado de una solución no deseada. Esta situación puede alentar a los usuarios a organizarse (Molle y Closas, 2020).
- c. La activación ambiental o legal: algunos movimientos decisivos hacia normas de gestión negociadas (algunas veces de forma descendentes [*top-down*]) han sido vinculados a la degradación medioambiental, los impactos de terceros, y por consecuencia, a desafíos legales. La amenaza de la intervención directa del Estado y/o la aplicación estricta de obligaciones legales proyecta una “sombra de jerarquía” (Bórzeł y Risse, 2010) que es clave para que la cogestión funcione. Esto implica que el Estado amenaza explícita o implícitamente con la imposición de normas o leyes vinculantes a los actores privados para que cambien sus cálculos de costo-beneficio a favor de un acuerdo voluntario más cercano al bien común que a los intereses particulares (Bórzeł y Risse, 2010).
- d. Transparencia y conocimiento científico, la aplicación de las normas de gestión acordadas conjuntamente se ve reforzada por los mecanismos de rendición de cuentas, la transparencia con respecto a la justificación de las medidas, los datos y

modelos utilizados y a la distribución de costos y beneficios (Varady et al., 2016; Molle y Closas, 2019).

- e. Financiación y habilitación legal, la cogestión implica la participación de los usuarios a un nivel que requiere financiación para sus actividades y/o para aplicar las medidas acordadas (Molle y Closas, 2020).

3.2.2 Manejo

En Latinoamérica los términos de gestión, administración y manejo suelen considerarse como uno solo, debido a la traducción del término en inglés *management*. Sin embargo, para fines de esta investigación se entenderá como manejo: la aplicación de técnicas y métodos para manipular el aprovechamiento del agua subterránea.

3.2.3 Gobernanza del agua subterránea

La gobernanza trata sobre los procesos y mecanismos de interacción entre actores gubernamentales y no gubernamentales, es un concepto dinámico, mientras que, la gobernabilidad se refiere al estado resultante de la aplicación de estos mecanismos y procesos. Existen diferentes definiciones de gobernanza (Groundwater Governance, 2012), sin embargo, la que se utilizará en esta investigación será la de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO, 2016):

“Es el proceso mediante el cual los recursos de agua subterránea son manejados mediante la aplicación de responsabilidad, participación, disponibilidad de información, transparencia, costumbres, y el estado de derecho. Así como la técnica de coordinación de acciones administrativas y la toma de decisiones entre diferentes niveles jurisdiccionales”

Los componentes que integran a la gobernanza del agua son 1) los actores, 2) los marcos legales, regulatorios e institucionales, 3) las políticas y 4) la información basada en la ciencia y el conocimiento (FAO, 2016). De acuerdo con la OECD (2018) es indispensable, elaborar un diagnóstico de los componentes de la gobernanza para elaborar y construir herramientas para

permitan evaluar el estado de los recursos hídricos mediante herramientas como los modelos hidrogeológicos los que, aportan elementos para abordar los problemas de gestión y gobernanza (Musacchio et al. 2021) .

3.4 Servicios ecosistémicos

3.4.1 Ecosistema

Un ecosistema es un complejo dinámico de comunidades de plantas, de animales, de microorganismos y el ambiente inorgánico que interactúan como una unidad funcional. Los seres humanos son parte integral de los ecosistemas (EM, 2003).

3.4.2 Servicios ecosistémicos

En 1997 Daily (1997) define por primera vez a los servicios ecosistémicos (SE) como las:

“condiciones y procesos a través de los cuales los ecosistemas naturales y las especies que los componen sostienen y mantienen la vida humana”.

Ese mismo año Constanza et al., (1997) realiza la primera valuación de los SE del mundo y del capital natural definiendo a los servicios ecosistémicos como:

“flujos de materiales, energía e información de las reservas de capital natural que contribuyen con los servicios de capital humano y manufacturados para producir bienestar humano”.

Con el tiempo, este concepto ha cambiado, sin embargo, todas las definiciones coinciden en que los servicios ecosistémicos contribuyen al bienestar humano (Chicharo, Müller y Fohrer, 2015). Por lo tanto, en esta investigación se utilizará una definición compuesta por la Evaluación de Ecosistemas del Milenio (MEA, 2005) y La Economía del Ecosistema y la Biodiversidad (TEEB, 2010) la cual es:

“Los beneficios directos o indirectos que las personas obtienen de los ecosistemas”.

Los SE son clasificados como servicios de soporte, de aprovisionamiento, de regulación y culturales (MEA, 2005).

3.4.2.1 Servicios ecosistémicos hidrológicos

Los servicios ecosistémicos hidrológicos son definidos como los beneficios para las personas producidos por los efectos de los ecosistemas terrestres de agua dulce (Brauman, et al., 2007), además proporcionan productos fundamentales para la supervivencia humana y apoyan a las condiciones ambientales que son esenciales para la vida. Cada servicio tiene atributos de cantidad, calidad, ubicación y tiempo del flujo, tal como se muestra en la figura 14.

Figura 14 Relación de los procesos de los servicios hidrológicos. Modificado de Brauman et al., (2007).



Particularmente, los servicios ecosistémicos provistos por el agua subterránea se pueden clasificar en tres categorías 1) ecosistemas dependientes del agua subterránea; 2) ecosistemas sustentados por sobreflujos de agua subterránea y 3) ecosistemas mantenidos por el nivel del agua subterránea (Tabla 4) y, de acuerdo con Baniasadi et al., (2019), Mocior y Kruse (2016) y

Tuinstra y van Wensem, (2014) las aguas del subsuelo proveen los siguientes servicios ecosistémicos:

- **SE de soporte:** funciones y procesos del agua subterránea relacionados con los SE, en los cuales se enfatiza en el papel del agua subterránea en los ciclos biogeoquímicos.
- **SE de aprovisionamiento:** se refieren a la provisión de un bien tangible, por ejemplo, el agua potable, el agua para la industria, el agua para actividades agrícolas y los recursos estratégicos de agua subterránea, entre otros.
- **SE de regulación:** se visualiza al agua subterránea como medio de almacenamiento de calor o frío, para mantener el nivel de agua subterránea para evitar hundimientos y para la estabilidad en construcciones, la retención de agua, el drenaje, el abastecimiento en regímenes superficiales dependientes de agua subterránea, el efecto purificador y filtrante de aguas y suelos.
- **SE culturales:** preservación de los valores culturales, históricos, arqueológicos, estéticos y éticos de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas.
- **Otros SE:** servicios educacionales y de conocimiento.

Tabla 4 Servicios que resultan de los diversos tipos de ecosistemas hidrológicos. Modificada de Yang y Liu, 2020.

| Tipo | Subtipo | Características | Tipos de servicio | Indicadores del servicio |
|---------------------------------|--|--|-------------------|---|
| Ecosistemas de agua subterránea | Acuífero libre y ecosistemas de cuevas kársticas | El acuífero sirve como recurso hídrico (incluida el extraído para las actividades humanas); poros del acuífero, grietas y cuevas kársticas contienen minerales y sirve como hábitat para organismos acuáticos invertebrados. | Aprovisionamiento | Provisión de agua (doméstica, industrial, agrícola y actividades de generación de energía eléctrica). |
| | | | Regulación | Conservación de agua |
| | | | | Regulación de la calidad del aire |
| | | | | Purificación del agua |
| | | | | Deposición de la materia orgánica |
| | Eliminación de patógenos | | | |
| | Cultural | Investigación científica | | |

| Tipo | Subtipo | Características | Tipos de servicio | Indicadores del servicio |
|---|--|---|-------------------|---|
| Ecosistemas mantenidos por el desbordamiento del agua subterránea | Ecosistemas fluviales, humedales, ecosistemas de bahía | 1. Hábitat acuático en ríos 2. Ecosistemas acuáticos, como pantanos, fuentes, humedales artificiales y lagos. 3. Ecosistemas como bahías fluviales, mar poco profundo y playa | Aprovisionamiento | Alimentos, materiales crudos, provisión de agua |
| | | | Regulación | Control de inundaciones Regulación de la calidad del aire Purificación del agua Conservación de suelo Regulación del clima |
| | | | Cultural | Investigación científica Recreación |
| Ecosistemas mantenidos por el nivel de agua subterránea | Ecosistemas de vegetación terrestre, vegetación cercana a ecosistemas de costa | 1. Acuífero no confinado que suministra agua a las raíces de la vegetación. 2. Vegetación cercana a la costa en ríos y los humedales dependen del GW en la época seca. | Aprovisionamiento | Alimento y materia prima |
| | | | Regulación | Control de inundaciones Regulación de la calidad del aire Tratamiento de contaminantes Conservación de suelos polinización Ciclo de nutrientes Regulación del clima |
| | | | Cultural | Investigación científica Recreación |
| | | | De soporte | Hábitats |

El almacenamiento de agua subterránea es considerado uno de los servicios ecosistémicos hidrológicos más importantes brindado por el subsuelo. Un acuífero puede actuar como un biofiltro, que mantiene y mejora la calidad del agua. Adicionalmente, puede proporcionar un almacenamiento seguro de agua durante siglos (Griebler y Avramov, 2015).

El almacenamiento de agua subterránea depende de las propiedades del acuífero, por ejemplo, la capacidad de almacenamiento y transmisión, así como de la geometría (Jalota et al., 2018).

Estimaciones globales han determinado que el volumen total de agua subterránea en los 2 km superiores de la corteza continental es de 22.6 millones de km³ (Gleeson et al., 2016).

En esta investigación el valor económico de la conservación del agua en el área de estudio se analizó utilizando el enfoque del proyecto sombra, el cual simula el costo de un proyecto de

sustitución ([Pearce, 1993](#)) al servicio ecosistémico que brinda el acuífero. El proyecto de sustitución corresponde a un embalse que es capaz de almacenar agua como el acuífero.

La calidad de las aguas subterráneas varía según su ubicación y su profundidad. Naturalmente, el agua contiene iones, sólidos en suspensión y otras moléculas procedentes de procesos naturales como las interacciones entre el suelo y la roca, y, las actividades humanas afectan la calidad de esta. Las principales fuentes de contaminantes son la agricultura a través de la aplicación de fertilizantes y pesticidas, las aguas residuales no tratadas y tratadas, la actividad industrial y minera, entre otros ([Lall y Russo, 2020](#)). Sin embargo, los acuíferos pueden purificar el agua entrante; este servicio ecosistémico se basa en un equilibrio sensible entre la actividad de la biomasa microbiana en los acuíferos y el flujo entrante de carbono orgánico y nutrientes ([Griebler et al., 2019](#)). La purificación del agua en los acuíferos es, términos generales, el resultado de una combinación del ciclo de nutrientes, la biodegradación de contaminantes patógenos ([Griebler et al., 2019](#)).

La valuación de los servicios ecosistémicos de acuerdo con [Brauman et al., 2007](#) se debe basar en tres preguntas principales:

1. ¿Cómo pueden los diferentes componentes de los servicios ecosistémicos ser valuados?
2. ¿Qué enfoques de valoración capturan mejor estos componentes?
3. ¿Qué valor tienen los servicios ecosistémicos?

Una revisión exhaustiva de las herramientas y modelos para la valuación y valoración de los servicios ecosistémicos realizada por [Balvanera et al., \(2017\)](#) encontró que, para los servicios relacionados con el recurso hídrico se encuentran:

- InVEST (*Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs*; [Tallis et al., 2013](#)),
- LJPmL (*Lund-Postdam-Jena managed Land Dynamic Global Vegetation and Water Balance Model*) ([Bondeau et al., 2007](#)),
- ARIES (*Artificial Intelligence for Ecosystem Services*; [Bagstad et al., 2013](#))

- MIMES (Multi-scale Integrated Models of Ecosystem Services; [Altman et al., 2014](#))
- Co\$ting Nature
- Natura (*Assessing Socioeconomic Benefits*; [Kettunen et al., 2009](#))
- WaterWorld
- TESSA (*Toolkit for Ecosystem Services Site-based Assessments*; [Peh et al., 2004](#)).

Sin embargo, la mayoría de los anteriores requieren de grandes cantidades de datos con una resolución espaciotemporal alta, además de que TESSA es la única herramienta está diseñada para ser aplicada a escala local. Por estas razones en esta investigación se utilizó la metodología propuesta por [Yang y Liu \(2020\)](#) que se basa en dos puntos: 1) la técnica del mercado sustituto y 2) la técnica de mercado simulado.

La técnica de valor sustituto expresa el valor económico de los SE utilizando precios sombra y excedente del consumidor, lo que implica aplicar varios métodos de valuación como el valor de mercado (productividad), el sustituto, el costo de viaje, el costo de restauración, de oportunidad y el de enfoque de proyectos paralelos. En cambio, la técnica del valor simulado expresa la disposición a pagar. Los métodos e indicadores utilizados para la valuación de los HES que se muestran en la [tabla 5](#).

Tabla 5 *Sistema de valuación de los servicios ecosistémicos del agua subterránea. Modificado de [Yang y Liu \(2020\)](#).*

| Tipo de servicio | Indicadores del servicio | Tipo de valuación | Método de valuación |
|-------------------|--|-------------------|---------------------------|
| Aprovisionamiento | Provisión de agua (domestica, industrial, agrícola y actividades de generación de energía eléctrica) | Directa | Valor de mercado |
| Regulación | Conservación de agua | Indirecta | Proyecto sombra |
| | Regulación de aire | | Costo de reemplazo |
| | Purificación de agua | | Enfoque subrogado |
| | Deposición de materia orgánica | | |
| | Eliminación de patógenos | | |
| Cultural | Investigación cultural | Directa | Enfoque de costo de viaje |

Capítulo 4. Materiales y métodos

La metodología de esta investigación está dividida en dos apartados: 1) trabajo de campo y 2) trabajo de gabinete.

4.1. Trabajo de campo

4.1.1 Nivelación de pozos de monitoreo

Con la finalidad de tener los datos de monitoreo referidos en un mismo sistema de coordenadas y datum se realizó la nivelación de pozos se realizó en 30 de los 32 pozos de monitoreo, esto debido a que uno de ellos quedo tapado imposibilitando su medición y otro se incluyo en la red posteriormente. Para realizar esta actividad se tomó como referencia el piezómetro N2 con coordenadas conocidas. Se utilizó un GPS marca Topcon Modelo GR-5 en modo estático, el cual tiene una precisión horizontal de 3 mm y vertical de 3.5 mm utilizando este método ([Topcon, 2019](#)).

El procedimiento que se siguió para realizar la nivelación se describe a continuación:

1. Localización del punto con coordenadas y elevación conocida (base).
2. Se colocó la antena base en el punto conocido ([Figura 15](#)).
3. Se programó la base en la libreta digital Tesla, en este paso fue necesario indicar la altura a la que está posicionada la base, el nombre del punto conocido, así como un código de identificación.
4. Localización del pozo que se desea nivelar.
5. Se abrió el pozo.
6. Se colocó la antena móvil en la baliza y ésta en el bípode ([Figura 16](#)).
7. Se posicionó el bípode en el brocal del pozo a nivelar ([Figura 17](#)).
8. Se programó el GPS en la libreta digital, se indicó el nombre del pozo, la altura de la antena móvil y el código de identificación.
9. Se inició la medición, la cual tuvo una duración de 17 min en cada pozo ([Figura 18](#)).

10. Se paró la medición, se apagó el equipo y se procedió a guardarlo.

Figura 15 Colocación de antena base en el punto conocido.



Figura 16 Colocación de antena en el pozo.



Figura 17 Nivelación de pozo.



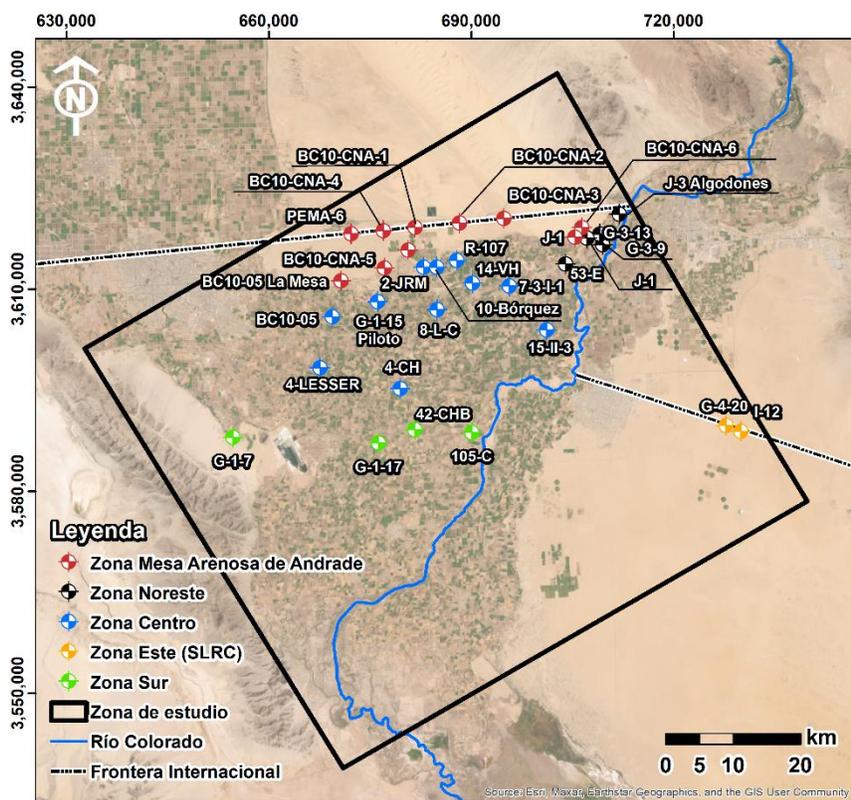
Figura 18 Nivelación de pozo.



4.1.2 Monitoreo de nivel piezométrico de agua subterránea

Con la finalidad de obtener datos de elevación del nivel freático como insumos para la calibración de la modelización del acuífero se realizó un monitoreo mensual de los niveles piezométricos del acuífero del Valle de Mexicali. La profundidad del nivel estático se midió mensualmente en 31 pozos, éstos pertenecen a la Red de Monitoreo Piezométrico de Agua Subterránea de la CONAGUA y cuya zonificación se realizó de acuerdo con su ubicación en la misma red (Figura 19), dichas mediciones iniciaron en el mes de noviembre de 2018 y finalizaron en febrero del 2020. La realización del monitoreo fue en conjunto con personal de CONAGUA y de los laboratorios de Recursos Hídricos y Sistemas de Información Geográfica, y Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente del Instituto de Ingeniería. El financiamiento para dicho monitoreo provino de la Convocatoria 2018 nuevo PTC de PRODEP UABC-PTC-749 y de recursos por servicios realizados en los laboratorios.

Figura 19 Red de monitoreo de agua subterránea.



La medición de la profundidad al nivel estático se realizó utilizando una sonda electroacústica Marca Solinst modelo TLC con precisión al milímetro (Solinst, 2017). Dichas mediciones se realizaron de acuerdo con el protocolo del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Cunningham y Schalk, 2016) y cuyos pasos se enlistan a continuación:

1. Localización geográfica del pozo (Figura 20).
2. Se abrió el pozo, y se colocó la guía para introducir la sonda al pozo (Figura 21).
3. Se midió la profundidad al nivel estático con la sonda electroacústica (Figura 22).
4. Los datos se registraron en la bitácora de campo (Figura 23).
5. Se retiró la sonda del pozo, se enjuagó con agua desionizada y se retiró el exceso con una microfibra (Figura 24).
6. Se cerró el pozo (Figura 25).

Figura 20 *Localización geográfica del pozo.*



Figura 21 *Apertura del pozo.*



Figura 22 *Medición de la profundidad al nivel estático.*



Figura 23 *Registro de medición en bitácora de campo.*



Figura 24 Extracción y limpieza de sonda electroacústica. **Figura 25** Cierre de pozo.



4.2. Trabajo de gabinete

4.2.1 Análisis de la información de nivel freático

El análisis de la información de nivel freático colectada en campo durante el monitoreo consistió en: 1) la captura de los datos en base de datos en Excel, en la cual se incluyó el nombre del pozo, la fecha y hora de la medición, la profundidad al nivel freático y si las condiciones del pozo lo permitían la profundidad total del mismo, 2) el procesamiento de la información (compensación) de los registros automáticos, que consiste en restar a la presión total medida por el transductor la presión barométrica (atmosférica) medida por los transductores *Barologger* y el resultado es la presión de la columna de agua que es multiplicada por la constante 0.01097 para obtener los metros columna de agua, el resultado fue ajustado a las mediciones manuales realizadas en campo, posteriormente este valor es restado a la elevación del punto de medición para obtener la elevación del nivel freático; y 3) elaboración de los contornos de elevación del nivel freático, los cuales se realizaron en el programa Surfer y se exportaron a ArcMap para su representación.

4.2.2 Análisis de la gobernanza del AVM

La gobernanza del agua subterránea en el Valle de Mexicali se analizó mediante la identificación del estado de la gestión del uso del agua en la zona de estudio y del análisis de

los marcos regulatorios normativo, institucional, hidráulico y ambiental, además de los mecanismos de participación social. A continuación, se describe la metodología utilizada.

4.2.2.1 Definición de indicadores

Para el análisis del uso de agua subterránea y su gestión se utilizaron dos indicadores (1) la Demanda Relativa del Agua, RWD, por sus siglas en inglés (*Relative Water Demand*) (Weiskel et al., 2007) y (2) el Índice de Cambio de Almacenamiento (*Storage Change Index, SC*) (Rivera, 2007). La RWD (Ecuación 22) se utilizó para medir la disminución del volumen de agua almacenado en el acuífero, así como la descarga originada por las tasas de extracción del recurso. Los resultados del RWD mayores a 1 son asociados a un uno no sostenible a largo plazo (Rivera, 2007).

El SC (Ecuación 23) mide el grado en el cual un acuífero se ha equilibrado con los cambios naturales y humanos impuestos durante un periodo. Los valores negativos de SC se relacionan a pérdidas en el almacenamiento de agua del acuífero (Rivera, 2007). Para la determinación de ambos índices se utilizó la información oficial publicada por CONAGUA (2015).

$$RWD = \frac{H_{out} - H_{in}}{(R_{sw} + R_{gw}) + (R_p - Det)} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$SC = \frac{\Delta S / \Delta t}{H_{out} - H_{in}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde H_{out} es el volumen de extracción de agua subterránea ($m^3/año$), H_{in} representa los flujos de retorno al acuífero después del uso ($m^3/año$), R_p es la recarga por precipitación ($m^3/año$), R_{sw} son los flujos de agua superficial que ingresan al acuífero ($m^3/año$), R_{gw} son los flujos de agua subterránea que ingresan al acuífero, Det es el volumen evaporado ($m^3/año$), ΔS es la tasa de cambio del almacenamiento (m^3) y Δt es el número de años de análisis (años).

4.2.2.2 Marco Institucional

El análisis de las relaciones institucionales se realizó identificando a las instituciones vinculadas con el tema hídrico a nivel Federal, Estatal y Local; definiendo sus funciones y atribuciones, así como las áreas de oportunidad.

4.2.2.3 Análisis de la normativa hídrica

La identificación y el análisis de la normatividad vigente en materia de agua se realizó mediante la búsqueda y el análisis de las leyes, los reglamentos, los tratados, las actas y demás instrumentos legislativos en las páginas web oficiales del gobierno Federal, Estatal y Local e instancias binacionales.

4.2.2.3.1 Escenarios de usos consuntivos del agua

Derivado del análisis de la normatividad en materia del agua vigente, particularmente a lo establecido en las *Colorado River Interim Guidelines for Lower Basin Shortages and the Coordinated Operations for Lake Powell and Lake Mead* (DOI, 2007) y con el Acta 323 “Ampliación de las Medidas de Cooperación y Adopción de un Plan Binacional de Contingencia ante la Escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado” (CILA/IBWC, 2007) aplicables a México, se definieron los escenarios de gestión y manejo para su simulación en el modelo de los usos consuntivos considerando el orden de prelación establecido en la Ley de Aguas Nacionales.

4.2.3 Construcción del modelo conceptual

4.2.3.1 Modelo litológico

El modelo litológico del acuífero se elaboró en tres etapas: 1) recopilación, integración y unificación de los registros litológicos de pozos, 2) modelización tridimensional litológica y 3) representación de los resultados. A continuación, se detallan cada una de estas etapas.

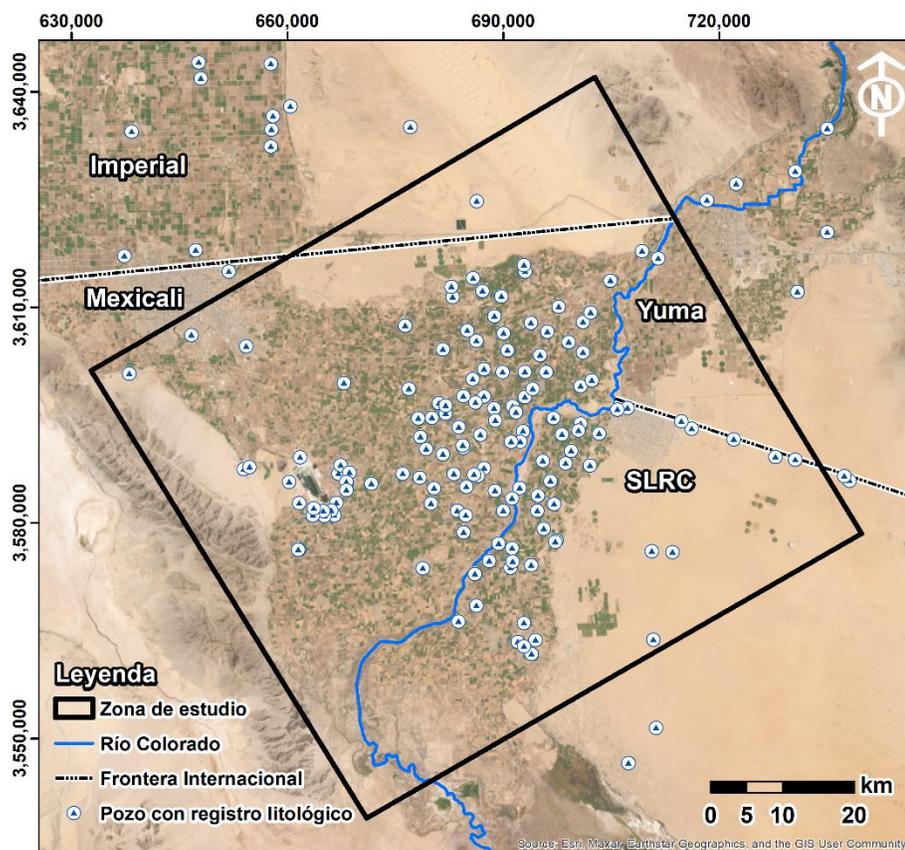
4.2.3.1.1 Recopilación, integración y unificación de registros litológicos de pozos.

La recopilación de los registros litológicos consistió en recabar y analizar la información disponible. Las fuentes utilizadas fueron los registros de los pozos perforados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, datos de CONAGUA, información de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de UABC y del USGS. Sin embargo, dicha información se encontraba en documentos impresos, por lo que fue necesario integrarla y digitalizarla. Para ello se elaboró una hoja de datos en formato Excel, cuyas variables capturadas se enlistan a continuación.

1. Nombre del pozo.
2. Localización geográfica (coordenadas x, y).
3. Elevación del brocal del pozo (z).
4. Profundidad total.
5. Litología por intervalo de profundidad.

En total, se encontraron 220 registros litológicos, de los cuales 140 se ubican en Mexicali o SLRC, 19 en Imperial o Yuma y 61 registros fueron descartados por no contar con el dato de elevación del brocal del pozo. La ubicación de dichos pozos se presenta en la [figura 26](#).

Figura 26 *Ubicación geográfica de los pozos con registros litológicos utilizados.*



Una vez integrada la información se encontró que la descripción litológica varió de acuerdo con el (CONAGUA; CFE; Olmstead et al., 1973; Loetz et al., 1975). Por lo que se realizó la unificación de la litología de acuerdo con la clasificación utilizada en los valles Imperial y Yuma por Olmstead et al., (1973). Las clases litológicas encontradas, así como su descripción se detallan a continuación:

1. Aluvial reciente, que corresponde a limo, arcilla y arenas del Holoceno (10,000 años antes del presente).
2. Aluvial reciente con sedimentos de grano medio a grueso del Holoceno.
3. Aluvial antiguo, que corresponde principalmente a limos y arcillas del Plioceno al Holoceno.
4. Roca sedimentaria del Cenozoico.

5. Roca cristalina del Mesozoico.
6. Roca granítica del Proterozoico al Mioceno.

4.2.3.1.2 Modelización estratigráfica tridimensional

La modelización se realizó en el programa RockWorks versión 17 ([RockWare, 2016](#)). A continuación, se describe el procedimiento realizado:

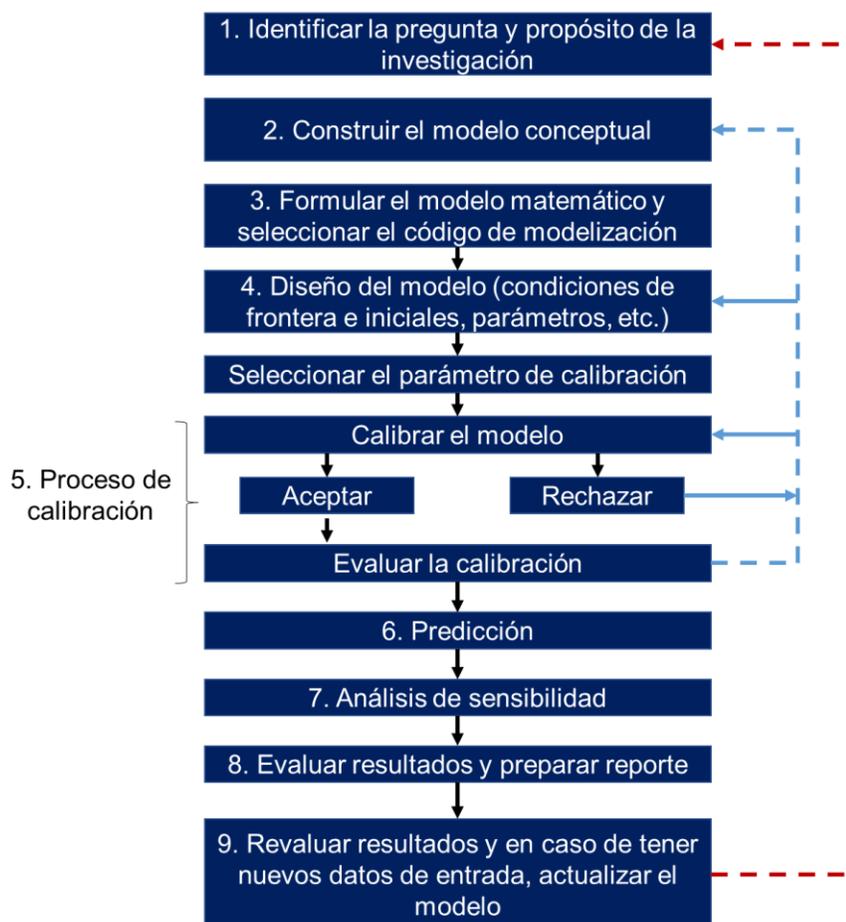
1. Creación del archivo y carpeta de datos.
2. Definir el sistema de coordenadas (UTM WGS84 Z11N) y sistema de unidades (Sistema Internacional)
3. Importar la base de datos de Excel (etapa 1), para lo que fue necesario indicar al programa la ubicación de cada una de las variables mencionadas en la etapa 1.
4. Discretizar y crear la malla del modelo. Para este procedimiento el software realizó una lectura del archivo con la ubicación de los registros litológicos de los pozos para sugerir una discretización de las capas litológicas. En el caso de la discretización se eligió una resolución x, y de 1 km x 1 km y de 10 m en la vertical (z).
5. Conversión de los intervalos de profundidad a elevación.
6. Crear el archivo de tipo de litología para que el programa identifique cada una de las clases determinadas.
7. *Pick lithology*. Consistió en la simplificación de la litología si esta se repetía en profundidades continuas. Este procedimiento se realizó para disminuir el tiempo de procesamiento y del tamaño del archivo resultante de la modelización.
8. Modelizar. Para ello se utilizó el método de *lateral blending* como interpolador y se aplicó un filtro superficial que corresponde al modelo digital de elevaciones, esto para evitar que la estratigrafía resultante quedara por encima de la superficie terrestre.
9. Creación del archivo visual Rw3D (archivo resultante de la modelización estratigráfica).

La representación de los resultados se realizó en los softwares Rockworks® y ArcMap®. La litología resultante de la modelización se exportó como archivo vectorial para posteriormente designar las propiedades hidráulicas del acuífero durante el desarrollo del modelo del acuífero.

4.2.4 Modelo hidrogeológico numérico

La modelización hidrogeológica del acuífero Valle de Mexicali en el DR014 se realizó con el programa MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005) en la interfaz gráfica *Groundwater Modelling System* (GMS) (Aquaveo, 2021). En resumen, el flujo de trabajo utilizado se muestra en la figura 27.

Figura 27 Flujo de trabajo para la modelización del acuífero Valle de Mexicali. Modificado de Anderson, et al., 2015.



4.2.4.1 Definición de las condiciones de frontera

Las condiciones de frontera se establecieron considerando los procesos de los flujos que ocurren en la zona de estudio, así como aquellos utilizados en modelizaciones previas (Rodríguez-Burgueño, 2012).

4.2.4.2 Identificación de paquetes a utilizar

Los paquetes utilizados fueron seleccionados mediante la consulta bibliográfica, particularmente en el manual de MODFLOW 2005 (Harbaugh, 2005) y de la información disponible tanto la recabada en esta investigación como en estudios anteriores (Díaz, 2001; Rodríguez-Burgueño, 2012). Se identificaron las características de cada paquete y las condiciones de frontera naturales y antropogénicas que representarían en la modelización.

4.2.4.3 Bases de datos para modelo

En el software ArcGIS® se crearon las bases de datos de archivos vectoriales para cada paquete a utilizar, los cuales se organizaron en temporalidad mensual. A continuación, se describe la metodología utilizada para representar cada variable del modelo hidrogeológico, así como la información contenida en cada base de datos.

4.2.4.3.1 Recarga

La recarga de agua subterránea en el acuífero Valle de Mexicali se estimó para el periodo de 2018-2019. Se utilizó la metodología implementada por Rodríguez-Burgueño, 2012. La cual, al no contar con información precisa de las tasas de recarga en la zona de estudio, se fundamenta en la eficiencia de la distribución del agua en la red mayor del sistema de conducción que administra la Sociedad de Responsabilidad Limitada (SDRL) del DR014 y en la red menor operada por los usuarios de los Módulos de Riego del mismo distrito.

Dicha estimación se basa en las siguientes suposiciones:

1. La eficiencia en la conducción del agua de cada Módulo varía entre 68 y 85% (Rodríguez-Burgueño, 2012) considerando las pérdidas por conducción y evaporación,

por lo que el resto del volumen de agua se asume es la recarga al acuífero. Esto sin considerar que la eficiencia en la aplicación de las láminas de riego a los cultivos tiene una eficiencia promedio de 45 a 67% (SDRL del DR014, 2015).

2. Debido a la falta de mediciones de caudales en canales y drenes, las pérdidas de agua en los mismos son inferidas en la tasa de recarga. No se realizaron estimaciones directas.
3. La recarga de agua en la zona agrícola de Yuma, Arizona se considera como entrada de agua subterránea por la frontera Este del modelo y no propiamente como tasa de recarga.
4. La superficie de recarga considerada para cada módulo de riego excluye al área que corresponde a la zona urbana de los ejidos.

Para los cálculos se utilizó el volumen de agua aplicado durante el ciclo agrícola 2018-2019, el volumen total corresponde a la suma de las aguas superficiales y subterráneas para cada módulo de riego (Tabla 6).

Tabla 6 *Volumen de recarga asignada por módulo de riego y por fuente de abastecimiento para el ciclo agrícola 2018-2019 (CONAGUA, 2019). *Datos del ciclo agrícola 2014-2015*

| Módulo de riego | Gravedad | Pozo Federal | Pozo particular* | Total |
|-----------------|----------------|--------------|------------------|-------------|
| | m ³ | | | |
| 1 | 13,216,000 | 98,554,000 | 17,001,510 | 128,771,510 |
| 2 | 50,407,000 | 14,500,000 | 14,972,990 | 79,879,990 |
| 3 | 97,092,000 | 13,610,000 | 10,654,760 | 121,356,760 |
| 4 | 2,789,000 | 103,221,000 | 36,267,670 | 142,277,670 |
| 5 | 4,570,000 | 99,614,000 | 4,694,270 | 108,878,270 |
| 6 | 24,801,000 | 38,470,000 | 2,444,200 | 65,715,200 |
| 7 | 14,574,000 | 73,853,000 | 51,586,500 | 140,013,500 |
| 8 | 117,893,000 | | 15,515,890 | 133,408,890 |
| 9a | 68,130,000 | 24,384,000 | 21,020,050 | 113,534,050 |
| 9b | 64,542,000 | 25,002,000 | 25,842,160 | 115,386,160 |
| 10 | 133,263,000 | 10,399,000 | | 143,662,000 |
| 11 | 81,079,000 | | | 81,079,000 |
| 12 | 97,849,000 | | | 97,849,000 |
| 14 | 113,187,000 | | | 113,187,000 |
| 15 | 110,150,000 | | | 110,150,000 |
| 16 | 111,279,000 | 6,111,000 | | 117,390,000 |
| 17 | 87,721,000 | 11,448,000 | | 99,169,000 |
| 18 | 61,208,000 | | | 61,208,000 |
| 19 | 56,697,000 | | | 56,697,000 |

| Módulo de riego | Gravedad | Pozo Federal | Pozo particular* | Total |
|-----------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| m ³ | | | | |
| 20 | 34,498,000 | | | 34,498,000 |
| 21 | 59,506,000 | | | 59,506,000 |
| 22 | 65,683,000 | | | 65,683,000 |
| fdlc* | 24,118,000 | | | 24,118,000 |
| Total | 1,494,252,000 | 519,166,000 | 200,000,000 | 2,213,418,000 |

*fdlc, fuera de los límites de concesión del DR014.

La demanda mensual de agua en el DR014 se calculó tomando como punto de partida al promedio mensual de las entregas de agua a México para el periodo de 2005 a 2018, presentados por [Rangel-Parra \(2022\)](#). A partir de esta información, se estimó el porcentaje mensual de la demanda de agua en el DR014 ([Tabla 7](#)).

Tabla 7

Demanda de agua mensual en el Distrito de Riego 014.

| Mes | Demanda total DR014 (%) |
|------------|-------------------------|
| Enero | 8.94 |
| Febrero | 10.52 |
| Marzo | 13.57 |
| Abril | 12.84 |
| Mayo | 7.15 |
| Junio | 7.39 |
| Julio | 7.89 |
| Agosto | 6.68 |
| Septiembre | 6.11 |
| Octubre | 4.80 |
| Noviembre | 6.35 |
| Diciembre | 7.76 |

La tasa de recarga por Módulo de Riego en metros por día para cada mes se estimó multiplicando el volumen total asignado a cada módulo de riego ([Tabla 6](#)) por la demanda de agua mensual ([Tabla 7](#)). El valor resultante se dividió entre el número de días de cada mes y se dividió entre la superficie en m² de los módulos para obtener el volumen de agua aplicado por metro cuadrado. El resultado se multiplicó por el porcentaje de recarga, que corresponde a la diferencia del total de agua menos la eficiencia (100% - eficiencia) en el sistema de conducción de agua en el DR014.

Los archivos vectoriales correspondientes a la recarga contienen:

1. Geometría de los polígonos de cada módulo de riego del DR014.

2. Tasa de recarga en m/d para cada mes simulado.

4.2.4.3.2 Extracción de agua subterránea

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, la zona de estudio carece de mediciones sistemáticas de los volúmenes extraídos del acuífero mediante los pozos existentes en el DR014, por lo que, también fue necesario estimar la extracción de agua subterránea. A continuación, se describe la metodología utilizada.

El primer paso fue la localización geográfica de los pozos de extracción en la zona de estudio tomando como referencia la ubicación que indica el REPDA para las concesiones de agua subterránea en el DR014. Para ello se visualizaron imágenes satelitales de alta resolución en el software [Google Earth \(2019\)](#), en la [figura 28](#) se muestra el ejemplo de la visualización de uno de los pozos encontrados en la zona de estudio.

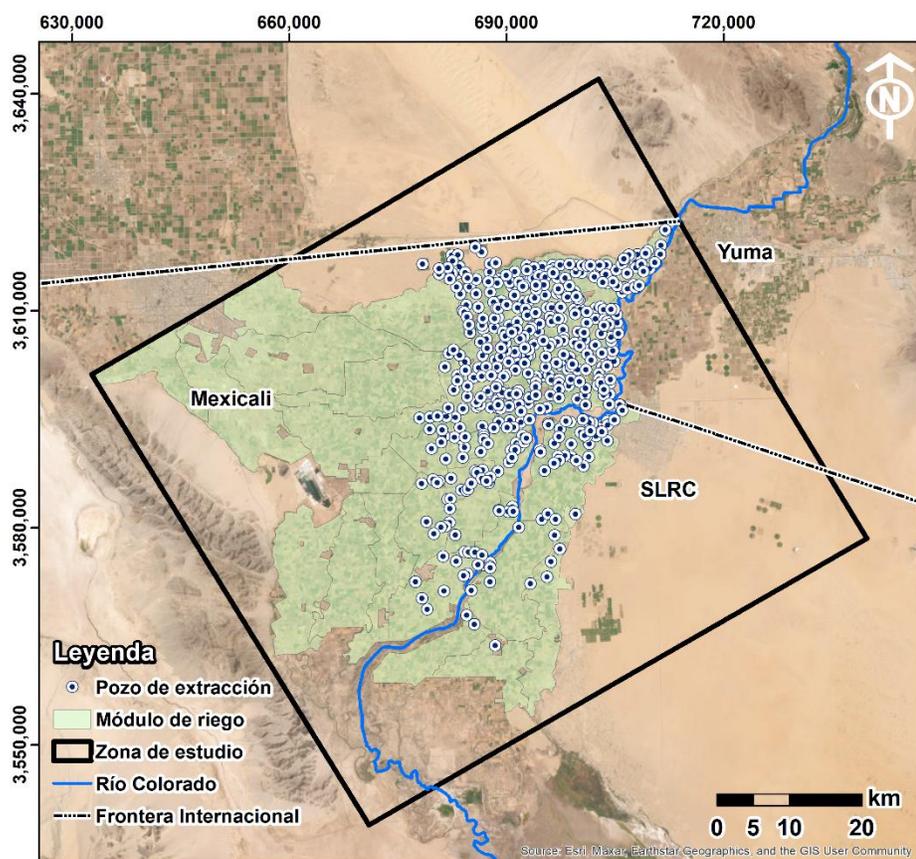
Figura 28 *Pozo ubicado mediante el uso de imágenes satelitales de alta resolución en el Módulo de Riego 9a.*



Una vez ubicados los pozos ([Figura 29](#)), se procedió a cuantificar el número correspondiente a cada Módulo de Riego. Posteriormente, se estimó la extracción de agua subterránea para el

ciclo agrícola 2018-2019 en cada pozo, utilizando la información proporcionada por la [CONAGUA \(2019\)](#) y el [Distrito de Riego 014 \(2015\)](#).

Figura 29 *Localización de los pozos de extracción.*



El volumen de agua subterránea asignado para riego por módulo ([Tabla 6](#)) se multiplicó por la demanda de agua mensual ([Tabla 7](#)). El resultado se dividió entre el número de pozos por módulo de riego y entre el número de días de cada mes para obtener el volumen diario extraído.

Como parte del proceso de estimación se generó una base de datos que contiene la información de la extracción de agua subterránea para cada módulo de riego, y los pozos localizados fuera del Distrito de Riego 014. La base de datos consta de la siguiente información:

1. Módulo de riego en el que se encuentra el pozo.

2. Número local de identificación del pozo.
3. Localización del pozo, coordenadas X, Y en sistema UTM WGS84 Z11N.
4. Día del ciclo agrícola 2018-2019.
5. Caudal extraído en m³/d.

4.2.4.3.3 Evapotranspiración

La tasa de evapotranspiración diaria utilizada en esta investigación solo se definió para el área del corredor ripario del Delta del Río Colorado, la cual corresponde al valor promedio diario (mm/d) calculada por [Nagler et al., \(2022\)](#) para los años 2018 y 2019. [Nagler et al., \(2022\)](#) estimó la evapotranspiración mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat, particularmente con el Índice de Vegetación Mejorado de Dos Bandas (EVI2) y con los datos de la evapotranspiración potencial de la estación meteorológica AZMET Yuma Valley, ubicada en el Valle de Yuma, Arizona.

La profundidad máxima a la que se pierde el agua por evapotranspiración (*Extinction depth*) se ingresó a 4.5 m, valor utilizado por [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#) para la zona de estudio. La base de datos correspondiente al paquete de evapotranspiración incluye:

1. Las coordenadas X, Y, de las áreas donde existe presencia de vegetación riparia.
2. Tasa de evapotranspiración en m/d.
3. Profundidad máxima a la que se pierde agua por evapotranspiración

4.2.4.3.4 Río

Las variables necesarias para el funcionamiento de este paquete son: la elevación y la conductancia del lecho del río, y la elevación del tirante de agua superficial en cada celda que corresponde a la representación del río en el modelo. A continuación, se describe la metodología para la obtención de estas:

- Río Colorado

La elevación del lecho del Río Colorado se obtuvo de los levantamientos topobatimétricos *LiDAR (Light Detection and Ranging)* realizados por el Servicio Geológico de los Estados Unidos para el Corredor Ripario del Delta del Río Colorado. El correspondiente a 2014 (aguas abajo del puente de Mexicali-SLRC) con precisión vertical de 0.063 m (USGS, 2014) mientras que el del 2018 (aguas arriba del puente de Mexicali-SLRC) se llevó a cabo con una precisión de 0.03 a 0.025 m vertical (USGS, 2020). La elevación del agua superficial se obtuvo sumando el tirante de agua promedio a la elevación del lecho del río para cada tramo de la zona inundada del Río Colorado. Los valores de conductancia corresponden a los utilizados por Rodríguez-Burgueño (2012).

- Canal Todo Americano

La elevación del agua superficial se asignó con base en lo reportado por el USGS en las estaciones de monitoreo ubicadas dentro el canal, cuya información se encuentra publicada en el portal *Water Data* del USGS (2022). La elevación del lecho del canal se estimó restando a la elevación del agua superficial a la base de la geometría del canal de acuerdo con el reporte elaborado por el Buró de Reclamaciones de Estados Unidos (USBR, 1991). Los valores de conductancia iniciales fueron los utilizados por Diaz (2001).

4.2.4.4 Discretización espacial y temporal

La discretización horizontal y vertical de la malla se realizó en la interfaz gráfica ModelMuse (Winston, 2009), a partir la modelización realizada por Rodríguez-Burgueño (2012). En la figura 30 se muestra la ventana de ModelMuse en la cual se indicaron el número de columnas (*Number of columns*) y filas (*Number of rows*) así como el ancho de ambas (*Column y row width*), las coordenadas de origen (*Grid origen*), la orientación (*Grid angle*), así como el número de capas y la elevación de estas (*Layer group name y Bottom elevation*).

Figura 30 Creación de malla en ModelMuse.

Initial Grid

MODFLOW-2005 MODFLOW Version

Specify initial grid (optional)

172 Number of columns 100 Column width

93 Number of rows 100 Row width

6 Number of layers

Grid origin: Upper left corner

632696.9 X 30 Grid angle (degrees)

3601227 Y Vertical exaggeration

0 Z

| Layer group name | Bottom elevation |
|------------------|------------------|
| Model_Top | 0 |
| Layer 2 | -20 |
| Layer 3 | -60 |
| Layer 4 | -80 |
| Layer 5 | -120 |
| Layer 6 | -480 |
| Bottom | -500 |

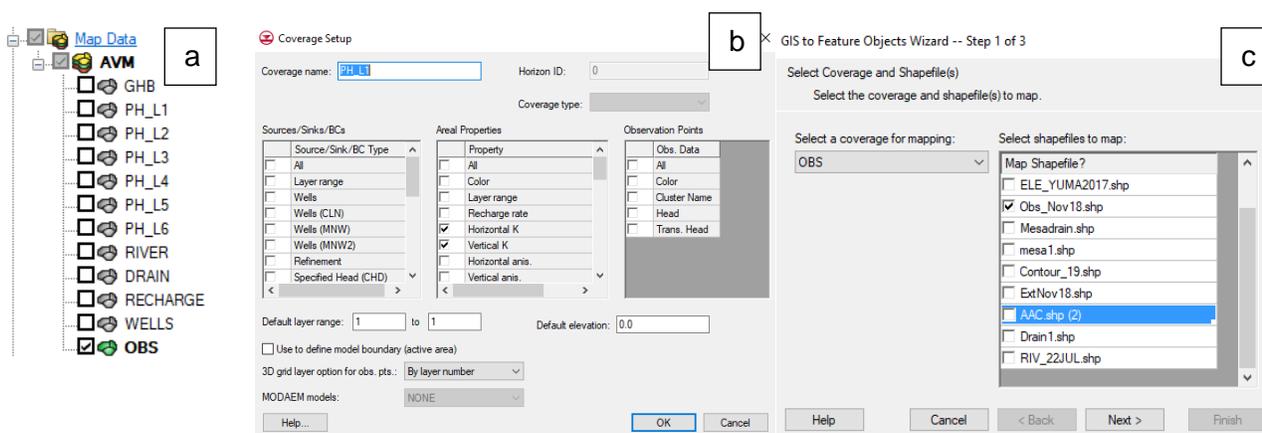
? Help No grid Finish

4.2.4.5 Asignación de las condiciones del medio físico y de frontera

Las propiedades hidráulicas del acuífero tales como conductividad hidráulica horizontal y vertical, el rendimiento específico y las condiciones de frontera se asignaron en el programa GMS mediante la importación de archivos vectoriales realizados en SIG de acuerdo con lo reportado en la bibliografía existente (Duffield, 2019), así como en las modelizaciones realizadas previamente por Díaz (2008) y Rodríguez-Burgueño (2012).

Para la asignación de las propiedades del medio físico se creó un modelo conceptual en GMS (Figura 31a), en el cual se agregaron las capas que se configuraron de acuerdo con las propiedades que contiene. Posteriormente, se importaron los archivos vectoriales a GMS, los datos que contienen dichos archivos se asignaron a las capas dentro del modelo (Figura 31). Por último, una vez configuradas las capas se exportaron al programa MODFLOW para su correcta lectura (Figura 31).

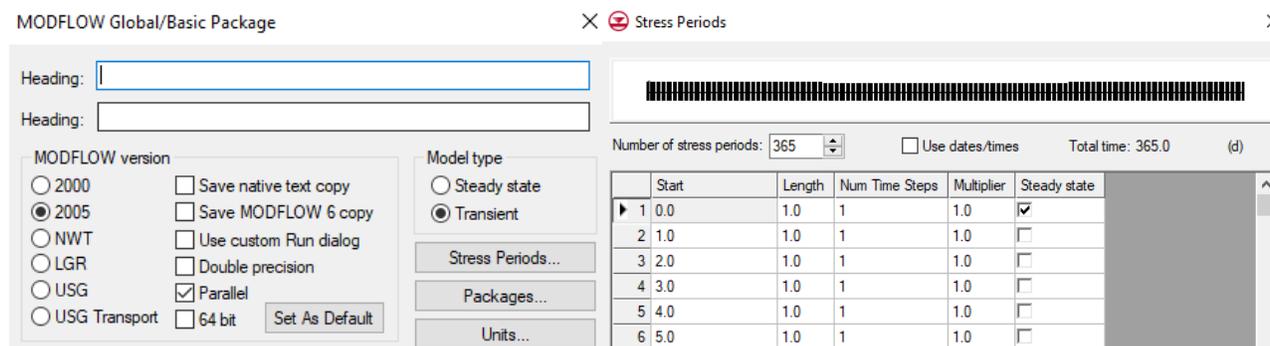
Figura 31 a) Modelo conceptual y sus capas; b) configuración de la capa; c) exportar capa vectorial al modelo conceptual.



4.2.4.6 Asignar tiempos de simulación

La asignación de los tiempos de simulación se realizó en GMS en el paquete *Basic*, en la figura 32b se muestran las ventanas en las que se indica la versión de MODFLOW que se utilizará, el tipo de modelo (estacionario o transitorio) (Figura 32a), los paquetes a utilizar, las unidades de medida, así como el número de periodos de estrés y la duración de estos (Figura 32b). Para este modelo se utilizaron simulaciones anuales con periodos de estrés diarios.

Figura 32 Discretización del tiempo en GMS. (a) Tipo de Modelo, (b) Número y duración de los periodos de estrés.



4.2.4.7 Simulación

Una vez incorporadas las bases de datos de cada paquete, las condiciones de frontera y los tiempos de simulación del modelo, se procedió a realizar las corridas en MODFLOW 2005 en la

interfaz gráfica GMS. La corrida en estado estacionario se realizó para los años de 1972 y 1994, los datos de entrada corresponden a lo simulado por [Diaz \(2001\)](#) y [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#).

La simulación en estado transitorio corresponde al ciclo agrícola 2018-2019, los datos utilizados y sus fuentes se detallan en el apartado 4.2.4.3 de este capítulo.

4.2.4.7.1 Calibración inversa

El proceso de calibración del modelo se realizó en GMS utilizando el código PEST (*Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis* [[Water Numerical Computing, 2021](#)]). La calibración inversa se lleva a cabo durante el proceso computacional en el que las conductividades hidráulicas de las capas del modelo se ajustan hasta alcanzar los valores de cargas hidráulicas observadas. Las mediciones de nivel freático realizadas durante esta investigación se utilizaron como los valores de carga observados durante la calibración. El flujo de trabajo general utilizado se muestra en la [figura 27](#).

4.2.4.7.2 Corrida de escenarios de los usos consuntivos del agua

La corrida de los escenarios se realizó en MODFLOW 2005 en la interfaz GMS modificando cada paquete de acuerdo con la información a representar de cada escenario propuesto.

4.2.5 Servicios ecosistémicos

4.2.5.1 Definición e indicadores para identificación y valuación

Los servicios ecosistémicos hidrológicos se definieron de acuerdo con el marco de teórico conceptual de esta investigación. Para su análisis se dividieron en (1) servicio de aprovisionamiento de agua para uso agrícola, (2) servicio de aprovisionamiento de agua para uso industrial, (3) servicio de aprovisionamiento de agua para uso público-urbano y doméstico, (4) almacenamiento de agua subterránea. Los indicadores utilizados para identificar y valorar los servicios ecosistémicos hidrológicos se seleccionaron de acuerdo con la literatura ([Favretto et al., 2016](#)).

4.2.5.1.1 Servicio de aprovisionamiento de aguas para uso agrícola

El valor del agua subterránea del acuífero Valle de Mexicali para uso agrícola en el Distrito de Riego 014 (DR014) se estimó mediante la [ecuación 24](#) (Yang y Liu, 2020):

$$V_1 = A_1 \times [(P \times YD_i - C_i)] \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde V_1 es el valor del agua subterránea para el uso agrícola; P es el precio de los productos agrícolas (\$); A_1 es el área agrícola bajo producción en el tiempo(ha); YD_i es la producción agrícola por unidad de área irrigada (ton/ha) y C_i es el costo de inversión anual (\$).

Los datos utilizados para el cálculo corresponden al ciclo agrícola 2013-2014 y fueron obtenidos del reporte interno de la Sociedad de Responsabilidad Limitada del DR014.

El valor del agua subterránea se estimó por cultivo, ciclo y módulo de riego, se crearon archivos de Excel con la información obtenida y determinada. Para ello fue necesario estimar el porcentaje de la superficie física establecida irrigada con agua de pozo (Total pozo), dicho valor se multiplicó por el rendimiento promedio (RP) para obtener la producción agrícola en toneladas de la superficie irrigada por pozo (Producción pozo), el resultado se multiplicó por el precio medio rural (PMR) para determinar el valor de la producción (VP), a dicho valor se le restó el costo de producción, que corresponde la inversión para la producción del cultivo (CDP) obtenido de acuerdo con información del DR014 ([SDRL DR014, 2015](#)) para obtener el valor neto de la producción agrícola (VNP) en pesos.

4.2.5.1.2 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso industrial

De acuerdo con [Yang and Liu \(2020\)](#), el valor económico del agua subterránea para uso industrial se aproxima a la disposición promedio a pagar o al valor excedente del consumidor, para estimarlo se utilizó la [ecuación 25](#).

$$V_2 = P_0 Q_1 \frac{[P_a/P_0]^{n+1} - 1}{n + 1} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde V_2 es el valor del agua subterránea para el uso industrial ($\$/m^3$); P_0 es el precio de referencia del agua utilizado en la industria (\$); P_a es el precio asequible del agua en la industria (\$); Q_1 es el volumen de agua subterránea utilizada en la industria (m^3) y n es la elasticidad de la demanda del agua industrial en el área de estudio (adimensional).

Las fuentes utilizadas para estimar el valor del agua subterránea para el uso industrial para el año 2020 fueron la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM, 2020), el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) y la Ley de Ingresos del Estado de Baja California para el Ejercicio Fiscal del año 2020 (GobBC, 2020).

Para obtener el volumen de agua subterránea utilizada en la industria se descargó del portal del REPDA una base de datos con los títulos de concesión del acuífero Valle de Mexicali con fecha de corte al 31 de diciembre del 2020, donde se presenta el titular, tipo de uso, la fecha de registro y el volumen de agua subterránea concesionada. Se aplicó un filtro a la base de datos dejando únicamente el uso industrial sin considerar la industria de generación de energía geotérmica.

4.2.5.1.3 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso doméstico, urbano y rural

El valor económico del agua subterránea para uso doméstico, urbano y rural se estimó utilizando el excedente del consumidor como disposición a pagar el servicio del agua. Se estimó mediante la [ecuación 26](#):

$$V_3 = P_1 Q_2 \frac{[P_b/P_1]^{n+1} - 1}{n + 1} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde V_3 es el valor del agua subterránea para el uso doméstico, urbano y rural ($\$/m^3$); P_1 es el precio de referencia del agua para uso doméstico (\$); P_b es el precio asequible del agua (\$); Q_2 es el volumen de agua subterránea utilizada para uso público-urbano y doméstico (m^3) y n es la elasticidad de la demanda del agua en el área de estudio (adimensional).

Las fuentes de información consultadas para realizar dicha estimación para el año 2020 fueron la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali ([CESPM, 2020](#)), el [REPDA \(2020\)](#) y la Ley de Ingresos del Estado de Baja California para el Ejercicio Fiscal del año 2020 ([GobBC, 2020](#)).

Para obtener el volumen de agua subterránea para uso público-urbano y doméstico se descargó del portal del REPDA una base de datos con los títulos de concesión del acuífero Valle de Mexicali con fecha de corte del 31 de diciembre del 2020, en donde se incorporó el nombre del titular, la fecha de registro y el volumen de agua subterránea concesionada. Se aplicó un filtro a la base de datos dejando únicamente los usos domésticos y público-urbano concesionados a la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali.

4.2.5.1.4 Conservación de agua

En esta investigación el valor económico de la conservación del agua en el área de estudio se analizó utilizando el enfoque del proyecto sombra.

Para estimar el volumen de almacenamiento del acuífero se utilizaron las propiedades hidráulicas descritas previamente en esta investigación, posteriormente se aplicó la [ecuación 27](#) propuesta por [Yang y Liu \(2020\)](#).

$$V_4 = Q_3 C_2$$

Ecuación 27

Donde V_4 es el valor del servicio de almacenamiento de agua ($\$/m^3$), Q_3 es el volumen de agua subterránea almacenado en el área de estudio (m^3) y C_2 es el costo del reservorio para almacenar $1 m^3$ de agua (\$).

4.2.5.1.5 Purificación de agua

Para analizar la purificación de agua como un servicio ecosistémico hidrológico brindado por el acuífero Valle de Mexicali se estimó utilizando la [ecuación 28](#) propuesta por [Yang y Liu \(2020\)](#). Los datos utilizados fueron utilizados fueron de [CESPM \(2020\)](#).

Ecuación 28

$$V_5 = Q_4 f_1 C_3$$

Donde, V_5 es el valor del agua subterránea en el servicio de purificación de agua, Q_4 es el volumen de agua residual anual ($m^3/año$), f_1 son las pérdidas por conducción (tasa de infiltración) ($m^3/año$) y C_3 es el costo de tratamiento de $1m^3$ de agua en el área de estudio (\$) obtenido de acuerdo con información de la [CESPM \(2020\)](#).

4.2.5.1.6 Recreación

La estimación del valor recreacional del agua subterránea como servicio ecosistémico hidrológico se realizó utilizando los resultados de la disposición a pagar estimada con el método de Valuación Contingente presentada por [Kerna et al., \(2017\)](#) para la zona de estudio. [Kerna et al., \(2017\)](#) elaboró y aplicó 584 encuestas en sitios de baja y alta amenidad en el Valle de Mexicali.

Capítulo 5. Resultados y discusión

Los resultados de esta investigación se muestran a continuación.

5.1 Trabajo de campo

5.1.1 Monitoreo de los niveles piezométricos de agua subterránea

El monitoreo de los niveles piezométricos de agua subterránea en el acuífero Valle de Mexicali se realizó durante 11 campañas mensuales, de noviembre del 2018 a octubre del 2020.

A partir del análisis de los datos obtenidos, tanto de las mediciones manuales como de los registros automáticos ajustados de los transductores ([Anexo 1](#)) se encontró que, en la zona de la Mesa Arenosa de Andrade la profundidad al nivel freático se ha incrementado en hasta 7.91 m en un periodo de 8 años. En promedio, la tendencia indica una evolución negativa de 0.48 m/año ([Tabla 8](#)). Se infiere que esta tendencia es un efecto del revestimiento de una porción del CTA (Proyecto finalizado en 2008), puesto que en los pozos ubicados al Oeste de la misma Mesa en la sección paralela donde el CTA no fue revestido la profundidad al nivel freático solo incrementó 0.19 m/ año en promedio, tendencia menor a la de la porción Este de la misma zona en la cual fue revestido el CTA (-0.60 m/año).

En los pozos de observación ubicados en la porción Noreste de la zona de estudio ([ver Anexo 1, figuras 11 a 15](#)), se encontró que las variaciones en el nivel freático responden a los bombeos de los pozos de extracción cercanos, en esta zona la profundidad al nivel freático se ha incrementado en 0.05 m/año, en promedio ([Tabla 8](#)). Lo anterior, se atribuye principalmente a la recarga proveniente de las infiltraciones de la Presa Morelos, el canal Álamo y Reforma y el Río Colorado.

Respecto a la zona Centro del área de estudio se encontró que, en promedio la profundidad del nivel freático se ha incrementado 0.39 m/año. Sin embargo, otros pozos de esta misma zona muestran abatimientos de entre 0.17 y 0.69 m/año ([ver Anexo 1, figura 26 y 16](#)). Esta tendencia se atribuye a la extracción por bombeo, puesto que, en los Módulos de Riego 5 y 7

(correspondientes a la ubicación de los pozos de observación) el agua subterránea es la fuente principal de abastecimiento, de acuerdo con datos de la CONAGUA (2019), ambos módulos concentran el 31% del volumen total de agua subterránea (federal y particular) concesionada para el DR014.

Del análisis de la evolución de la profundidad al nivel freático en la zona Sur se encontró que, en promedio, se ha incrementado 0.09 m/ año (Tabla 8). A excepción del pozo G-1-7 (ver Anexo 1, figura 30), el resto de los pozos ubicados al Sur de la red de monitoreo responden a los retornos de riego agrícola. Al Este de la zona de estudio, en SLRC se observó un abatimiento promedio de hasta 3.02 m en los últimos 6 años; en esta zona la profundidad al nivel freático se incrementó 0.43 m por año. Esta tendencia se atribuye a la extracción de los pozos ubicados en la Mesa Arenosa de SLRC.

Tabla 8 Evolución de la profundidad del nivel freático en los pozos de monitoreo (Datos de CONAGUA-UABC, 2020).

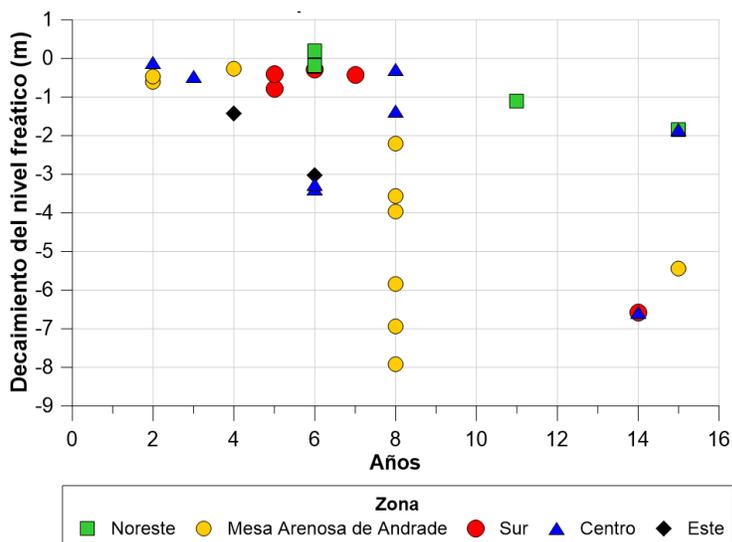
| Pozo | Periodo | Número de años con datos | Módulo de Riego | Evolución durante el periodo con datos (m) | Evolución (m/año) |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------|-----------------|--|-------------------|
| Zona Mesa Arenosa de Andrade | | | | | |
| BC10-CNA-1 | 2012-2020 | 8 | FDDR014 | -5.85 | -0.73 |
| BC10-CNA-2 | 2012-2020 | 8 | FDDR014 | -6.93 | -0.87 |
| BC10-CNA-3 | 2012-2020 | 8 | FDDR014 | -7.91 | -0.99 |
| BC10-CNA-4 | 2012-2020 | 8 | FDDR014 | -3.57 | -0.45 |
| BC10-CNA-5 | 2012-2020 | 8 | FDDR014 | -2.21 | -0.28 |
| BC10-CNA-6 | 2012-2020 | 8 | FDDR014 | -3.96 | -0.50 |
| C-67 | 2017-2019 | 2 | FDDR014 | -0.61 | -0.31 |
| BC10-05 | 2016-2020 | 4 | FDDR014 | -0.26 | -0.07 |
| PEMA-6 | 2018-2020 | 2 | FDDR014 | -0.48 | -0.24 |
| J-14 | 2005-2020 | 15 | FDDR014 | -5.45 | -0.36 |
| Promedio | | | | | -0.48 |
| Zona Noreste | | | | | |
| J-3 Algodones | 2014-2020 | 6 | 4 | -0.20 | -0.03 |
| G-3-9 | 2014-2020 | 6 | 4 | 0.19 | 0.03 |
| G-3-13 | 2014-2020 | 6 | 4 | -0.19 | -0.03 |
| 53-E | 2009-2020 | 11 | 4 | -1.10 | -0.10 |
| J-1 | 2005-2020 | 15 | 4 | -1.85 | -0.12 |
| Promedio | | | | | -0.05 |
| Zona Centro | | | | | |
| 7-3-I-1 | 2012-2020 | 8 | 5 | -5.49 | -0.69 |
| 2-JRM | 2012-2020 | 8 | 16 | -3.8 | -0.48 |
| 8-L.C. | 2015-2020 | 5 | 16 | -2.66 | -0.53 |
| 14-VH | 2012-2020 | 8 | 4 | -4.55 | -0.57 |

| Pozo | Periodo | Número de años con datos | Módulo de Riego | Evolución durante el periodo con datos (m) | Evolución (m/año) |
|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------------|--|-------------------|
| Zona Centro | | | | | |
| R-107 | 2014-2020 | 6 | 4 | -3.38 | -0.56 |
| G-1-15 Piloto | 2012-2020 | 8 | 16 | -1.37 | -0.17 |
| 4-LESSER | 2017-2020 | 3 | 14 | -0.48 | -0.16 |
| 10-BÓRQUEZ | 2014-2020 | 6 | 4 | -3.27 | -0.55 |
| BC10-15 | 2018-2020 | 2 | 15 | -0.11 | -0.06 |
| 4-CH | 2012-2020 | 8 | 17 | -0.29 | -0.04 |
| 15-II-3 | 2005-2019 | 14 | 7 | -6.58 | -0.47 |
| Promedio | | | | | -0.39 |
| Zona Sur | | | | | |
| 42-CH-B | 2015-2020 | 5 | 10 | -0.79 | -0.16 |
| G-1-17 | 2012-2019 | 7 | 10 | -0.44 | -0.06 |
| 105-C | 2014-2020 | 6 | 9B | -0.29 | -0.05 |
| G-1-7 | 2015-2020 | 5 | FDDR014 | -0.41 | -0.08 |
| Promedio | | | | | -0.09 |
| Zona Este (SLRC) | | | | | |
| G-4-20 | 2016-2020 | 4 | FDDR014 | -1.42 | -0.36 |
| I-12 | 2014-2020 | 6 | FDDR014 | -3.02 | -0.50 |
| Promedio | | | | | -0.43 |

Figura 2

En resumen, la [figura 33](#) muestra el análisis de la evolución de las profundidades al nivel freático durante el periodo con datos. Se encontró que la zona de la Mesa Arenosa de Andrade, seguido por la zona central, son las zonas con mayor decaimiento del nivel.

Figura 33 Evolución de la profundidad del nivel freático por periodo. Datos de [CONAGUA-UABC, 2020](#).

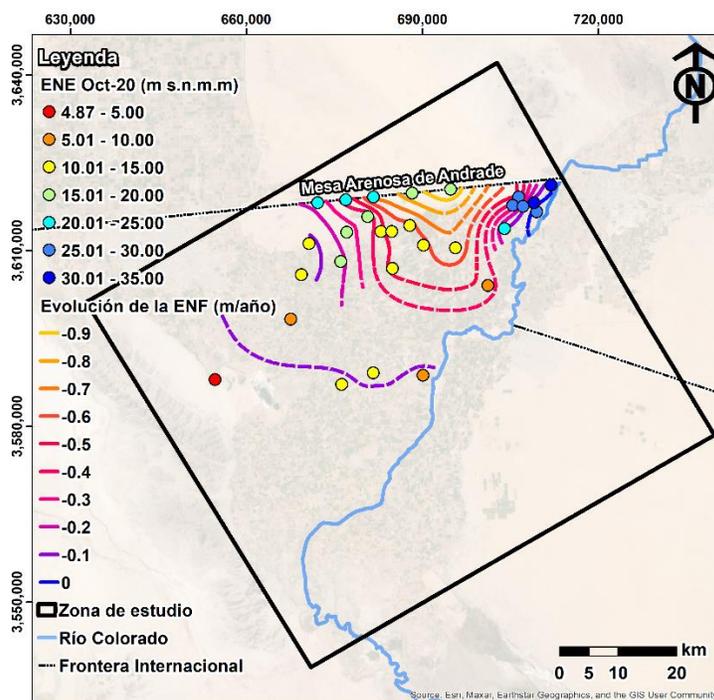


5.2 Trabajo de gabinete

5.2.1 Análisis de la información de nivel freático

Las elevaciones del nivel freático medidas manualmente en los pozos de monitoreo para el mes de octubre de 2020 se muestra en la [figura 34](#). En ella se puede observar que las mayores elevaciones se encuentran en la porción Noreste de la zona de estudio. Por el contrario, las elevaciones de agua subterránea menores se encuentran al Suroeste del área de estudio. En la zona de la Mesa Arenosa de Andrade la elevación del nivel freático oscila entre 15 y 25 m s.n.m. y disminuye hacia el Suroeste y el flujo preferencial es en dirección noreste a suroeste, norte a sureste y, norte a suroeste que coinciden con las reportadas por la CONAGUA para el año 2006. Los contornos de evolución de la elevación del nivel freático anual del periodo 2018-2020 calculada con los datos disponibles ([Tabla 8](#)) se muestra en la [figura 34](#).

Figura 34 Elevación del nivel freático (ENE) medido manualmente para octubre del 2020 y su evolución de acuerdo con los periodos indicados en la [tabla 8](#). Datos de [CONAGUA-UABC, 2020](#).



5.2.2 Análisis de la gobernanza del AVM

El presente capítulo forma parte del análisis y los resultados presentados en el capítulo del libro número 9 titulado “A governance panorama of an aquifer in a semi-arid region, Mexico” editado por la UNESCO y el International Centre for Water Security and Sustainable Management ([Cital et al., 2021](#)).

5.2.2.1 Definición de indicadores

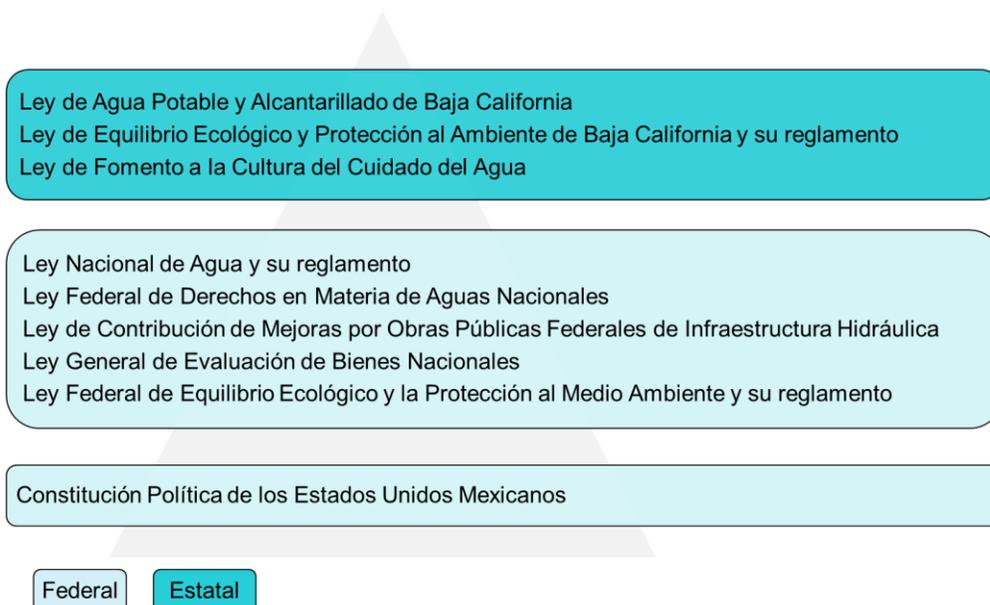
El resultado del RWD estimado con los datos publicados en la actualización de la Disponibilidad Media Anual del Acuífero Valle de Mexicali ([DOF, 2018](#)) fue de 2.07. Este valor refiere un uso de agua en un régimen no sustentable. Este valor es incluso mayor que el del acuífero de la Ciudad de México, uno de los acuíferos con mayor estrés hídrico en el país, donde el RWD es de 1.7 ([Rivera, 2007](#)).

Respecto al SC, el resultado fue de -0.35. Este valor se relaciona con la pérdida de almacenamiento de agua subterránea en el acuífero Valle de Mexicali.

5.2.2.2 Marco Legal

El marco legal del agua subterránea en México está basado en lo publicado en el Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En este artículo se declara que las aguas del territorio mexicano, incluidas las subterráneas, son de la Nación. El Gobierno Federal mediante la Comisión Nacional del Agua, regula el uso, la extracción y la protección mediante restricciones (veda) del agua subterránea. México al ser una República, los Estados y Municipios cuentan con su propia legislación ([Cital et al., 2021](#)). En la [figura 35](#) se presentan el marco legal de las aguas subterráneas en estudio.

Figura 35 *Marco legal de las aguas subterráneas del acuífero Valle de Mexicali. Modificado de Cital et al., (2021).*



En las leyes y reglamentos mostrados en la [figura 35](#), las actividades de cada institución gubernamental están definidas. En ellas se detallan los derechos y obligaciones tanto de las instituciones como de los usuarios, además de los mecanismos de gestión del agua; algunos de ellos incluyen la regulación para la protección de la calidad del agua. Sin embargo, ninguna de las leyes y sus reglamentos en vigor es específica para las aguas subterráneas o superficiales ([Cital et al., 2021](#)).

5.2.2.3 Marco Institucional

En México, el marco institucional de administración y gestión del agua es centralizado. La Comisión Nacional del agua es un órgano administrativo, normativo, técnico consultivo y desconcentrado de la Secretaría de Recursos Naturales (SEMARNAT). La CONAGUA opera y aplica las leyes públicas en materia de aguas nacionales y es la institución que otorga las concesiones de agua (superficial y subterránea), además determina y supervisa la protección de la cantidad y calidad de agua, además acredita, apoya y organiza la participación de los usuarios para mejorar la gestión del agua, entre otras actividades ([Cital et al., 2021](#)).

Debido a que la zona de estudio se ubica en una región fronteriza, otra institución gubernamental que tiene aplicabilidad es la Comisión Nacional de Límites y Aguas (CILA). Esta agencia cuenta con una contraparte estadounidense y, en conjunto, trabajan temas relacionados con los límites territoriales, agua superficial y subterránea, calidad de agua y saneamiento, así como proyectos relacionados con el cruce entre ambos países (MEX-EU) ([GobMex, 2014](#)).

Otra institución gubernamental con injerencia en los asuntos hídricos, a nivel estatal, es la recientemente creada Secretaría para el Manejo, Saneamiento y protección del Agua (SEPROA). Esta secretaría es la encargada de diseñar y coordinar las políticas públicas en materia de gestión de los recursos hídricos, así como del uso del agua ([Periódico Oficial del Estado de Baja California, 2020](#)). Por otro lado, se encuentra la Comisión Estatal del Agua (CEA), que es el organismo paraestatal encargado de administrar, operar y mantener el acueducto Río Colorado-Tijuana e instalaciones complementarias para la conducción y distribución del agua en bloque para abastecer a Tecate, Tijuana, Playas de Rosarito y Ensenada ([CEA, 2022](#)).

A nivel local, se encuentra un organismo descentralizado del Gobierno Estatal, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM). La CESPM se encarga de la planeación, construcción, operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario ([CESPM, 2020](#)). Sin embargo, es importante denotar que el Artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos establece que el gobierno municipal es el encargado de la administración y gestión de los servicios de agua en las ciudades ([Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, 1917](#)), lo que no ocurre en Baja California ([Cital et al., 2021](#)).

Particularmente en los valles de Mexicali y SLRC, este último en el estado vecino de Sonora, opera el DR014 conformado por 23 Módulos de Riego. Este último de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales se define como un área geográfica en la cual se entrega agua a los usuarios

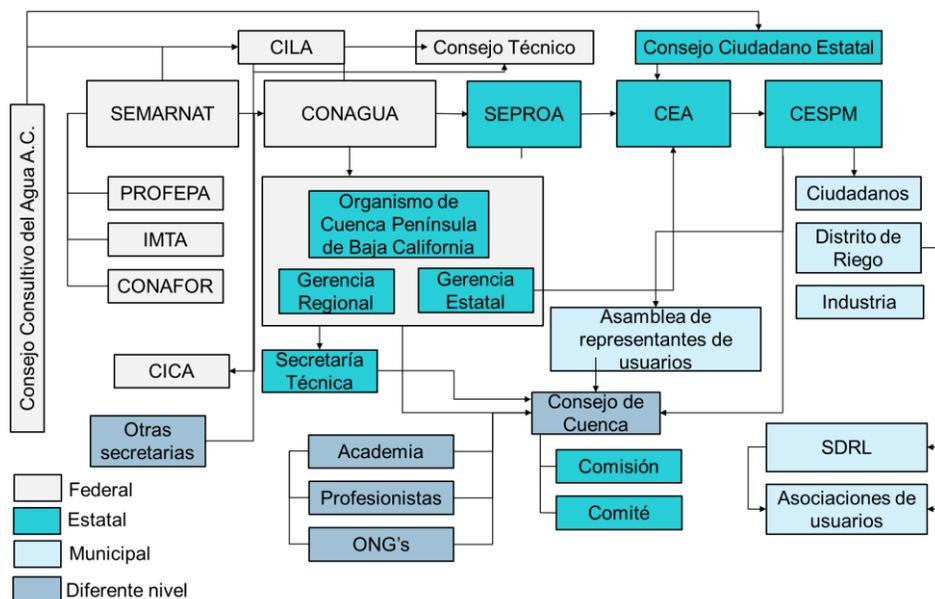
de una misma organización; estos se encargan de la operación y conservación de la infraestructura hidráulica dentro de los límites de su área (LAN, 2022).

El DR014 cuenta con infraestructura hidráulica para la derivación de aguas superficiales (canales y drenes) y extracción de agua subterránea (pozos). La Sociedad de Responsabilidad Limitada (SDRL), opera los pozos de extracción y la red mayor de canales y drenes. La SDRL se conforma por los presidentes de cada módulo de riego y dentro de las facultades de los módulos se encuentra la supervisión y gestión de la red menor de canales y drenes.

Por otro lado, se encuentra el Consejo de Cuenca Península de Baja California y San Luis Río Colorado, Sonora, el cual está integrado por miembros de la academia, organizaciones de la sociedad civil o ONG's, instituciones gubernamentales y no gubernamentales, representantes de la sociedad y otros. Dentro de las facultades del Consejo de Cuenca se encuentra la coordinación, concertación, apoyo, consulta y asesoría entre la CONAGUA, las dependencias, entidades de las instancias federales, estatales o municipales, los representantes de los usuarios del agua y asociaciones de la sociedad de la región hidrológica administrativa correspondiente (LAN, 2020).

A manera de resumen, la [figura 36](#) muestra las relaciones entre las instituciones que inciden en la política pública, manejo, administración, derivación, etc. del agua. Sin embargo, estas relaciones inter e intrainstitucionales no siempre proceden en la práctica y el proceso de toma de decisiones es a veces unilateral.

Figura 36 Esquema del funcionamiento de las instituciones de administración y gestión del agua en México. Modificado de [Constantino et al., \(2011\)](#) y [Cital et al., \(2021\)](#). CILA: Comisión Internacional de Límites y Aguas; SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente; IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua; CONAFOR: Comisión Nacional Forestal; CONAGUA: Comisión Nacional del Agua; CICA: Centro de Información y Consulta del Agua; SEPROA: Secretaría para la Gestión, Saneamiento y protección del Agua; CEA: Comisión Estatal del Agua; CESPM: Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali; SDRL: Sociedad de Responsabilidad Limitada.



Además de las relaciones inter e intrainstitucionales que existen en materia del agua, al encontrarse en una zona fronteriza también existe la cooperación binacional.

Tratados históricos en materia de aguas superficiales transfronterizas a lo largo de la frontera entre México y Estados Unidos han sido aplicados, por ejemplo, el Tratado de Guadalupe-Hidalgo en 1848 y el Tratado La Mesilla en 1853 ([CILA, 1848; 1853](#)). Particularmente para la zona de estudio, el más importante de ellos es el Tratado entre el Gobierno de Estados Unidos de América y los Estados Unidos Mexicanos Utilización de las Aguas Internacionales de los Ríos Colorado, Tijuana y Bravo ([CILA, 1944](#)). En este tratado, 1,850 hm³ anuales de agua superficial del Río Colorado fueron asignados a México, para hacer operativo el cumplimiento del Tratado, se firman acuerdos específicos, denominados actas ([Cital et al., 2021](#)). A

continuación, se describen algunas de la más relevantes por su contenido y relación con las aguas subterráneas.

El acta 242 que lleva el título de Solución Permanente y Definitiva del Problema Internacional de la Salinidad del Río Colorado señala varias acciones binacionales para una solución permanente y definitiva al problema de salinidad en el Río Colorado. El Acta 242 incluye un acuerdo sobre las aguas subterráneas, estableciendo que *“cada país limitará el bombeo de aguas subterráneas en su territorio dentro de los ocho kilómetros de la frontera entre Arizona y Sonora, cerca de San Luis a 197.3 hm³ por año”*. Para evitar futuros problemas, *“los Estados Unidos y México se consultarán mutuamente antes de emprender cualquier nuevo desarrollo de los recursos hídricos superficiales o subterráneos, o de realizar modificaciones sustanciales de los desarrollos actuales en su propio territorio en la zona fronteriza que puedan afectar negativamente al otro país”* (CILA, 1973, Pág. 3).

El Acta 319 tiene una importancia significativa para la mejora de la gestión binacional del agua en el Río Colorado. Esta Acta se relaciona con al menos tres actas firmadas anteriormente: Acta 306, Acta 317 y Acta 318 (Sánchez y Cortez-Lara, 2015). El acta 319 se redactó tras las condiciones de sequía persistentes en la cuenca del Río Colorado y tras el terremoto del 2010 en el Valle de Mexicali (Cital et al., 2021).

Además, el Acta 319 incluyó la creación de un programa piloto de agua para el ambiente de 195 hm³ durante los cinco años de vigencia del acta, así como la posibilidad México siga almacenando agua en el Lago Mead (CILA, 2012).

A pesar de que el Acta 319 no se refiere a las aguas subterráneas, su implementación tuvo un efecto positivo en el acuífero como consecuencia de las entregas de los flujos ambientales mencionados en el cauce del Río Colorado y a los sitios de restauración, donde el agua infiltrada recargó el acuífero (IBWC, 2018; Rodríguez-Burgueño, 2017). Como extensión de estas mediciones cooperativas, en 2017 se firmó el Acta 323, la que se implementará por un periodo de 7 años y se discutirá en el siguiente apartado.

El Acta 323 titulada Ampliación de las medidas de cooperación y adopción de un plan binacional de contingencia ante la escasez de agua en la Cuenca del Río Colorado, es la ampliación del Acta 319. Esta acta proporciona directrices para compartir excedentes y escasez, establece la "Reserva de Agua Mexicana" para el almacenamiento voluntario adicional, enfatiza la cooperación con respecto a la salinidad y la variabilidad hidrológica, incluye disposiciones de agua para caudales ambientales para la restauración ecológica y amplía la inversión en proyectos de conservación de agua en México (CILA, 2017; Rivera-Torres y Gerlak, 2021).

5.2.2.4 Instrumentos de gestión

Varios instrumentos de gestión del agua están definidos en el marco legal, particularmente en la Ley de Aguas Nacionales; estos son: 1) los Programas Hídricos Nacionales y Regionales, 2) las concesiones de agua, 3) las restricciones de bombeo, 4) el Registro Público de Derechos de Agua, 5) el Plan de Gestión Integral de Acuíferos, 6) el Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), 7) las Actualizaciones de la Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea por acuífero, entre otros (Cital et al., 2021).

5.2.2.4.1 Programas Hídricos Nacionales y Regionales

Estos programas tienen como objetivo definir las estrategias y las líneas de acción de las políticas públicas para lograr la adecuada gobernabilidad de los recursos hídricos nacionales y regionales. A escala nacional, el objetivo principal es promover y fortalecer la gobernanza y gobernabilidad del agua (Cital et al., 2021). Las acciones incluidas en estos programas son:

- Hacer respetar el orden de prelación del uso del agua de acuerdo con lo establecido en la LAN.
- Modernizar y ampliar la medición del ciclo del agua.
- Incrementar la participación social y académica en la toma de decisiones, así como atender las demandas de información.

Las estrategias están orientadas en su mayoría a la gestión, modernización, y a la prevención de la contaminación del agua, pero hasta la fecha no han tenido éxito debido a factores estructurales, operativos, políticos y económicos, así como a la falta de monitoreo sistemático de los acuíferos (Cital et al., 2021).

En el Programa Hídrico del Estado de Baja California se establecieron varios proyectos y objetivos para los acuíferos. Una de las metas es la reducción de la extracción de agua subterránea a 456 hm³ por año para el año 2035 (CEABC, 2018). Además, se hace hincapié en la gestión de los recursos hídricos compartidos, incluidos los acuíferos transfronterizos. La gestión de estos acuíferos requiere la creación de nuevos tratados internacionales y del seguimiento de la aplicación de los tratados existentes. Sin embargo, estos programas se actualizan en cada periodo de gobierno, por lo que no se les da seguimiento para que se establezcan, adicionalmente los objetivos y estrategias carecen de alineación con los planes de gestión de la porción estadounidense del acuífero. Como resultado se cuenta con un acuífero transfronterizo multijurisdiccional con numerosas asimetrías entre cuatro Estados y dos países que lo comparten, lo que impide tener visión, cooperación y gestión verdaderamente internacional (Cital et al., 2021).

5.2.2.4.2 Registro Público de Derechos de Agua

Este registro provee información y sustento legal a los usuarios de las aguas nacionales, incluidas las aguas subterráneas y superficiales. Contiene el nombre del usuario, el tipo de uso, el volumen de agua concesionado, las coordenadas del aprovechamiento y el nombre del acuífero. Sin embargo, la información del REPDA no refleja la información real, debido a que los volúmenes de agua concesionados no se corroboran con mediciones del agua subterránea extraída (Kuri, 2018), ni se verifica la localización ni el número de los pozos.

5.2.2.4.3 Veda

Las extracciones de agua subterránea en el acuífero Valle de Mexicali se encuentran bajo restricción desde 1965. Esta restricción denominada “veda” establece que la capacidad del acuífero permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales y otros. Además, menciona que nadie puede extraer agua subterránea en la zona restringida para su bombeo, ni modificar los usos existentes sin el permiso previo y por escrito de la CONAGUA, la que solo se otorga en aquellos casos en los que los estudios técnicos concluyan que no se causarán daños (DOF, 1965). Actualmente este decreto sigue vigente, por lo que, en “teoría” cada uno de los pozos que extrae agua del acuífero cuenta con una concesión otorgada por la CONAGUA y cumple con el volumen establecido en la misma.

5.2.2.4.4 Plan Integral de los acuíferos Valle de Mexicali y San Luis Río Colorado

En 2013, como parte de un convenio de colaboración entre la CONAGUA y el IMTA, se elaboró el Plan Integral de los Acuíferos Valle de Mexicali y SLRC. Lamentablemente el plan no es público, se desconoce su contenido y si se esté aplicando (IMTA y CONAGUA, 2013).

Escenarios de usos consuntivos del agua

Los escenarios predictivos de los usos consuntivos del agua en la zona de estudio simulados en esta investigación en el modelo desarrollado corresponden a las condiciones de escasez y recorte de agua planteadas en el *Colorado River Interim Guidelines for Lower Basin Shortages and the Coordinated Operations for Lake Powell and Lake Mead* (DOI, 2007) así como a las reducciones de volúmenes de agua recuperables decretadas en el Acta 323 sobre la Ampliación de las Medidas de Cooperación y Adopción de un Plan Binacional de Contingencia ante la Escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado (CILA/IBWC, 2017). Las cuales se resumen en la [tabla 9](#).

Del análisis del Plan Binacional de Contingencia ante la Escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado del Acta 323 se establecieron 16 escenarios de gestión y manejo del agua en la zona

de estudio. En la [tabla 9](#) se muestran los detalles de los escenarios planteados en esta investigación.

Tabla 9 *Escenarios de gestión y manejo del agua en el DR014 planteados.*

| Escenario | % de cambio de la variable modificada | | Descripción de escenario |
|-----------|---------------------------------------|---------|--|
| | Extracción | Recarga | |
| 1 | ↓ 38.87 | | Volumen concesionado en el REPDA (agosto, 2022). |
| 2a | | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC |
| 2b | | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC |
| 2c | | ↓ 0.13 | Reducción PBCEARC |
| 2d | | ↓ 0.16 | Reducción PBCEARC |
| 2e | | ↓ 0.29 | Reducción PBCEARC |
| 2f | | ↓ 0.31 | Reducción PBCEARC |
| 2g | | ↓ 10.84 | Reducción PBCEARC |
| 3a | ↑ 12.83 | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 3b | ↑ 17.55 | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 3c | ↑ 23.84 | ↓ 0.13 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 3d | ↑ 25.06 | ↓ 0.16 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 3e | ↑ 27.26 | ↓ 0.29 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 3f | ↑ 28.90 | ↓ 0.31 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 3g | ↑ 46.35 | ↓ 10.84 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub |
| 4 | | ↓ 49.68 | Reducción PBCEARC e incremento de eficiencia en el DR014 |

PBCEARC: Plan Binacional de Contingencia ante la Escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado; agua sub: agua subterránea. ↑ Incremento; ↓ Decremento.

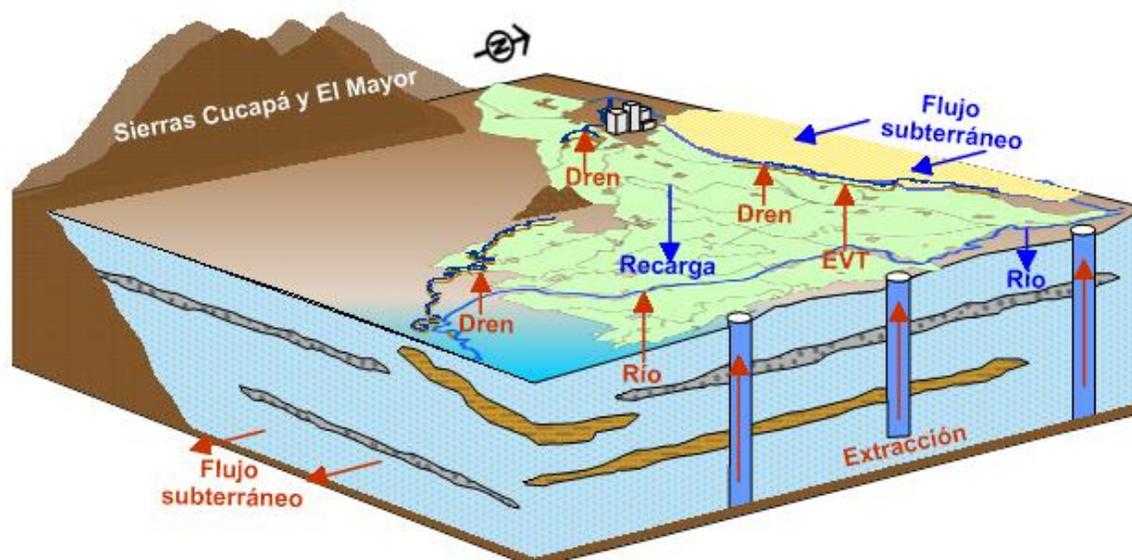
5.2.3 Modelo conceptual

El modelo conceptual desarrollado en esta investigación se fundamenta en los estudios y modelos numéricos realizados previamente por [Jacobo Villa \(1990\)](#), [Díaz \(2001\)](#); [LESSER \(2006\)](#), [Cázares Zepeda \(2008\)](#), [Feirstein et al., \(2008\)](#), [Pérez González \(2008\)](#), [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#), [Rodríguez-Burgueño \(2017\)](#), [Mohammed-Bushira \(2018\)](#) y [Lesser et al., \(2019\)](#). De forma esquemática, en la [figura 37](#) se muestran los componentes del balance de agua considerados en los estudios antes mencionados.

En la [figura 37](#) se puede observar un acuífero heterogéneo isotrópico, cuyas entradas son: 1) el flujo subterráneo, 2) la recarga por retorno de riego y pérdidas en los canales de riego y, 3) la infiltración y recarga de agua superficial por el Río Colorado; las salidas de agua subterránea son representadas por a) descargas hacia el Dren Mesa, el Río Nuevo, el Río Hardy y el Río

Colorado, b) pérdidas por evapotranspiración en el corredor ribereño del Delta del Río Colorado y c) la extracción mediante pozos de bombeo.

Figura 37 Elementos del modelo conceptual del acuífero Valle de Mexicali. Las flechas azules indican los procesos del agua subterránea de entrada y en color rojo los de salida. En color verde se indica la delimitación de los módulos de riego del DR014.



5.2.4 Modelo hidrogeológico numérico

El modelo hidrogeológico se conformó por una malla de 96 renglones, 172 columnas y 6 capas verticales de elevación 0, -20, -60-, -80, -120, -480 y -500, que corresponde a la discretización utilizada por Rodríguez-Burgueño (2012). En la tabla 10 se muestran las características de esta.

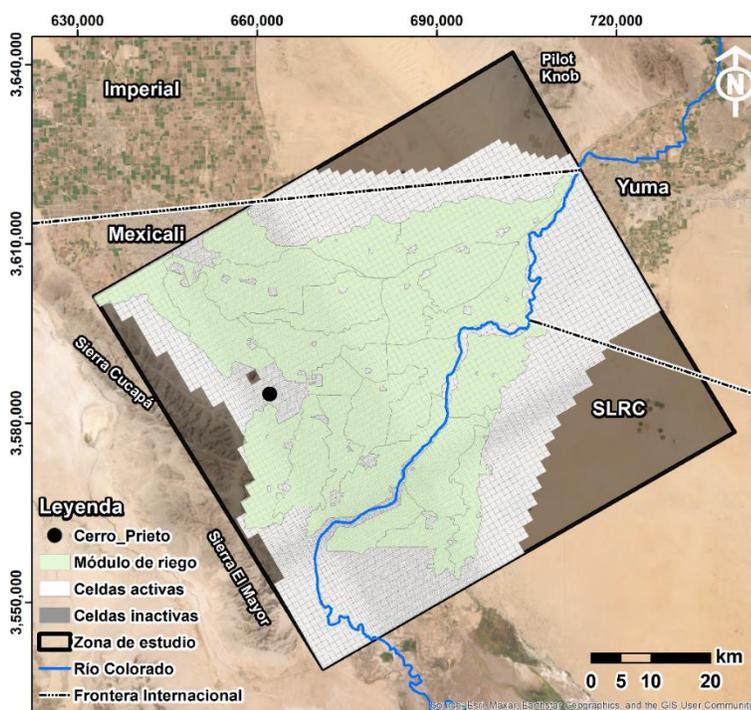
Tabla 10

Características de las celdas de la malla del modelo.

| Columna | Renglón | Ancho y largo (m) |
|-------------------|------------------|-------------------|
| 1 a 10, 129 a 172 | 1 a 48 y 83 a 96 | 1,000 |
| 11, 12, 127 y 128 | 49, 50, 81 y 82 | 700 |
| 12, 14, 125 y 126 | 51, 52, 79 y 80 | 500 |
| 15, 16, 123 y 124 | 53, 54, 77 y 78 | 400 |
| 17, 18, 121 y 122 | 55, 56, 75 y 76 | 300 |
| 19, 20, 119 y 120 | 57, 58, 73 y 74 | 225 |
| 21 a 118 | 59 a 72 | 187.5 |

Las celdas inactivas del área modelizada (Figura 38) al Oeste corresponden a las Sierras Cucapá y El Mayor, así como a Cerro Prieto, en el Este a los límites del Valle de Yuma y del DR014, al Norte el Canal Todo Americano y Pilot Knob, y al Sur los límites del DR014 y el Golfo de California.

Figura 38 Celdas activas e inactivas del modelo.



5.2.4.1 Condiciones del medio físico

Las propiedades geohidrológicas asignadas al modelo del área de estudio fueron: 1) la conductividad hidráulica K_x , K_y , y K_z , 2) el rendimiento específico (S_y), y 3) el almacenamiento específico (S_s).

En el [anexo 2](#) se muestran los valores de conductividad hidráulica horizontal y vertical, así como el rendimiento específico utilizado en la modelización. Se consideró $K_x=K_y$ cuyos valores asignados variaron entre 0.001 y 1,000, donde los valores más bajos fueron asignados a la última capa del modelo para simular el basamento del acuífero, en cambio, los valores más altos se asignaron a la zona de los abanicos aluviales de las sierras Cucapá y el Mayor en la

porción Oeste del área modelizada. Para la K_z se utilizó la relación $K_x:K_z$ de 1,000:1 de acuerdo con lo establecido por Hill (1993) para la zona de estudio.

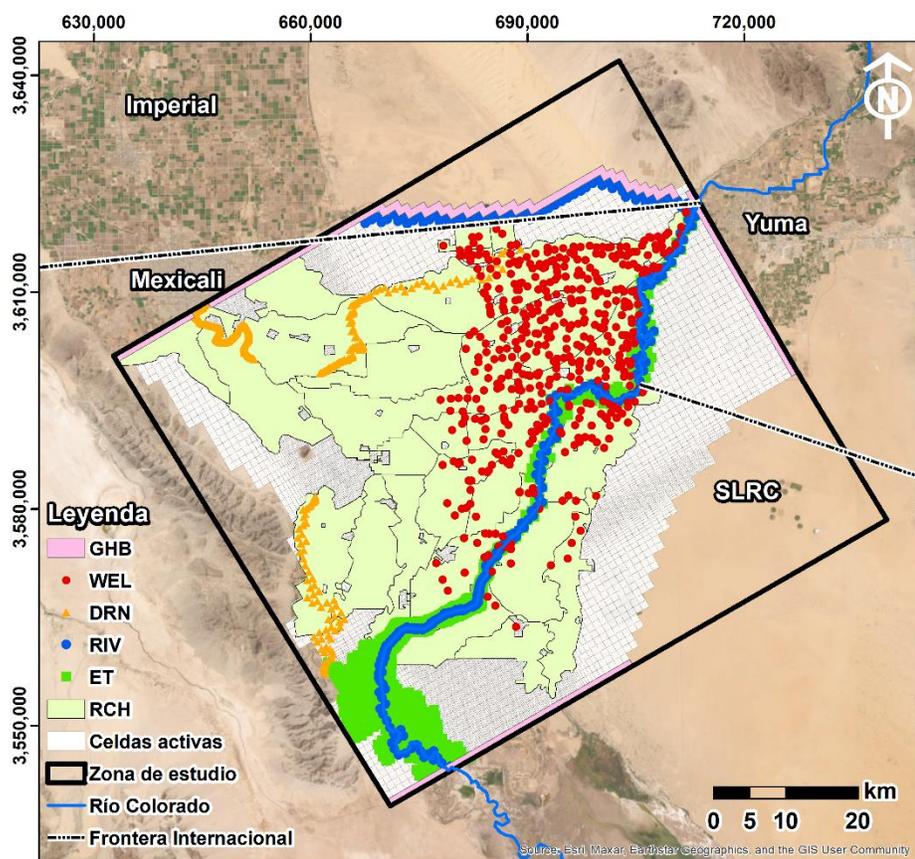
El rendimiento específico varió entre 0.06 y 0.18 (ver Anexo 2) de acuerdo con los valores de la literatura (Heath, 1993), derivado de la información litológica que se tiene en la zona de estudio.

En el caso del almacenamiento se utilizó 0.0003 en las seis capas del modelo de acuerdo con lo reportado por Feirstein (2008) y Rodríguez-Burgueño (2012).

5.2.4.2 Condiciones de frontera

En la figura 39 se muestran las celdas en las que se aplicó cada condición de frontera. Las cuales fueron: recarga, río, dren, frontera de carga general, extracción y evapotranspiración.

Figura 39 Condiciones de frontera utilizadas en el modelo.



5.4.2.1 Recarga (RCH)

La recarga diaria estimada para el ciclo agrícola 2018-2019 por Módulo de Riego del DR014 varió entre 1.06×10^{-4} y 6.64×10^{-4} m/d, correspondientes a los meses de octubre y marzo, respectivamente ([ver Anexo 3](#)).

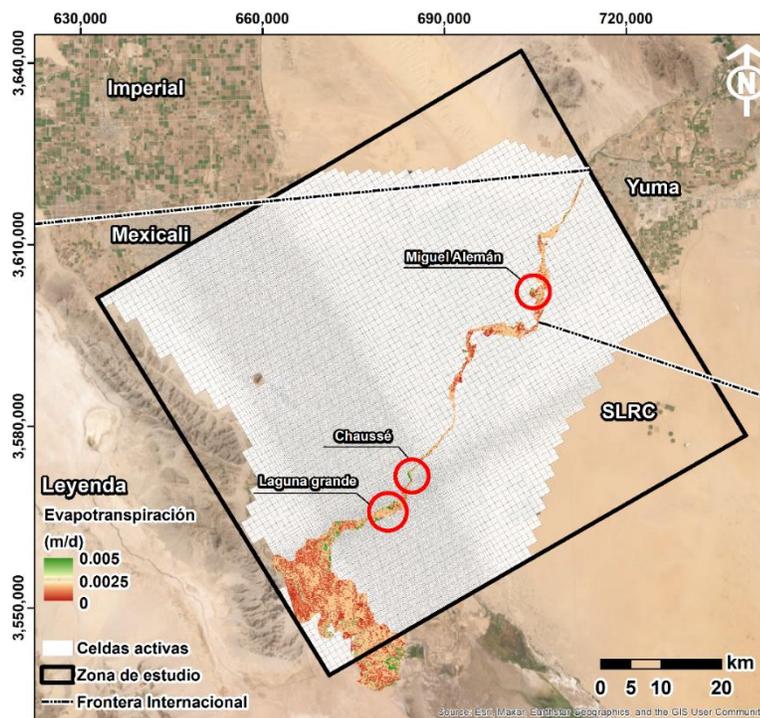
5.4.2.2 Extracción (WEL)

De la búsqueda realizada en imágenes satelitales de alta resolución se ubicaron 468 pozos de extracción y además se encontró que los módulos de Riego 4, 5 y 7 son los que cuentan con el mayor número de éstos. Respecto a la tasa de extracción estimada, esta se estimó entre 1,052 y 21,236 m³/d para los meses de octubre y marzo, respectivamente ([ver Anexo 4](#)).

5.4.2.3 Evapotranspiración (ET)

La evapotranspiración utilizada corresponde a la tasa estimada por [Nagler et al., \(2022\)](#) para 2018 a 2020. En el área del corredor ripario del Delta del Río Colorado la evapotranspiración varía entre 0 y 0.005 m/d ([Figura 40](#)). Las tasas más altas se estimaron para las zonas con vegetación riparia, por ejemplo, en los sitios de restauración (Miguel Alemán, Chausse, complejo Laguna Grande, indicados con círculos rojos en la figura 40).

Figura 40 Tasa de evapotranspiración modelizada. Datos de [Nagler et al., \(2022\)](#).



5.4.2.4 Río (RIV)

Los valores de conductancia, así como de elevación del lecho del río y del agua se presentan en el [anexo 5](#). Las conductancias para el Canal Todo Americano variaron entre 3,500 y 375 m^2/d , los valores más bajos se asignaron a las celdas del canal revestido, en cambio, los valores más altos corresponden a las celdas en las que el canal no se encuentra revestido. En el caso del Río Colorado las conductancias asignadas variaron entre 13.25 m^2/d y 2,058 m^2/d que corresponden a los sedimentos del Río Colorado de acuerdo con [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#).

5.4.2.5 Dren

Esta condición de frontera se aplicó a las celdas que corresponden a los ríos Nuevo y Hardy (Ver [Anexo 6](#)). La elevación asignada al lecho del canal del río Nuevo se varió entre -2.5 y 1 m s.n.m.m., para el río Hardy se asignó de acuerdo con el modelo digital de elevaciones

publicado por [García-Arvizu, \(2019\)](#) cuyos valores se encuentran entre 9.80 y 1.08 m s.n.m.m. La conductancia para ambos ríos asignada fue de 2,000 m²/d de acuerdo con los valores calibrados en modelizaciones previas por [Rodríguez-Burgueño \(2012\)](#).

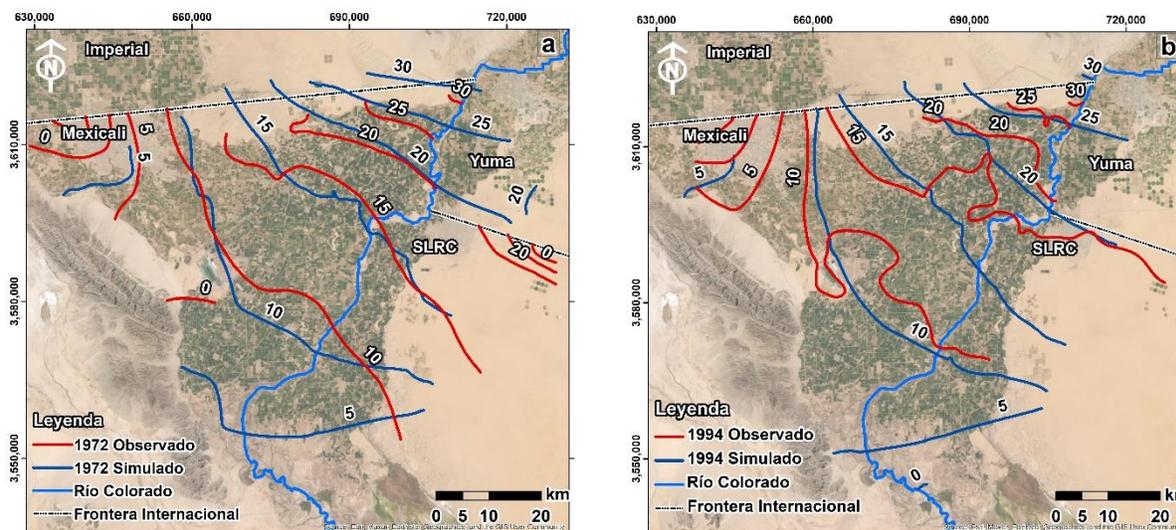
5.4.2.6 Frontera de carga general (GHB)

La frontera de carga general se asignó a las celdas de la porción Norte y Este de la zona modelizada, esto con la finalidad de simular los flujos subterráneos provenientes de Imperial y de Yuma, Estados Unidos. En el [anexo 7](#) se presenta los datos de carga y conductancia utilizados en las celdas asignadas con esta frontera.

5.2.4.3 Simulación

El modelo se corrió en estado estacionario con los datos de extracción y recarga de [Díaz-Cabrera \(2001\)](#) para los años 1972 y 1994. Los resultados se muestran en la [figura 41](#), las diferencias de la elevación del agua subterránea entre los valores simulados y observados varió entre -3.24 y 3.89 m para 1972 con un error medio cuadrático residual (RMSR, *root mean square residual*) de 1.54% y entre -3.23 y 4.99 m para 1994) con RMSR de 2% los resultados de ambas simulaciones fueron aceptados de acuerdo con lo establecido en las Guías de modelización de Australia y Columbia Británica que establecen como aceptable un SRMS de hasta 10%, dependiendo de los objetivos de modelización y la densidad de los datos observados ([Barnett et al., 2012](#); [Wels et al., 2012](#)). Estas diferencias entre los valores de elevación simulados y observados se atribuyeron a: 1) a la conceptualización del acuífero, 2) al número y a la ubicación de los pozos de extracción y 3) a las propiedades geohidrológicas asignadas al acuífero.

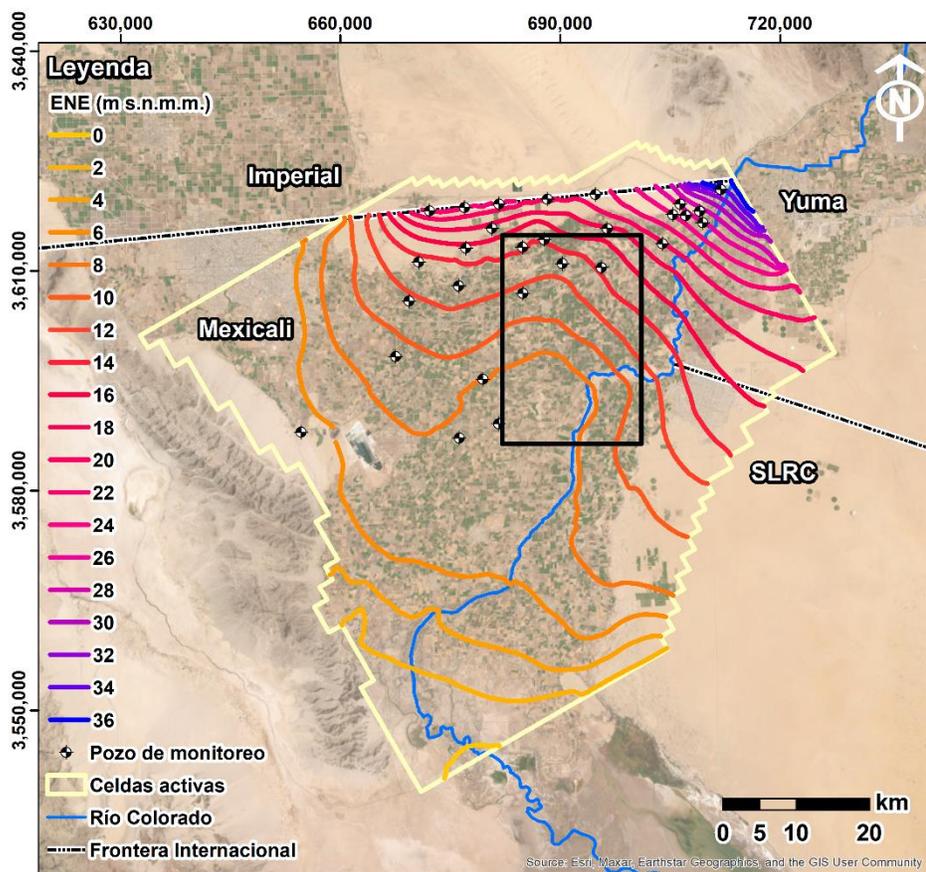
Figura 41 Configuraciones piezométricas resultado de la simulación en estado estacionario para los años 1972 (a) y 1994 (b). Datos observados presentados en Díaz, (2001).



Una vez calibrado el modelo en estado estacionario de acuerdo con los parámetros anteriormente indicados (SRMS de hasta 10%) se procedió a correr el modelo en estado transitorio. El tiempo de la simulación fue de 1 año, que corresponde al ciclo agrícola de octubre de 2018 al 31 de septiembre de 2019, este se discretizó en un paso de tiempo dividido en 365 días.

Los resultados de la modelización en estado transitorio se muestran en forma de contornos de elevación del agua subterránea en la figura 42. El RMSR de los resultados de la simulación fue de 2.17% considerado como aceptable de acuerdo con las guías anteriormente descritas. Cabe destacar que, en la porción central del modelo las diferencias entre los valores observados y simulados fue de 5 a 6 m (rectángulo negro figura 42), esta situación puede ser atribuida a los siguientes puntos y a otros: 1) que el agua subterránea en esa zona responde a procesos no identificados en la presente investigación y 2) a la representación de las condiciones hidrogeológicas en el modelo derivadas de la información litológica disponible.

Figura 42 Contornos de elevación del nivel freático resultado de la simulación del modelo ciclo agrícola 2018-2019.



En la [figura 42](#) se puede observar que la elevación del nivel freático varía entre 0 y los 36 m.s.n.m. con un gradiente de decremento Noreste-Suroeste. Aunque, la calibración de la porción central del acuífero varió entre 5 y 6 m entre los valores observados y simulados, en el resultado de la simulación transitoria se observó la zona de abatimiento en la zona central, misma que fue descrita anteriormente. Posterior a la simulación en estado transitorio, se procedió a correr los escenarios propuestos de gestión y manejo del agua.

Los resultados de la simulación de los escenarios de gestión y manejo del agua en el DR014 se muestran en la [tabla 11](#) en porcentaje de cambio en relación con el escenario base (2018-2019). De acuerdo con los balances de agua de los escenarios simulados la razón de cambio

mayormente significativa provenía de los volúmenes de agua que ingresan al acuífero por las fronteras al Norte y al Este (Mesa Arenosa de Andrade y la zona limítrofe de BC y Yuma), debido a los cambios de los gradientes hidráulicos se propiciaba la integración de mayores volúmenes de entrada por estas dos fronteras.

Tabla 11 *Resultados de la simulación de los escenarios de gestión y manejo del agua en la zona de estudio.*

| Escenario | % de cambio de la variable modificada | | Descripción de escenario | Resultado |
|-----------|---------------------------------------|---------|--|-------------|
| | Extracción | Recarga | | % de cambio |
| 1 | ↓ 38.87 | | Volumen concesionado en el RREPDA (agosto, 2022). | -13.50 |
| 2a | | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC* | 0.002 |
| 2b | | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC | 0.002 |
| 2c | | ↓ 0.13 | Reducción PBCEARC | 0.002 |
| 2d | | ↓ 0.16 | Reducción PBCEARC | 0.002 |
| 2e | | ↓ 0.29 | Reducción PBCEARC | 0.002 |
| 2f | | ↓ 0.31 | Reducción PBCEARC | 0.002 |
| 2g | | ↓ 10.84 | Reducción PBCEARC | 0.002 |
| 3a | ↑ 12.83 | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 5.39 |
| 3b | ↑ 17.55 | ↓ 0.08 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 7.30 |
| 3c | ↑ 23.84 | ↓ 0.13 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 10.22 |
| 3d | ↑ 25.06 | ↓ 0.16 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 10.77 |
| 3e | ↑ 27.26 | ↓ 0.29 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 11.66 |
| 3f | ↑ 28.90 | ↓ 0.31 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 12.41 |
| 3g | ↑ 46.35 | ↓ 10.84 | Reducción PBCEARC y compensación con agua sub | 21.77 |
| 4 | | ↓ 49.68 | Reducción PBCEARC e incremento de eficiencia en el DR014 | 4.37 |

↑ Incremento; ↓ Decremento.

De acuerdo con los resultados de las simulaciones de los escenarios en la zona de estudio, se encontró que, el escenario 1 es el que mayor efecto positivo tendría en el acuífero puesto que la extracción de agua subterránea disminuiría en 38.37% que se traduce en un aumento del nivel freático de entre 0.60 a 2.05 m durante el periodo simulado. En cambio, los escenarios 3a a 3g son los que mayor impacto negativo tendrían en el acuífero debido a que se reduciría la

recarga al acuífero y la extracción aumentaría, de acuerdo con el escenario más pesimista (3g) los niveles disminuirían entre 0.89 a 3.07 m durante el año simulado (Tabla 12).

Tabla 12 *Evolución total anual del nivel de agua subterránea según los resultados de los escenarios simulados con respecto al escenario base.*

| Zona | 1 | 2a a f | 3a | 3b | 3c | 3d | 3e | 3f | 3g | 4 |
|-------------------------|---|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Evolución del nivel de agua subterránea (m) | | | | | | | | | |
| Mesa Arenosa de Andrade | 0.60 | 0.00 | -0.24 | -0.31 | -0.45 | -0.47 | -0.50 | -0.53 | -0.89 | -0.17 |
| Noreste | 1.19 | 0.00 | -0.43 | -0.55 | -0.78 | -0.82 | -0.87 | -0.92 | -1.54 | -0.30 |
| Centro | 0.57 | 0.00 | -0.22 | -0.29 | -0.43 | -0.46 | -0.48 | -0.52 | -0.97 | -0.19 |
| Sur | 2.05 | 0.00 | -0.77 | -1.01 | -1.44 | -1.52 | -1.60 | -1.70 | -3.07 | -1.36 |

Es importante denotar que los resultados de las simulaciones de los escenarios planteados en esta investigación se basan en cambios en a las condiciones del acuífero para el 2018-2019 y con los cambios indicados en la tabla 12, por lo que cualquier otra condición fuera de estos supuestos no es considerada.

5.2.5 Servicios ecosistémicos

5.2.5.1 Servicios de provisión

5.2.5.1.1 Servicio de aprovisionamiento de aguas para uso agrícola

La provisión de agua para uso agrícola (V_1) en la zona de estudio para el ciclo 2013-2014 periodo en el cual se tiene información, se estimó en 66 millones de dólares estadounidenses. En la tabla 13 se muestra el valor del agua por temporada y por unidad de superficie regada.

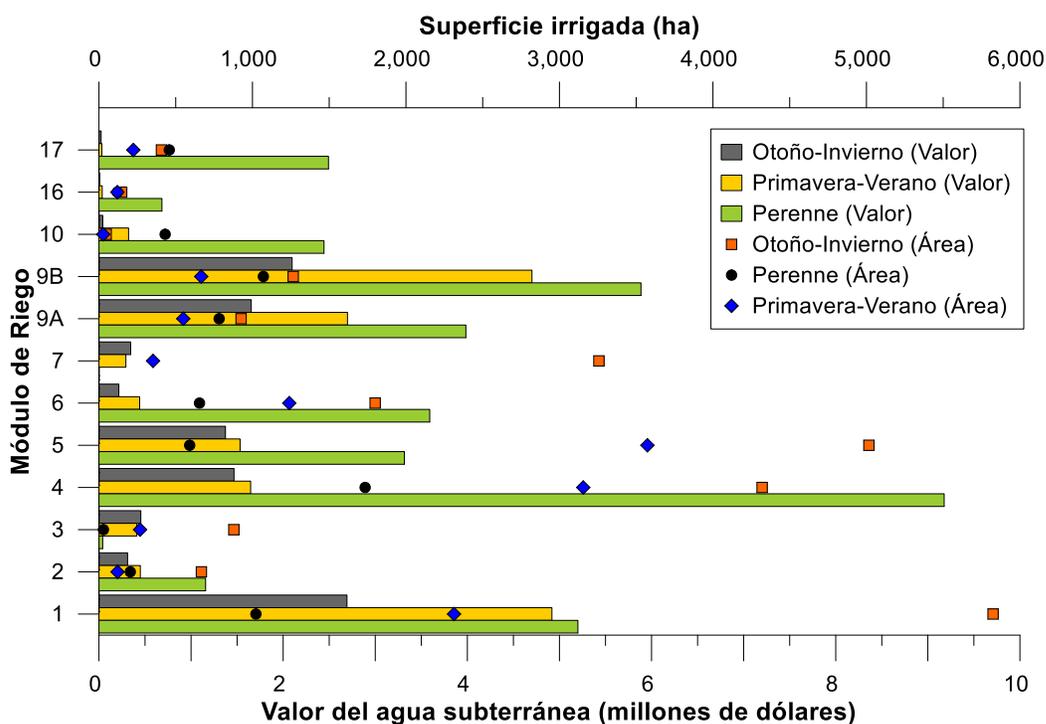
Tabla 13 *Valor del agua subterránea para uso agrícola para el ciclo 2013-2014.*

| Temporada | Superficie cultivada (ha) | Valor de mercado total (millones de dólares) | Valor por superficie de área (dólares/ha) |
|------------------|---------------------------|--|---|
| Otoño-Invierno | 24,557 | 11 | 435 |
| Primavera-Verano | 12,610 | 17 | 1,386 |
| Perenne | 7,099 | 38 | 5,349 |
| Total | 44,266 | 66 | 1,494 |

La figura 43 muestra la superficie agrícola irrigada con agua subterránea, el valor de ésta por Módulo de Riego y por temporada. Se encontró que, los Módulos 1, 4, 5 y 6 son los de mayor

superficie irrigada en otoño-invierno, pero el valor del agua subterránea es considerablemente inferior (45, 11, 10 y 51%, respectivamente) al de otras temporadas con menor superficie. Esto es explicable ya que el principal cultivo de esta temporada (trigo) tiene un precio medio rural 87 veces menor que los cultivos principales de las otras temporadas, como el algodón.

Figura 43 Superficie de la zona de estudio irrigada con agua subterránea y su valor por Módulo de Riego. Modificado de [Cital et al., 2023](#).



La [figura 44](#) muestra el precio sombra del agua subterránea aplicada a los principales cultivos en la zona de estudio durante el ciclo agrícola 2013-2014. Dicho valor varió entre 0.005 y 0.97 dólares/m³. Estudios previos como el de [Aylward et al., \(2010\)](#) han estimado precios sombra para este uso de entre 0.012 a 0.65 dólares/m³ en África; de 0.017 a 2.01 dólares/m³ en Asia; de 0.12 a 0.17 dólares/m³ en Europa; y de 0.01 a 0.25 en Norteamérica.

El precio sombra más bajo estimado en el estudio presente para el agua subterránea es de 0.005 dólares/m³ correspondiente al trigo, que cubre la mayor superficie (21,080 ha) la zona de estudio. El precio sombra estimado en esta investigación es similar al reportado por [Turner et](#)

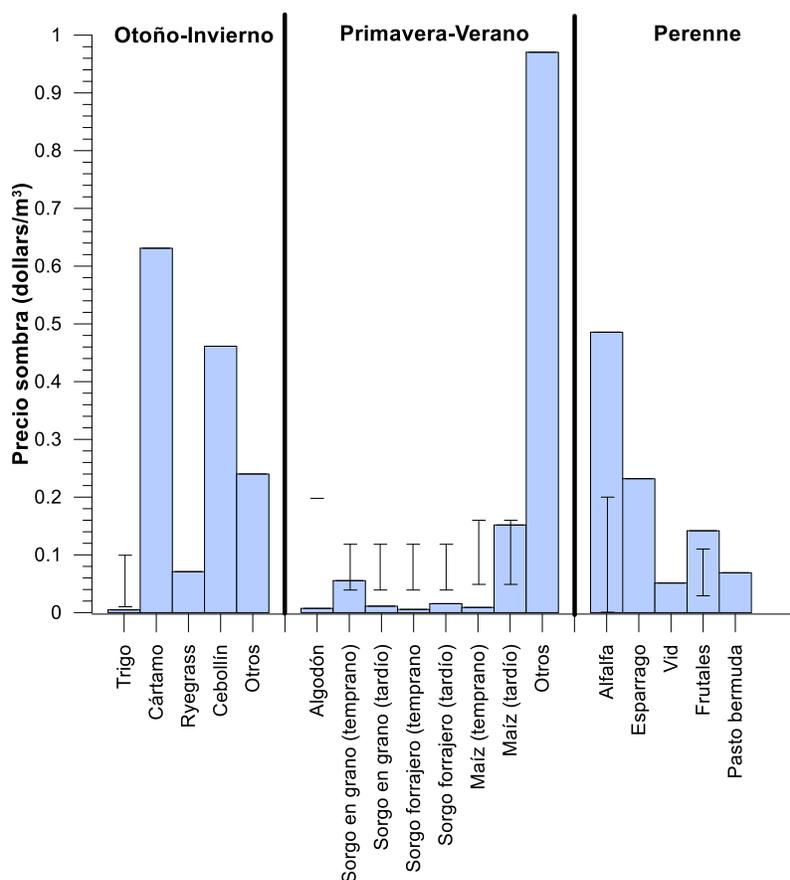
al., (2004), para granos alimenticios y es ligeramente inferior al rango reportado por Bierkens et al., (2019) de 0.007 a 0.22 dólares/m³ para el trigo en México, en contraste con las estimaciones globales con precios sombra del trigo más altos, entre 0.03 a 0.06 dólares/m³ (D' Ordorico et al., 2020). El bajo precio sombra del trigo se atribuye al precio medio rural en el área de estudio.

Los precios sombra más elevados del agua subterránea, de hasta 0.97 dólares/m³, corresponden a la producción de dátiles y hortalizas en la temporada de primavera-verano. Respecto al maíz, el precio sombra del agua de riego para este cultivo en la zona de estudio fue de 0.01 a 0.15 dólares/m³ (Figura 44) en la zona de estudio. Dicho valor es cercano a los 0.16 dólares/m³ reportados por D'Ordorico et al., (2020) como estimación media global y a los 0.14 dólares/m³ para la región del acuífero Ogallala, en Estados Unidos. En cuanto al sorgo en grano, los precios sombra estimados fueron de 0.06 dólares/m³ y 0.01 dólares/m³ para grano temprano y tardío, respectivamente. Estimaciones globales publicadas en la literatura son ligeramente superiores, de 0.09 dólares/m³ (D' Ordorico et al., 2020). Por el contrario, el precio sombra estimado para la alfalfa fue de 0.49 dólares/m³, superior a los -0.01 a 0.2 dólares/m³ reportados en estudios realizados en Arizona (Ma et al., 2021).

El cultivo de sorgo forrajero es el que mayor volumen de agua subterránea demanda por unidad de superficie (aproximadamente 32,200 m³/ha) y su precio sombra estimado fue de 0.01 dólares/m³. Un precio similar se encontró en el maíz y el algodón, los que utilizan un gran volumen de agua subterránea (18,740 y 17,182 m³/ha, respectivamente), mientras que el precio sombra del agua es menor, 0.01 dólares/m³ para ambos cultivos. El espárrago es otro de los cultivos con mayor necesidad de agua, ya que requiere 21,800 m³/ha, sin embargo, su precio sombra es de 0.23 dólares/m³, superior al del sorgo y del algodón. Por otro lado, el cártamo utiliza un pequeño volumen de agua (4,833 m³/ha) en comparación con el resto de los cultivos de la zona de estudio, el precio sombra se estimado fue de 0.14 dólares/m³. En el caso de las frutas, el precio sombra calculado fue de 0.14 dólares/m³, valor ligeramente superior a los 0.12

y 0.11 dólares/m³ reportados para las manzanas y peras en los Estados Unidos (Frederick et al., 1996).

Figura 44 Precio sombra estimado para el agua subterránea por cultivo irrigado. Las barras de error indican los límites de los precios sombra descritos en la literatura por Bierkens et al., (2019); Williams et al., (2017); D'Ordorico et al., (2020); Frederick et al., (1996); Ma et al., (2021). Modificada de Cital et al., (2023).



5.2.5.1.2 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso industrial

El precio de referencia del agua subterránea utilizada para fines industriales fue de 2.01 dólares/m³, según lo establecido por la CESPMM, el precio asequible fue de 2.72 dólares/m³ y la elasticidad fue de -0.38 de acuerdo con estimaciones previas (CONAGUA, 1999). El valor estimado de los 627,593 m³ de agua subterránea concesionada para este fin (REPD, 2020),

fue de 419,034 dólares anuales (V_2). La industria de la purificación del agua y hielo representan el 47% del valor del agua subterránea para uso industrial.

El precio sombra del agua subterránea para uso industrial estimado en esta investigación para el año 2020 fue de 0.67 dólares/m³. Investigaciones previas han documentado una amplia gama de precios sombra de las aguas subterráneas para uso industrial que van de 0.01 a 6.94 dólares/m³ en Asia, y de 0.01 a 0.28 dólares/m³ en Norteamérica (Aylward et al., 2010).

El precio sombra del agua subterránea estimado en el presente documento se encuentra por debajo de los 0.73 dólares/m³ y los 0.91 dólares/m³ para la industria Canadiense y China reportadas por Dachraoui y Harchaoui (2004) y Yang y Liu (2020). Por el contrario, valores más bajos se han documentado para la industria en la India donde el valor del agua estimado se encuentra entre 0.02 y 0.41 dólares/m³ (Kumar y Managi, 2009).

5.2.5.1.3 Servicio de aprovisionamiento de agua para uso doméstico, urbano y rural

De acuerdo con el REPDA, el volumen anual de agua subterránea concesionado a la CESPMM y a los Comités de agua en el Valle de Mexicali para usos urbanos, rurales y domésticos es de total de 9.6 millones de m³.

El precio sombra del agua subterránea para uso urbano, rural y doméstico se estimó considerando 0.53 dólares/m³ como precio del agua, el precio asequible utilizado fue de 2.10 dólares/m³ y la elasticidad estimada de -0.378 (CONAGUA 1999). El valor total de la provisión de agua subterránea para uso urbano y doméstico fue de 11.07 millones de dólares (V_3), es decir 1.16 dólares/m³. Este resultado es comparable con el rango de precios reportado por Aylward et al., (2010) de 0.25 a 1.84 dólares/m³ para uso doméstico en Norteamérica, incluyendo México. Sin embargo, el precio estimado en este estudio se encuentra por encima del precio medio global estimado de 0.58 dólares/m³ (Aylward et al., 2010).

Algunos autores como [Aylward et al. \(2010\)](#) y [Yang y Liu \(2020\)](#) han reportado valores para uso doméstico, sin tener en cuenta los usos urbanos, de entre 0.008 a 2.88 dólares/m³ en África; de entre 0.04 y 1.22 dólares/m³ en Asia; de 0.25 a 1.84 dólares/m³; y de 0.41 y 1.01 dólares/m³ en Sudamérica. Aunque el valor estimado es para uso urbano, rural y doméstico se encuentra dentro de todos los rangos de precios sombra mencionados anteriormente, la comparación directa es improcedente por la diferencia de condiciones físicas y sociales.

5.2.4.2 Servicios ecosistémicos de regulación

5.2.4.2.1 Conservación de agua

El almacenamiento de agua subterránea en la zona de estudio se estimó en 98,160 millones de m³, considerando únicamente los primeros 100 m como capa homogénea y saturada, dado que la mayoría de los pozos extraen agua a esta profundidad, utilizando un rendimiento específico de 0.2 ([Rodríguez-Burgueño, 2012](#)). El costo de un reservorio con capacidad de 1 m³ es de 9 dólares, cuyas características se detallan en el [anexo 8](#). En total, el valor estimado del servicio ecosistémico hidrológico de conservación de agua en el acuífero Valle de Mexicali es de 907,980 millones de dólares (V_4). Este valor es mayor que el estimado para la ciudad de Handan en China, cuyo valor del servicio ecosistémico fue de 566 millones de dólares por la conservación de 872 millones de m³ ([Yang y Liu, 2020](#)). Esta diferencia se atribuyó principalmente a las características constructivas del reservorio propuesto, debido a que en esta investigación se estimó de 9 dólares/m³ y [Yang and Liu \(2020\)](#) lo calcula en 0.59 dólares/m³.

5.2.4.2.2 Purificación de agua

El volumen de agua residual total tratado en las seis PTAR's situadas dentro de la zona de estudio ([Tabla 14](#)) fue de 72 millones de m³ durante 2020. Las pérdidas estimadas por conducción en el transporte de las aguas residuales crudas, antes de la llegada al afluente, fueron de 10%. Por consecuencia, se considera una eficiencia del 90% de conducción y

transporte en la red de drenaje sanitario. De acuerdo con datos de la CESPMM, el costo del tratamiento de las aguas residuales varía entre 0.01 y 0.07 dólares/m³ (CESPM, 2020).

El valor del servicio ecosistémico de purificación de agua se estimó en 111,100 dólares por año (V₅). En la [tabla 14](#) se indica el valor del HES por cada PTAR.

Tabla 14 *Valor del servicio ecosistémico hidrológico de purificación de agua por PTAR.*

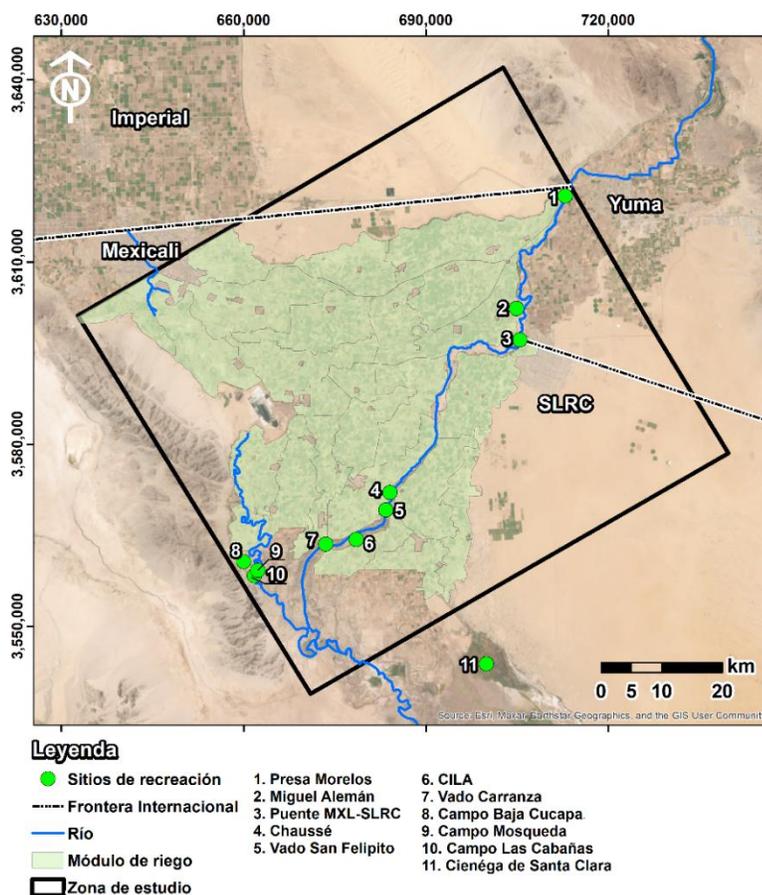
| PTAR | Valor del HES de purificación de agua (dólares/año) |
|---------------|--|
| Mexicali I | 45,096 |
| Las Arenitas | 37,086 |
| Los Algodones | 4,131 |
| Cd. Morelos | 6,197 |
| Km. 43 | 14,459 |
| Km.57 | 4,131 |
| Total | 111,100 |

5.2.4.3 Servicios ecosistémicos culturales

5.2.4.3.1 Recreación

Mexicali y su valle tienen 249,165 y San Luis Río Colorado 50,223 casas habitadas de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda realizado en el INEGI (2020). Considerando cada casa como una familia que visita uno de los sitios recreativos ([Figura 45](#)) al menos una vez al año y que la disposición a pagar es de 10 dólares (valor medio reportado por [Kerna et al., \(2017\)](#) para la zona de estudio), el valor del agua subterránea como HES de recreación estimado fue de 2.99 millones anuales (V₆).

Figura 45 Ubicación de algunos de los sitios de recreación en el Valle de Mexicali.



El valor total de los servicios ecosistémicos hidrológicos proporcionados por el agua subterránea del acuífero Valle de Mexicali fue estimado en 908,060 millones de dólares anuales. En la [tabla 15](#) se presenta un resumen de las estimaciones de la valuación realizada en la investigación presente.

Tabla 15 Concentrado de las valuaciones de los HES.

| Tipo de SE | HES Valuado | Valor total anual (millones de dólares) |
|--------------|--------------------|---|
| Provisión | Agrícola | 66 |
| | Industrial | 0.4 |
| | Urbano y doméstico | 11 |
| Regulación | Conservación | 907,980 |
| | Purificación | 0.11 |
| Cultural | Recreación | 2.99 |
| Total | | 908,060 |

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

- A partir del análisis de uso del agua subterránea y su gestión en la zona de estudio utilizando el indicador de la Demanda Relativa del Agua, se concluye que el uso no es sustentable y que además existe una pérdida de almacenamiento de acuerdo con el índice de Cambio de Almacenamiento estimado.
- Se concluye que la pérdida de volumen de agua subterránea en la zona de estudio está relacionada con la sobreexplotación y que, aunque existen normas y leyes que regulan y protegen el recurso hídrico, éstas no se implementan ni se vigilan en su totalidad debido a limitaciones financieras para diversas actividades de las funciones que le confieren las leyes mexicanas.
- Para implementar los instrumentos de gestión existentes es necesario fortalecer las capacidades de las instituciones tales como las estructurales, las operativas, las políticas y las económicas.
- La actualización de la disponibilidad media anual del acuífero publicada por la federación no refleja la situación actual de la zona de estudio debido a la falta de mediciones sistemáticas de las variables del balance, por ejemplo, la extracción del agua.
- De la búsqueda de pozos de extracción en imágenes satelitales de alta resolución se encontró que el 58% de estos se concentran en los Módulos de Riego 4, 5 y 7.
- La construcción y calibración del modelo hidrogeológico del acuífero permitió conocer los procesos actuales del balance e identificar los servicios ecosistémicos hidrológicos que provee, adicionalmente se simularon escenarios de gestión y manejo del agua.
- Los resultados del modelo hidrogeológico numérico y las mediciones de profundidad al nivel freático realizadas en la Red de Monitoreo Piezométrico concluyen que la tendencia es negativa, de hasta 0.99 m/año en la zona de la Mesa Arenosa de Andrade y, se encontró una zona de abatimiento en la porción central de la zona de estudio que presenta un incremento en la profundidad de hasta 0.69 m/año, la cual ha sido identificada en estudios previos y por la misma CONAGUA.
- Los resultados de las simulaciones de los escenarios de recorte de agua según el Plan Binacional de Contingencia ante la escasez de agua en la Cuenca del Río Colorado simulados en el modelo hidrogeológico como disminución en la recarga al acuífero pudieran generar cambios insignificantes en (0.002%) en el agua subterránea disponible. En cambio, si éstos recortes de agua se compensarán con volúmenes adicionales de agua subterránea del acuífero el cambio sería de hasta -21.8%.
- La disponibilidad de agua subterránea, de acuerdo con los resultados de la simulación de los escenarios de gestión y manejo del agua en la zona de estudio, se vería favorecida en 13% si se extrajera únicamente el volumen de agua concesionado en el REPDA para el año 2022, lo que implica una reducción del 38.8% de la extracción de agua subterránea.

- El modelo hidrogeológico numérico construido y calibrado podrá ser herramienta de gobernanza para la gestión del agua y realizar la toma de decisiones basada en la aplicación de la ciencia en la zona de estudio.
- En este estudio se presenta la primera valuación de los de los servicios ecosistémicos hidrológicos que proveen las aguas subterráneas en la zona de estudio, se utilizó la información disponible, estudios diversos y estimaciones globales.
- En la identificación de los servicios ecosistémicos que proveen las aguas subterráneas en la zona de estudio se encontraron servicios de provisión como agua para riego agrícola, actividades industriales y uso doméstico, urbano y rural; de conservación y purificación del agua como servicios de regulación; y además de la recreación como servicio cultural.
- El resultado de la valuación de los servicios ecosistémicos que proveen las aguas subterráneas en la zona de estudio asciende a 90'844,251 millones de dólares anuales, siendo el de conservación de agua el de mayor valor.
- El valor del agua subterránea para irrigación del trigo que es el cultivo con más extensión de superficie en la zona de estudio es de 0.005 dólares/m³, mientras que "otros" cultivos como dátiles y hortalizas tienen el mayor valor (0.97 dólares/m³).
- El valor del agua estimado en esta investigación para los servicios de aprovisionamiento es mayor al precio real del agua.
- Los resultados del trabajo conjunto entre academia, instituciones y organizaciones en materia de agua han coadyubado en ampliar el conocimiento de los recursos hídricos en la zona de estudio, por lo que se recomienda que continúe dicha colaboración.
- A partir del monitoreo conjunto entre CONAGUA y UABC se ha observado amplia cobertura en la zona norte, sin embargo, es recomendable la ampliación de dicha red hacia la porción Sur y Suroeste del valle.
- Derivado de la necesidad de los registros automáticos del nivel de agua subterránea en los pozos de monitoreo, se recomienda la instalación de medidores automáticos.
- Los censos de los aprovechamientos de aguas subterráneas proporcionan información valiosa para su diagnóstico, por lo que se recomienda buscar fuentes de financiamiento para realizar la actualización de estos.
- Dada la importancia de las aguas subterráneas en la zona de estudio, se reconoce la importancia de medir sistemáticamente las variables del balance hídrico en la zona de estudio, incluida la extracción de agua subterránea en los pozos y las aguas superficiales.
- Se recomienda realizar estimaciones adicionales referente a los servicios ecosistémicos culturales proporcionados por el acuífero Valle de Mexicali.

Capítulo 7. Referencias

Alden, M. P., y Voss, C. (2019). SUTRA, a Model for Saturated-Unsaturated, Variable-Density Groundwater Flow with Solute or Energy Transport—Documentation of Generalized Boundary Conditions, a Modified Implementation of Specified Pressures and Concentrations or Temperatures, and the Lake Capability. *Techniques and Methods* 6-A52. <https://doi.org/10.3133/tm6A52>

Altman, I., Boumans, R., Roman, J., Gopal, S. & Kaufman, L. (2014). An ecosystem accounting framework for marine ecosystem-based management. In: M. J. Fogarty & J. J. McCarthy (Eds.), *Marine ecosystem-based management. The sea: Ideas and observations on progress in the study of the seas* (Vol. 16, pp. 245–276). Cambridge, MA, USA: Harvard University Press.

Anderson, M.P. y Woessner, W.W. (1992). *Applied Groundwater Modeling— Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Inc., San Diego, CA, 381 p. ISBN: 10: 0120594854.

Anderson, M. P., Woessner, W. W. y Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (2nd edition). <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21563-7>.

Ariel, C. S. A. (1968). Estudio hidrogeológico completo de los acuíferos del Valle de Mexicali, B.C y Mesa de San Luis, Son. Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Aquaveo. (2021). *Groundwater Modelling System*. <https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction>

Ayers, R. S., y Westcot, D. W. (1994). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper. 29 Rev 1. Rome. ISBN: 92-5-102263-1. Disponible en: <https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm>

Aylward, B., Seely, H., Hartwell, R., y Dengel, J., (2010). *The Economic Value of Water for agricultural, Domestic and Industrial Uses: A Global Compilation of Economic Studies and Market Prices*. Ecosystem Economics. Report prepared for UN FAO.

Bagstad, K. J., Semmens, D. J., Waage, S. y Winthrop, R. (2013). A comparative assessment of decision-support tools for ecosystem services quantification and valuation. *Ecosystem Services*, 5, 27–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.07.004>

Balvanera et al., (2017). *Ecosystem Services in The GEO handbook on biodiversity observation networks* (p. 39-78). ISBN 978-3-319-27286-3. Springer Nature.

Baniasadi, M., Reza, M., Mehrabi, H., Mirzaei, H., Rezaei, A. (2019). Evaluation of negative economic–environmental externalities of overextraction of groundwater', *Groundwater*. doi: 10.1111/gwat.12933.

Barnett, B., Townley, LR., Post, V., Evans, RE., Hunt, RJ., Peeters, L., Richardson, S., Werner, AD., Knapton, A., y Boronkay, A. (2012). *Australian groundwater modelling guidelines*. Waterlines report, National Water Commission, Canberra. ISBN: 978-1-921853-91-3.

Bierkens, M. F., Reinhard, S., de Bruijn, J. A., Veninga, W., y Wada, Y. (2019). The shadow price of irrigation water in major groundwater-depleting countries. *Water Resources Research*, 55(5), 4266-4287. <https://doi.org/10.1029/2018WR023086>.

Bondeau, A., Smith, P. C., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., et al. (2007). Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology*, 13, 679–706. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x>

Börzel, T. A., y Risse, T. (2010). Governance without a state: Can it work?. *Regulation & governance*, 4(2), 113-134. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5991.2010.01076.x>

Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K. E., y Mooney, H. A. (2007). The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. *Annual. Review of Environment and Resources.*, 32, 67-98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>

Cázares Zepeda, M. (2008). Consideraciones geohidrológicas y legales en la gestión del agua subterránea del Valle de Mexicali, Baja California, ante el revestimiento del Canal Todo Americano, Tesis para obtener el grado de Maestra en Administración Integral del Ambiente. Colegio de la Frontera Norte (COLEF). Disponible en: <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/2006725/>

CEA. (2016). Programa Hídrico del Estado de Baja California. Visión 2035. Available at: http://www.cea.gob.mx/documents/peh/2016-12-15-PH-BAJA_v11.pdf.

CEABC. (2020). Comisión Estatal del Agua. Acerca de nosotros. <http://www.cea.gob.mx/organismo.html>

CESPM. (2020). Indicadores Sistema de la Ciudad de Mexicali. Comparativo general. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali.

CESPM. (2021). Infraestructura. Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali. <http://www.cespm.gob.mx/tf-infraestructura.html#gsc.tab=0>

CGIAR. (2015). Groundwater and ecosystem services: a framework for managing smallholder groundwater dependent agrarian socio-ecologies - applying an ecosystem services and resilience approach. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). 25p. doi: 10.5337/2015.208

CILA. (1848). Tratado de Paz, Amistad, Límites y Arreglo Definitivo entre los Estados Unidos Mexicanos y Estados Unidos de América. Comisión Internacional de Límites y Aguas Disponible en: <http://www.cila.gob.mx/tyc/1848.pdf>

CILA. (1853). Tratado de Límites entre los Estados Unidos Mexicanos y Estados Unidos de América. Comisión Internacional de Límites y Aguas Disponible en: <http://www.cila.gob.mx/tyc/1853.pdf>

CILA. (1944). Tratado entre el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el Gobierno de los Estados Unidos de América de la distribución de las aguas internacionales de los ríos Colorado, Tijuana y Bravos, desde Fort Quitman, Texas, hasta el Golfo de México. Comisión Internacional de Límites y Aguas Disponible en: <http://www.cila.gob.mx/tyc/1944.pdf>

CILA. (1973). Acta Num. 242. Solución permanente y definitiva del problema internacional de la salinidad del Río Colorado. Comisión Internacional de Límites y Aguas. México, D.F. Disponible en: <http://www.cila.gob.mx/actas/242.pdf>

CILA, CONANP, COLEF, UABC, Pronatura Noroeste, Restaremos El Colorado, National Audubon Society, Sonoran Institute, The Colorado River Basin States, TNC, University of Arizona, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, U. (2018). Informe Final del Acta 319 sobre el Monitoreo de Flujos Ambientales en el Tramo Limítrofe y Delta del Río Colorado. Disponible en: <http://www.cila.gob.mx/rc/M319MRF.pdf>

CILA/IBWC. (2017). Ampliación de las Medidas de Cooperación y Adopción de un Plan Binacional de Contingencia ante la Escasez de Agua en la Cuenca del Río Colorado. Ciudad Juárez, Chihuahua.

Cital, F., Rivera, A., Rodríguez-Burgueño, E., y Ramírez-Hernández, J. (2021). A governance panorama of an aquifer in a semiarid region, Mexico. The role of sound groundwater resources management and governance to achieve water security, 216-238.

Cital, F., Rodríguez-Burgueño, E., Carreón-Diazconti, C., Ramírez-Hernández, J. y Rivera, A., (2023). Valuating hydrological ecosystem services provided by groundwater in a dryland region in the northwest Mexico. Artículo en proceso de publicación.

Chicharo, L., Müller, F. and Fohrer, N. (2015). Ecosystem services and river basin ecohydrology, *Ecosystem Services and River Basin Ecohydrology*. doi: 10.1007/978-94-017-9846-4.

Chow, V., Maidment, D. and Mays, L. (1994). Hidrología aplicada. Primera edición. Editado por M.-H. I. S.C. Santafé de Bogotá, Colombia. ISBN: 9789586001717.

Comisión Europea. (2008). Protección de las aguas subterráneas en Europa. Luxemburgo. doi: 10.2779/84633 ©.

CONABIO. (2018). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México. Disponible en: <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/clima1mgw.html>

CONAGUA. (1999). Estudio de determinación de la demanda en Ensenada, Mexicali y Tijuana. Reporte Interno. Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2005). Estudio de actualización de censo e hidrometría de las extracciones en la zona de impacto por el revestimiento del Canal Todo Americano, zona norte del acuífero Valle de Mexicali. Mexicali, Baja California. Reporte interno.

CONAGUA. (2010). Estadísticas del agua en México, edición 2010. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/eam2010-16junio2010.pdf>

CONAGUA. (2013). Estudio gran visión para la instalación de las plantas desaladoras a ubicar en el Río Nuevo y en el Golfo de California; así como el aprovechamiento en usos ambientales de las aguas residuales tratadas de las plantas de tratamiento ubicadas en el Valle de Mexicali, Baja California. Reporte interno de la Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. (2015a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua Valle de Mexicali (0210). Estado de Baja California, 20 de abril de 2015. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5389380&fecha=20/04/2015#gsc.tab=0

CONAGUA. (2017). Estadísticas del agua en México. México. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. Disponible en: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf

CONAGUA. (2019). Estadísticas del agua en México. México. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. Disponible en: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf

CONAGUA. (2019a). Volúmenes entrados en puntos de control, conciliados con Módulos de Riego S de R.L, y personal de la CONAGUA. Reporte interno.

Constantino, R., Carrillo, G., Muñoz, C., y Morales, E. (2011). Eficiencia en el uso de los recursos en América Latina: Perspectivas e implicancias económicas. En La situación de los recursos hídricos en México y el contexto institucional de la eficiencia en su aprovechamiento.

[http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9106/-Eficiencia en el uso de los recursos en América Latina-2011REEO WEB FINAL.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9106/-Eficiencia%20en%20el%20uso%20de%20los%20recursos%20en%20Am%C3%A9rica%20Latina-2011REEO%20WEB%20FINAL.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

Constanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., y van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), pp. 253–260.

Custodio, E. y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Segunda ed. Editado por E. Custodio and M. R. Llamas. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.,

Cunningham, W. L. y Schalk, C. W. (2016). *Groundwater Technical Procedures of the U.S. Geological Survey Techniques and Methods 1 – A1'*, Groundwater technical procedures of the U.S. Geological Survey. Virginia: U.S. Geological Survey, pp. 1-A1-151. Available at: <https://pubs.usgs.gov/tm/1a1/pdf/tm1-a1.pdf>.

Dachraoui, K., y Harchaoui, T. M. (2004). Water use, shadow prices and the Canadian business sector productivity performance. *Research Paper Economic Analysis (EA) Research Paper Series*. Ottawa, Canada. ISBN: 0-662-38753-8.

Deeds, N. E. and Jones, T. L. (2011). *Assessment of Groundwater modeling approaches for brackish aquifers*. Austin, Texas: Texas Water Development Board. Available at: <http://pysot.readthedocs.io/en/latest/index.html>.

Dell'Angelo, J., Rulli, M. C. and D'Odorico, P. (2018). The Global Water Grabbing Syndrome. *Ecological Economics*. The Authors, 143, pp. 276–285. doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.033.

DHI. (2019). Why FEFLOW?. 10 reason to rely on the market leader. Disponible en: file:///C:/Users/frida/Documents/Doctorado/Bibliografia/MPbD_WhyFEFLOW_UK.pdf (Accessed: 19 November 2019).

Díaz Noriega, R., Fernández Álvarez, J. P. y Álvarez Álvarez, L. (2012). Estudio comparativo de los simuladores de flujo subterráneo Visual MODFLOW y FEFLOW 6.0', 7a ASAMBLEA HISPANO-PORTUGUESA DE GEODESIA Y GEOFÍSICA, At DONOSTIA – SAN SEBASTIÁN, (Junio), pp. 0–7. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/281646565/download>.

Díaz, Penélope. (2001). *Simulación numérica del acuífero superior del Valle de Mexicali, Baja California, México*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Disponible en: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/2388>

DIN 4049. (1992). *Hydrology, basic terms*.

DOI. (2007). *Colorado River Interim Guidelines for Lower Basin Shortage and the Coordinated Operations for Lake Powell and Lake Mead*. Department of the Interior. Washington, D.C. Disponible en: <https://www.usbr.gov/lc/region/programs/strategies/RecordofDecision.pdf>

DOF. (1965). Decreto por el que se establece la veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en el Estado de Baja California. *Diario Oficial de la Federación*. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4616319&fecha=15/05/1965&cod_diario=198386

DOF. (2018). Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico Administrativas que se indican. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018#gsc.tab=0

DOF. (2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano, Límites permisibles de la calidad de agua. Publicada en el Diario Oficial de la Federación 02/05/2022. Ciudad de México. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

D'Odorico, P., Chiarelli, D. D., Rosa, L., Bini, A., Zilberman, D., y Rulli, M. C. (2020). The global value of water in agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(36), 21985-21993. <https://doi.org/10.1073/pnas.2005835117>

Dourojeanni, A., Jouravlev, A., y Chávez, G. (2002). Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. CEPAL. ISBN: 9213220707. Disponible en: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6407-gestion-agua-nivel-cuencas-teoria-practica>

Duffield, G. M. (2019). Representative Values of Hydraulic Properties. AQTESOLV. http://www.aqtesolv.com/aquifer-tests/aquifer_properties.htm

EM. (2003). Marco para la Evaluación Resumen Marco para la Evaluación, Ecosistemas y Bienestar Humano: Marco para la Evaluación. Disponible en: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.3.aspx.pdf>

Escamilla, A. M. (1991) Notas sobre las recargas al acuífero Valle de Mexicali. Reporte inédito. Mexicali, Baja California.

FAO. (2016a). A Global Framework for Action Global Diagnostic. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5706e.pdf>.

FAO. (2016b). Global Framework for Action to achieve the Vision on Groundwater Governance. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i5705e.pdf>.

Favretto, N., Stringer, L. C., Dougill, A. J., Dallimer, M., Perkins, J. S., Reed, M. S., y Mulale, K. (2016). Multi-Criteria Decision Analysis to identify dryland ecosystem service trade-offs under different rangeland land uses. *Ecosystem Services*, 17, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.12.005>

Feirstein, E. J., Zamora, F., Vionnet, L. B., Maddock III, T. (2008). Simulation of groundwater conditions in the Colorado River Delta, Mexico. University of Arizona. Disponible en: https://www.geo.arizona.edu/rcncrd/documents/Delta%20Study_Eden,%20Francisco_Maddock_2008.pdf

Fetter, C. W. (2001). Applied Hydrogeology. Cuarta edición. Pearson Education. ISBN 0-13-088239-9.

Frederick, K. D., VandenBerg, T. P., y Hanson, J. (1996). Economic values of freshwater in the United States. *Research in Agricultural & Applied Economics*. Washington, D.C. Discussion paper 97-03.

Frezze, A. R. and Cherry, A. J. (1979). *Groundwater*. 1st edn. Edited by A. R. Frezze and A. J. Cherry. Upper Saddle River: Prentice Hall Inc. ISBN 0-13-365312-9. Disponible en: <https://www.un-igrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20book%20-%20English.pdf>

García-Arvizu, E. (2019). Determinación del Caudal Ecológico para el Río Hardy. Tesis para el obtener el grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Baja California. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/handle/20.500.12930/2288>

García, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Tercera. Instituto de Geografía. Universidad Autónoma de México. Disponible en: <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>

Gleeson, T., Befus, K., Jasechko, S., Luijendik, E., y Bayani Cardenas, M. (2016). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience* volume 9, pages 161–167. <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>

Griebler, C., y Avramov, M. (2015). Groundwater ecosystem services: a review. *Freshwater Science*, 34(1), 355-367. <https://doi.org/10.1086/679903>.

Griebler, C., Avramov, M., y Hose, G. (2019). Groundwater ecosystems and their services: current status and potential risks. In *Atlas of ecosystem services* (pp. 197-203). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-96229-0_31.

GobBC. (2020). Ley de Ingresos del Estado de Baja California para el Ejercicio Fiscal del año 2020. Periódico Oficial del Estado de Baja California. Disponible en: <https://www.congresobc.gob.mx/Documentos/Convocatorias/Ley%20de%20Ingresos%202020.pdf>

GobMex. (2014). Gobierno de México. CILA MEX-EUA. <https://www.gob.mx/sre/acciones-y-programas/c-i-l-a-mex-eua>

GoogleEarth. (2019). GoogleEarth. Fecha de consulta: enero-junio 2019.

Golden. (2022). Rockworks. Rockware Inc. Golden, Colorado.

Groundwater Governance. (2012). Gobernanza de aguas subterráneas, Perspectiva temática de la gobernanza de aguas subterráneas: puntos para el debate. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/groundwatergovernance/docs/Resumen__Gob_AS.pdf

GWP. (2017). Planes de gestión de aguas subterráneas. Global Water Partnership. Hacia un mundo seguro para el agua. Disponible en: https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/Planning_for_IWRM/Groundwater_management_plans/

GWP. (2018). Instrumentos de Gestión. Global Water Partnership. Hacia un mundo seguro para el agua. Disponible en: <https://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/Management-Instruments/>

Harbaugh, A.W., 2005. MODFLOW-2005. The U.S. Geological Survey modular groundwater model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, variously p.

Heath, R.C., (1983). Basic groundwater hydrology, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2220, 86p. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/wsp/2220/report.pdf>

Hill, B., (1993). Hydrogeology, Numerical Model and Scenario Simulations of the Yuma Area Groundwater Flow Model Arizona, California, and Mexico. Modeling Reporte No. 7. Arizona Department of Water Resources. Phoenix, Arizona.

Hinojosa-Huerta, O. y Carrillo-Guerrero, Y. (2010). La cuenca binacional del Río Colorado. En *Las Cuencas Hidrográficas de México. Diagnóstico y Priorización*, pp. 180–187. Disponible en: Pluralia Ediciones. ISBN: 9786077655077.

IBWC. (2018). Minute 319 Colorado River Limitrophe and Delta Environmental Flows Monitoring Final Report. https://www.ibwc.gov/Files/Minute_319_Monitoring_Report_112818_FINAL.pdf

IMTA. (2018). El Agua en el Valle de Mexicali, Baja California: Origen, uso y destino. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Disponible en: https://www.imta.gob.mx/gobmx/2020/EL_AGUA_VALLE_MEXICALI.pdf.

INEGI. (1982). Conjunto de datos Geológicos vectoriales escala 1:250,000 serie I'. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI. (2010). Censo de población y vivienda, 2010. Disponible en: <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>.

Jacobo Villa, M. A. (1990). Simulación matemática del comportamiento del acuífero del Valle de Mexicali, B.C. Universidad Autónoma Metropolitana.

Jalota, K.S., Vashisht, B.B., Sharma, S., y Kaur S., (2018). Chapter 4 – Climate Change and Groundwater. *Understanding Climate Change Impacts on Crop Productivity and Water Balance*. Academic Press. Pages 149-181, ISBN 9780128095201. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809520-1.00004-5>.

Kandziora, M., Burkhard, B. y Muller, F. (2013). Interactions of ecosystem properties, ecosystem integrity and ecosystem service indicators-A theoretical matrix exercise. *Ecological Indicators*, 28, pp. 54–78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.006>.

Kerna, A., Colby, B., y Zamora, F. (2017). Cultural and recreational values for environmental flows in Mexico's Colorado River Delta. *Water Economics and Policy*, 3(02), 1650035. <https://doi.org/10.1142/S2382624X16500351>.

Kettunen, M., Bassi, S., Gantioler, S. y Ten Brink, P. (2009). *Assessing socio-economic benefits of Natura 2000: A toolkit for practitioners*. Brussels, Belgium: Institute for European Environmental Policy (IEEP). http://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/financing/docs/benefits_toolkit.pdf

Kumar, C. P. (2012). Groundwater Modelling Software – Capabilities and Limitations. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 1(2), pp. 46–57. doi: 10.9790/2402-0124657.

Kumar, C. P. (2019). An overview of Commonly Used Groundwater Modelling Software. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. ISSN: 23050-0328.

Kumar S., y Managi S. (2009). Industrial Water Demand and Shadow Price. In: *The Economics of Sustainable Development. Natural Resource Management and Policy*, vol 32. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-0-387-98176-5_10

Kuri, G. H. (2018). Agua subterránea en México: retos y pendientes para la transformación de su gestión. En C. Denzin, F. Taboada, & R. Pacheco-Vega (Eds.), *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica* (Issue April, pp. 149–170).

Lall, U., Josset, L., y Russo, T. (2020). A snapshot of the world's groundwater challenges. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 171-194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-025800>.

LAN. (1992). Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. Reforma DOF-11-02-2022. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LAN.pdf>

LESSER. (2006). Actualización geohidrológica del acuífero del Valle de Mexicali, análisis e incorporación de los resultados del estudio geohidrológico de la Mesa Arenosa de San Luis, Sonora. Mexicali, Baja California. Reporte interno de la Comisión Nacional del Agua.

LESSER. (2012). Modelo matemático del acuífero Valle de Mexicali, B.C., para evaluar los efectos del revestimiento del CTA. Reporte interno de la Comisión Nacional del Agua.

Lesser, L. E., Mahlknecht, J. and López-Pérez, M. (2019). Long-term hydrodynamic effects of the All-American Canal lining in an arid transboundary multilayer aquifer: Mexicali Valley in north-western Mexico. *Environmental Earth Sciences*. Springer Berlin Heidelberg, 78(16), pp. 1–17. doi: 10.1007/s12665-019-8487-6.

Leyva, E. (2010). *Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México*. Tesis UNAM, pp. 1–231

Loetz, O. J., Burdige-Irlean, J., Robinson, H., y Olmsted, F. H. (1975). *Geohydrologic Reconnaissance of the Imperial Valley, California*. Water Resources of Lower Colorado River-Salton Sea Area. Geological Survey Professional Paper 486-K.

Ma, M., Gao, S., Lu, Y., y Yao, Y. (2021). Economic value of agricultural water use for Arizona. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*. <https://doi.org/10.1177/0020720920984685>

MATLAB. (2019). *Modelización y simulación*. Disponible en: <https://la.mathworks.com/discovery/modeling-and-simulation.html#:~:text=La%20modelizaci%C3%B3n%20es%20una%20forma,para%20ver%20c%C3%B3mo%20se%20comporta>.

MEA. (2005). *Ecosystem and Human Well-being: Synthesis*. Ecosystem and Human Well-being: Synthesis. Washington, D.C.: Millennium Ecosystem Assessment., pp. 1–155.

Megdal, S. B. (2018). Invisible water: the importance of good groundwater governance and management. *npj Clean Water*. Springer US, 1(1), pp. 1–5. doi: 10.1038/s41545-018-0015-9.

Mocior, E., y Kruse, M. (2016). Educational values and services of ecosystems and landscapes—An overview. *Ecological indicators*, 60, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.031>

Mohammed-Bushira, K. (2018). *Conjunctive Surface Water and Groundwater Modeling for Sustainable use in the Colorado River Delta using Conjunctive Surface Water and Groundwater Modeling for Sustainable use in the Colorado River Delta using MODFLOW, Mexico*. Universidad Autónoma del Estado de Baja California. <https://hdl.handle.net/20.500.12930/1746>

Molina-Saldivar, H. (2018) *Acuífero transfronterizo Cuenca Baja del Río Colorado*.

Molle, F., y Closas, A. (2020). Why is state-centered groundwater governance largely ineffective? A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 7(1), e1395. <https://doi.org/10.1002/wat2.1395>

Molle, François y Closas, Alvar. (2020). *Comanagement of groundwater: A review*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, vol. 7, no 1, p. e1394. <https://doi.org/10.1002/wat2.1394>

Musacchio, A., Mas-Pla, J., Soana, E., Re, V., & Sacchi, E. (2021). Governance and groundwater modelling: Hints to boost the implementation of the EU Nitrate Directive. The Lombardy Plain case, N Italy. *Science of The Total Environment*, 782, 146800. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146800>

Nagler, P., Sall, I., Barreto-Muñoz, A., Gómez-Sapiens, M., Nouri, H., Chavoshi Borujeni, S., y Didan, K. (2022). Effect of Restoration on Plant Greenness and Water Use in Relation to Drought in the Riparian Corridor of the Colorado River Delta. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13036>

OECD. (2018). *Water Governance Indicator Framework*. Organization for Economic and Development. Disponible en: <https://www.oecd.org/regional/OECD-Water-Governance-Indicator-Framework.pdf>

Olmsted, F., Loeltz, O., y Irlean, B., (1973). Geohydrology of the Yuma Area, Arizona and California. Water Resources of Lower Colorado River-Salton Sea Area. Geological Survey Professional Paper 486-H.

ONU Medio Ambiente (2018). Progreso sobre gestión integrada de recursos hídricos. Referencia global para el indicador ODS 6 6.5.1: Grado de aplicación de la ordenación integrada de los recursos hídricos (0-100). ISBN: 978-92-807-3710-3.

Pearce, D. W. (1993). Economic Values and the Natural World, Earthscan, London. ISBN: 9780262660846.

Peh, K. S.-H., Balmford, A. P., Bradbury, R. B., Brown, C., Butchart, S. H. M., Hughes, F. M. R., et al. (2014). Toolkit for ecosystem service site-based assessment (TESSA). Version 1.2, Cambridge, UK. <http://tessa.tools/>

Peregrina, L. M. (2010). Caracterización hidrogeológica del flujo subterráneo hacia humedales en la Mesa Arenosa de Andrade, Mexicali, Baja California, Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Disponible en: <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/864>

Pérez González, D. (2008). Modelización hidráulica de la relación acuífero-Río Colorado en el Tramo FFCC-Vado Carranza como elemento para la restauración de la zona riparia. Universidad Autónoma del Estado de Baja California. Disponible en: <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/handle/20.500.12930/3250>

Periódico Oficial del Estado de Baja California. (2020). Decreto No. 67. <https://wsxtbc.ebajacalifornia.gob.mx/CdnBc/api/Imagenes/ObtenerImagenDeSistema?sistemaSolicitante=PeriodicoOficial/2020/Mayo&nombreArchivo=Periodico-25-CXXVII-2020512-NÚMERO ESPECIAL.pdf&descargar=false>

PNUMA. (2021). Procesos en la gestión integrada de los recursos hídricos. Serie de seguimiento de los avances para la consecución del ODS 6: actualización sobre el indicador mundial 6.5.1 y necesidades de aceleración. ISBN 978-92-807-3878-0'.

Ramírez-Hernández, J. (1997). Estudio de las relaciones geohidrológicas del acuífero superior del Valle de Mexicali con las aguas geotérmicas superiores. Universidad de Alcalá.

Rangel-Parra, R., Neira, X., y Dafonte, J. (2022). Simulación de las garantías de abastecimiento para las demandas de agua en Mexicali, BC. Tecnología y ciencias del agua, 13(1), 49-88. DOI: 10.24850/j-tyca-2022-01-02.

REPDA. (2018). Registro Público de Derechos de Agua. Acuíferos Valle de Mexicali y Valle de San Luis Río Colorado, Sonora. Comisión Nacional del Agua. <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>

REPDA. (2020). Registro Público de Derechos de Agua. Acuíferos Valle de Mexicali y Valle de San Luis Río Colorado, Sonora. Comisión Nacional del Agua. <https://app.conagua.gob.mx/ConsultaRepda.aspx>

Richey, A. S., Thomas B. F., Lo, M., Famiglietti, J. S., Swenson, S., Rodell, M. (2015). Uncertainty in global groundwater storage estimates in a Total Groundwater Stress framework. Hydrogeological journal, 51, pp. 8677–8683. doi: 10.1002/2015WR018131.Received.

RIOC y GWP. (2012). Manual para la gestión integrada de los recursos hídricos de las cuencas transfronterizas de ríos, lagos y acuíferos. ISBN: 978-91-85321-92-6 Disponible en: https://www.rioc.org/IMG/pdf/RIOC_GWP_Manual_para_la_gestion_integrada.pdf

Rivera, A. (2007). Groundwater Indicators: A Proposal for Regional-Scale Aquifers. IAH OttawaGeo2007/OttawaGéo2007, 1–8.

RockWare. (2016). RockWorks 17 User Manual. Golden, Colorado. Disponible en: <https://www.rockware.com/downloads/documentation/rockworks/rockworks17.pdf>

Rodríguez-Burgueño, J. E. (2012). Modelación geohidrológica transitoria de la relación acuífero-río de la zona FFCC-vado Carranza del río Colorado con propósitos de manejo de la zona riparia.

Rodríguez-Burgueño, J. E. (2017). Efectos hidrológicos de los flujos pulso y base en la zona riparia del Delta del Río Colorado. Universidad Autónoma del Estado de Baja California. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12930/1414>

Sahoo, S. and Jha, M. K. (2017). Numerical groundwater-flow modeling to evaluate potential effects of pumping and recharge: implications for sustainable groundwater management in the Mahanadi delta region, India. *Hydrogeology Journal*.

Sanchez, V., y Cortez-Lara, A. A. (2015). Minute 319 of the International Boundary and Water Commission between the US and Mexico: Colorado River binational water management implications. *International Journal of Water Resources Development*, 31(1), 17–27. <https://doi.org/10.1080/07900627.2014.922465>

SARH. 1972. Resumen del estudio geohidrológico del Valle de Mexicali, B.C. y Mesa Arenosa de San Luis, Sonora. Reporte Inedito.

SDRL del DR014. (2015). Evaluación del proyecto de riego por gravedad tecnificado, en el Distrito de Riego 014 Río Colorado, Baja California y Sonora en 2014. Sociedad de Responsabilidad Limitada del DR014. Mexicali, Baja California. Reporte interno.

Sivakumar, B. (2019). *Chaos in hydrology: Bridging determinism and stochasticity*. Editado por Springer. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-90-481-2552-4.

Stock, J. M. and Hodges, K. V. (1989). 'Pre-Pliocene Extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific Plate', *Tectonics*, 8(1), pp. 99–115. doi: 10.1029/TC008i001p00099.

SGM. (1997). Carta Geológico-Minera Mexicali I11-12. Servicio Geológico Mexicano. Disponible en: https://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/3_I11-12_GM.pdf

SMN. (2018). Monitor de Sequía en México (MSM) al 31 de julio de 2018. Servicio Meteorológico Nacional. Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>

Solinst. (2017). Solinst Sonda TLC. Ontario, Canada: Solinst, Canalda Ltd.

Tallis, H. T., Ricketts, T., Guerry, A. D., Wood, S. A., Sharp, R., Nelson, E., et al. (2013). *InVEST 3.0.0 user's guide*. Stanford, USA: The Natural Capital Project. http://ncp-dev.stanford.edu/*dataportal/invest-releases/documentation/3_0_0/

TEEB. (2010). *The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations*. Editado por Pushpam Kumar. Earthscan: London and Washington.

Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage: *Transactions of the American Geophysical Union*, v. 16, p. 519-524.

Topcon. (2019). Topcon GR-5 Receptor avanzado GNSS. pp. 1–4.

Tuinstra, J. y van Wensem, J. (2014). Ecosystem services in sustainable groundwater management. *Science of the Total Environment*, 485–486, pp. 798–803. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.098>.

Tuner, K., Georgiou, S., Clark, R., y Brouwer, R. (2004). Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome. ISSN: 1020-1203.

UICN. (2012). *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos-GIRH, Módulo.3. Unión Internacional para la Conservación.*

UNAM. (1992). Texto explicativo de la Carta Geológica de México. México, D.F.: Instituto de Geología, Universidad Autónoma de México, pp. 1–21. Available at: <http://www.geologia.unam.mx:8080/igl/index.php/difusion-y-divulgacion/212-carta-geologica-de-la-republica-mexicana/804-texto-explicativo-de-la-carta-geologica-de-mexico>.

UNESCO. (2007). *Sistemas Acuíferos Transfronterizos en la Américas – Evaluación Preliminar, Serie ISARM Américas N°1.* Montevideo/Washington DC: Programa Hidrológico Internacional (PHI). ISBN: 92-9089-101-7. Disponible en: <http://www.oas.org/dsd/water/Documentos/Sistemas%20Acu%C3%ADferos%20Transfronterizo%20en%20las%20Am%C3%A9ricas.pdf>

UN WATER. (2001). *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH).* Disponible en: <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/iwrm.shtml>

USAID. (2008). *Ecosystem Approach and Integrated Water Resources Ecosystem Approach and IWRM. Interrelated Approaches, (1).* Available at: https://www.iucn.org/sites/dev/files/content/documents/ecosystem_approach_and_iwrm_fact_sheet_0.pdf.

USBR. (1991). *Draft Environmental Impact Statement/ Draft Environmental Impact Report, All-American Canal Lining Project.* Imperial County, California. Disponible en: https://books.google.com.mx/books?id=7xIzAQAAMAAJ&printsec=frontcover&dq=all+american+canal+lining&hl=es-419&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=all%20american%20canal%20lining&f=false

USGS. (2010). *Geologic map of California and Arizona.* U.S. Geological Survey. https://ngmdb.usgs.gov/Prodesc/proddesc_96750.htm.

USGS. (2014). *Colorado River Basin Pre-Pulse LiDAR.* USGS Contract G10PC00026. Project Report. Agosto, 2014. Disponible en: <http://prd-tnm.s3.amazonaws.com/index.html?prefix=StagedProducts/Elevation/OPR/Projects/ColoradoRiverBasinLiDARQL1Minute319/AZCORiverBasinL12014>

USGS. (2020). *AZ Lower Colorado River 2018 B18 Airborne Lidar Report.* USGS Contract G16PC00022. Enero 2020. Disponible en: http://prd-tnm.s3.amazonaws.com/index.html?prefix=StagedProducts/Elevation/OPR/Projects/AZ_LowerColoradoRiver2018B18/AZ_LowerColoradoRiverB2_2018

Van de Shoik, (2003). Oportunidades, costos, beneficios y consecuencias no internacionales: Agua sostenible y segura para el año 2020', in.

Varady, R. G., Zuniga-Teran, A. A., Garfin, G. M., Martín, F., y Vicuña, S. (2016). Adaptive management and water security in a global context: definitions, concepts, and examples. *Current opinion in environmental sustainability*, 21, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.11.001>

Vázquez-González, R. et al. (1998). Estudio geohidrológico del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Mexicali, Baja California: CICESE, C.F.E.

Voss, C., Boldt, D., y Shapiro, A. M. (1997). A Graphical-User Interface for the U. S. Geological Survey's SUTRA Code using Argus ONE (for simulation of variable-density saturated-unsaturated ground-water flow with solute or energy transport). USGS Numbered Series 97-421. <https://doi.org/10.3133/ofr97421>

Watermark Numerical Computer. (2021). PEST. Model-Independent Parameter Estimation. 7th Edition. January, 2021.

Weiskel, P. K., Vogel, R. M., Steeves, P. A., Zarriello, P. J., DeSimone, L. A., y Ries, K. G. (2007). Water use regimes: Characterizing direct human interaction with hydrologic systems. *Water Resources Research*, 43(4), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2006WR005062>

Wels. C., Mackie. y D., Scibek, J., (2012). Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities. British Columbia Ministry of Environment. Water Protection and Sustainability Branch. Report No.194001.

WHO. (2017). Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición que incorpora la primera adenda. Organización Mundial de la Salud. Ginebra. ISBN: 978-92-4-354995-8. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

Wilder, M. O., Varady, R. G., Gerlak, A. K., Mumme, S. P., Flessa, K. W., Zuniga-Teran, A. A., Scott, C. A., Pablos, N. P., y Megdal, S. B. (2020). Hydrodiplomacy and adaptive governance at the U.S.-Mexico border: 75 years of tradition and innovation in transboundary water management. *Environmental Science and Policy*, 112(January), 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.05.013>

Williams, R. B., Al-Hmoud, R., Segarra, E., and Mitchell, D. (2017). An estimate of the shadow price of water in the southern Ogallala Aquifer. *Journal of Water Resource and Protection*, 9(3), 289-304. DOI: 10.4236/jwarp.2017.93019

Winston, R.B. (2009). ModelMuse-A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A29, 52 p.

WWAP. (2018). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Paris, UNESCO. Disponible en: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261494>

World Economic Forum (2018) World Economic Forum, Global Water Initiative. Disponible en: <https://www.weforum.org/projects/global-water-initiative> (Acceso: 13 septiembre, 2018).

WWC. (2000). World Water Council

Yang, X., y Liu, J. (2020). Assessment and Valuation of Groundwater Ecosystem Services: A Case Study of Handan City, China. *Water*, 12(5), 1455. <https://doi.org/10.3390/w12051455>

Anexo 1. Profundidad al nivel freático en los pozos de monitoreo.

Los presentes datos corresponden a las mediciones realizadas en diferentes periodos por la CONAGUA en colaboración con la UABC en la Red de Monitoreo Piezométrico.

Zona Mesa Arenosa de Andrade

Figura 1 Profundidad al nivel freático en el pozo

BC10-CNA-1.

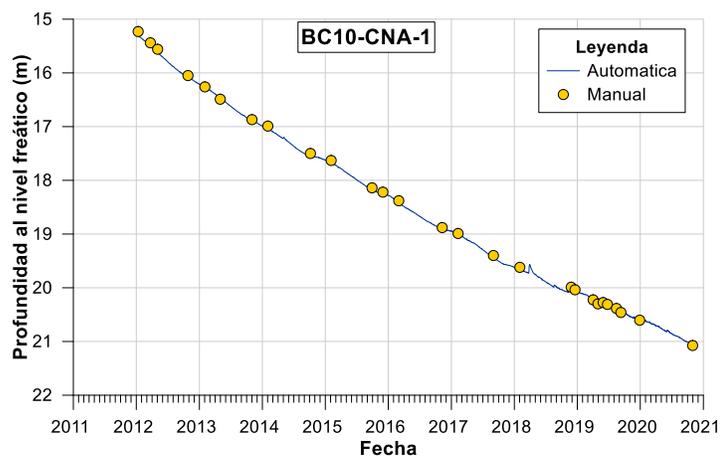


Figura 2 Profundidad al nivel freático en el pozo

BC10-CNA-2.

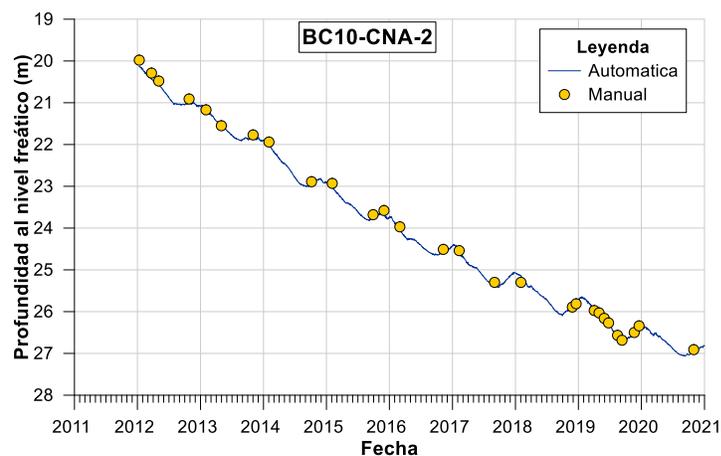


Figura 3 Profundidad al nivel freático en el pozo

BC10-CNA-3.

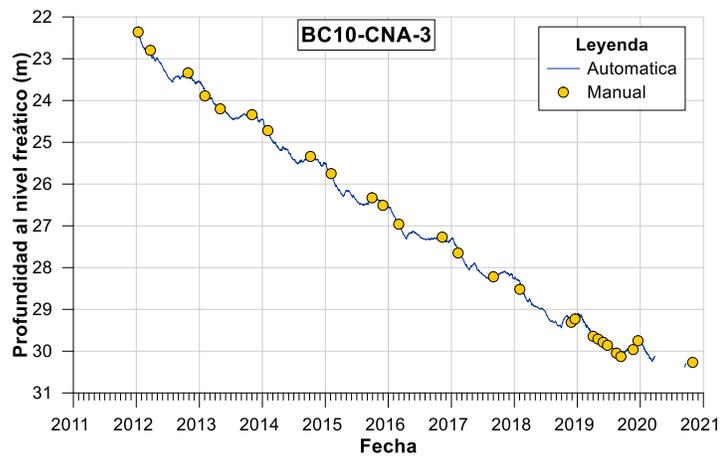


Figura 4 Profundidad al nivel freático en el pozo

BC10-CNA-4.

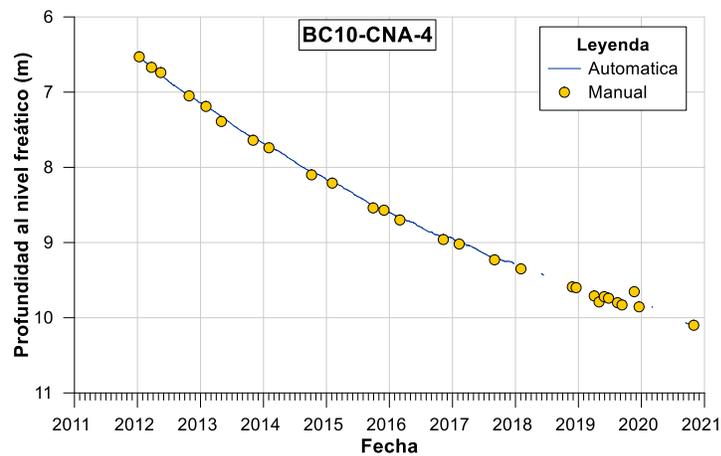


Figura 5 Profundidad al nivel freático en el pozo BC10-CNA-5.

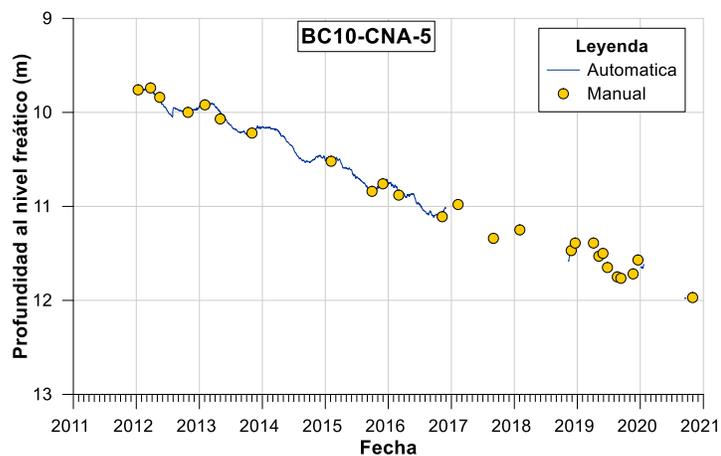


Figura 6 Profundidad al nivel freático en el pozo BC10-CNA-6.

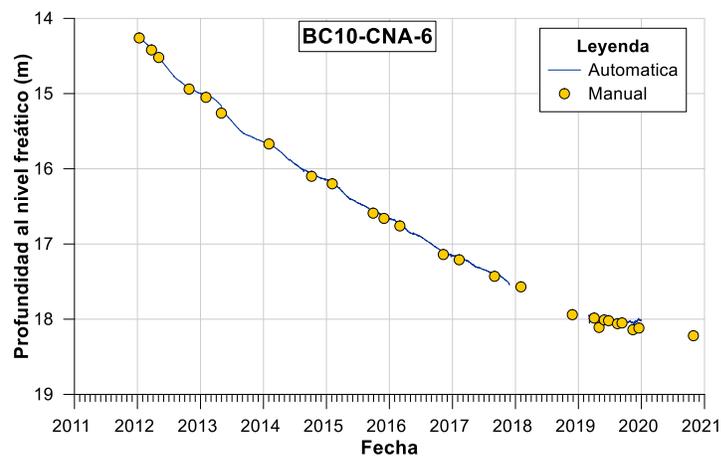


Figura 7 Profundidad al nivel freático en el pozo C-67.

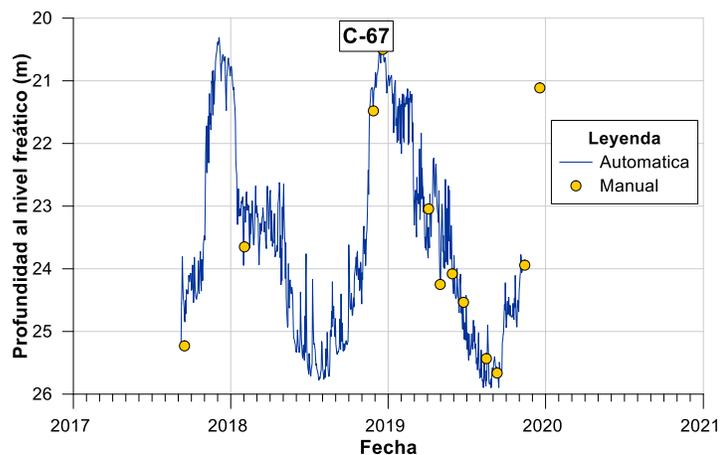


Figura 8 Profundidad al nivel freático en el pozo BC10-05.

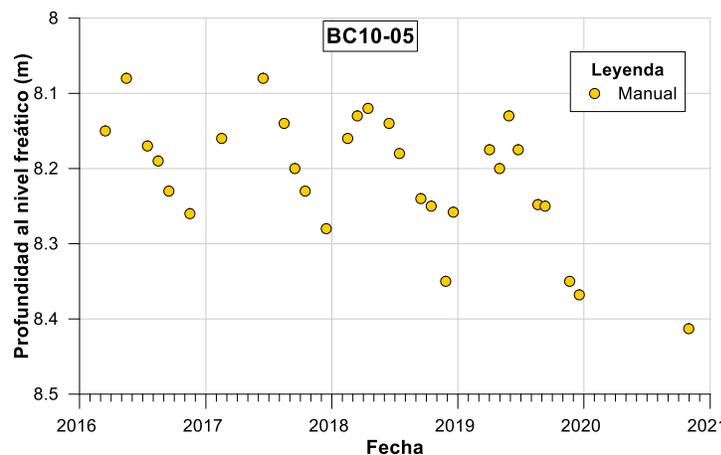


Figura 9 Profundidad al nivel freático en el pozo

PEMA-6.

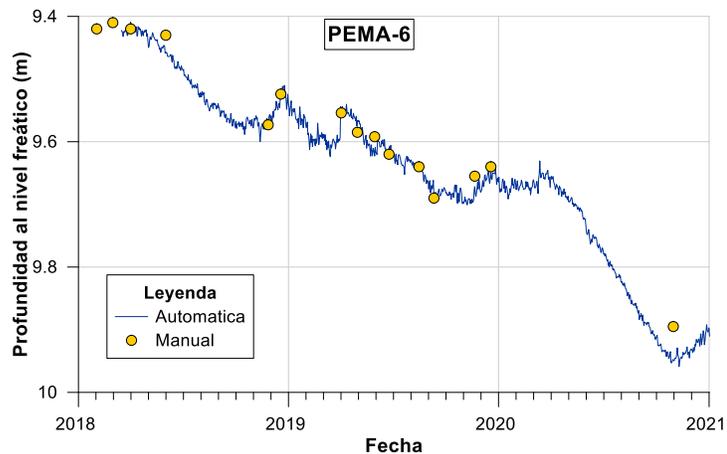
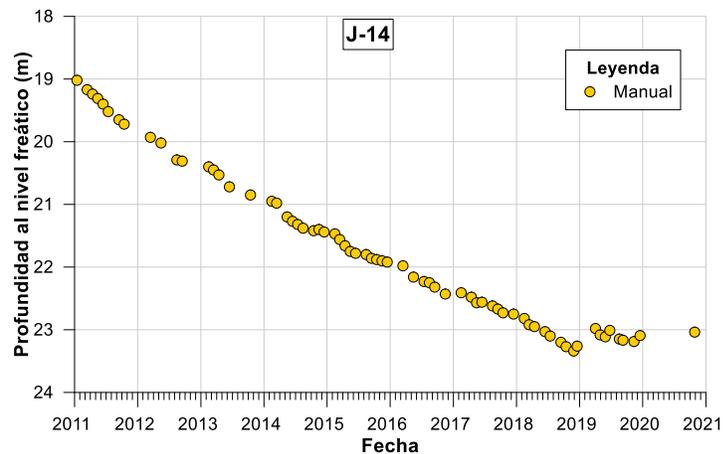


Figura 10 Profundidad al nivel freático en el pozo J-14.



Zona Noreste

Figura 11 Profundidad al nivel freático en el pozo J-3

Algodones.

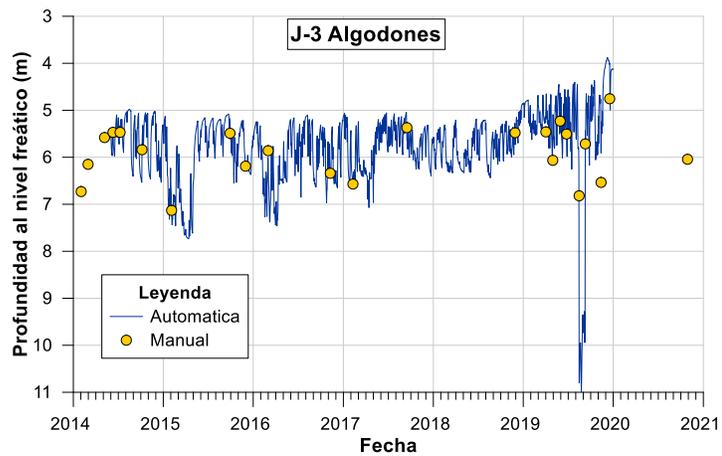


Figura 12 Profundidad al nivel freático en el pozo G-3-

9.

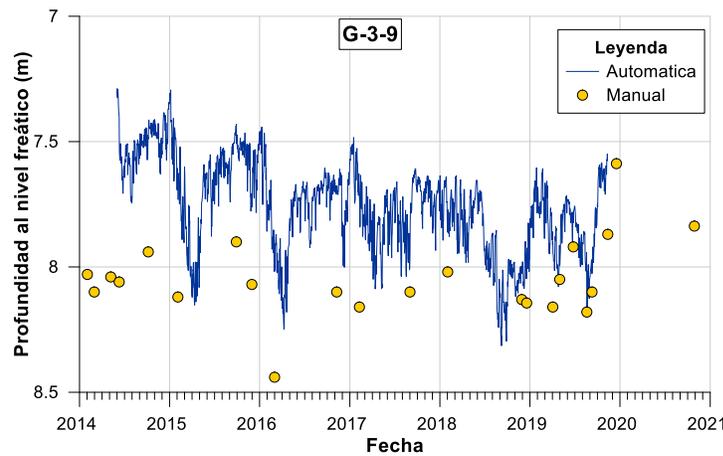


Figura 13 Profundidad al nivel freático en el pozo G-3-

13.

Figura 14 Profundidad al nivel freático en el pozo 53-E.

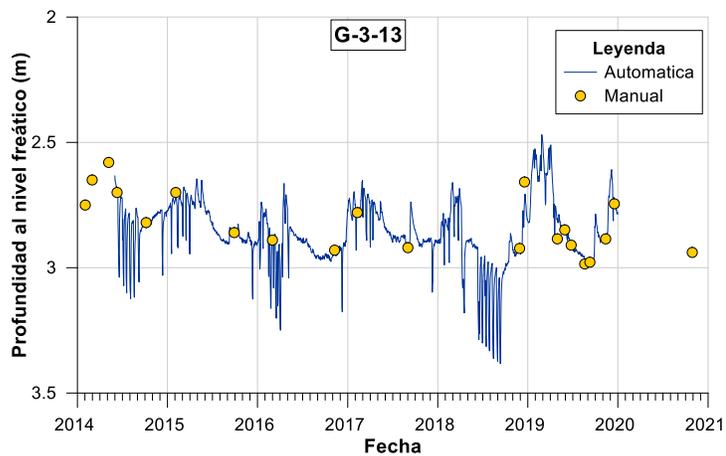
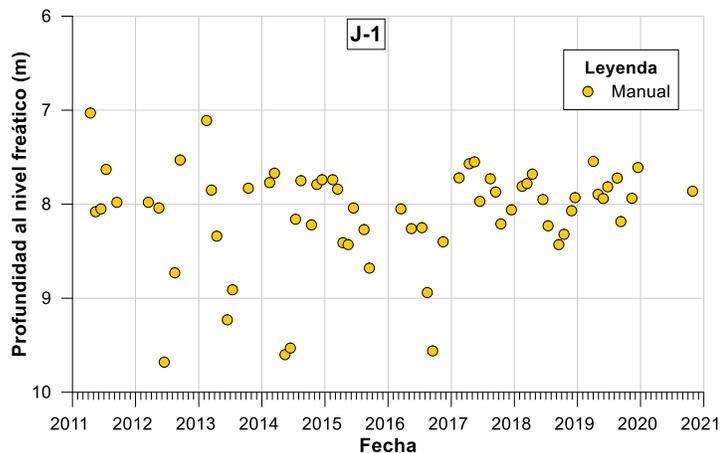
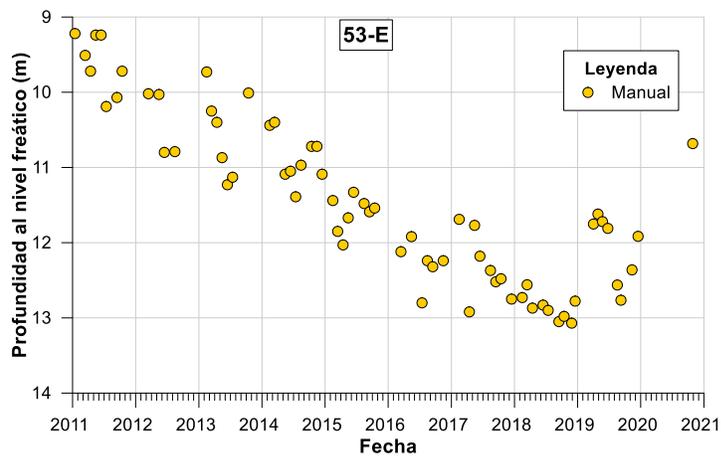


Figura 15 Profundidad al nivel freático en el pozo J-1.



Zona Centro

Figura 16 Profundidad al nivel freático en el pozo 7-3-l-1.

Figura 17 Profundidad al nivel freático en el pozo 2-JRM.

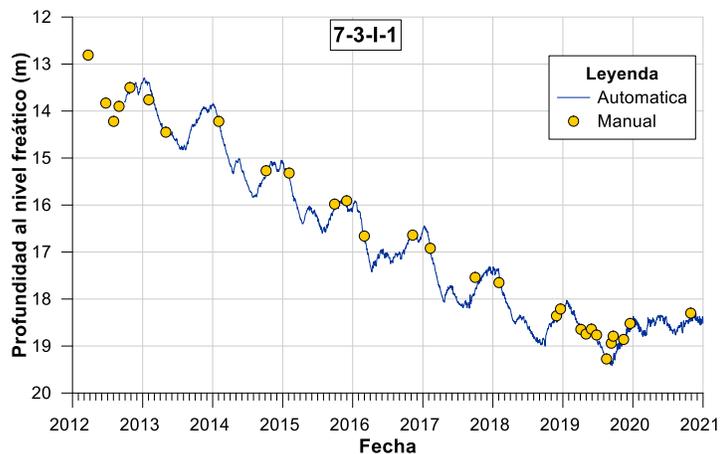


Figura 18 Profundidad al nivel freático en el pozo 8-L-C.

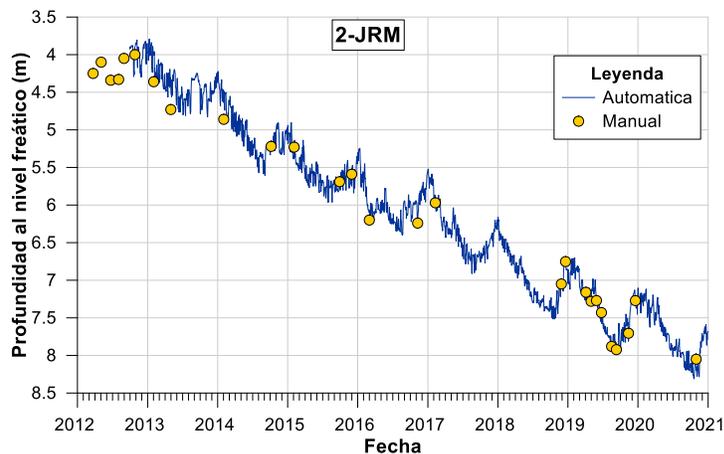


Figura 19 Profundidad al nivel freático en el pozo 14-VH.

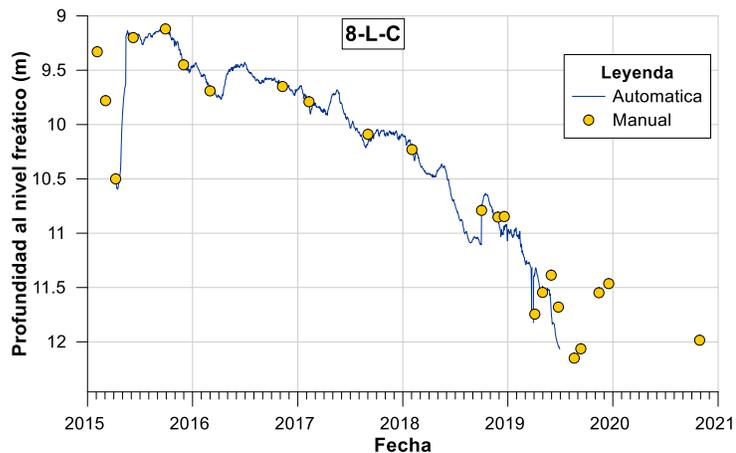


Figura 20 Profundidad al nivel freático en el pozo R-107.

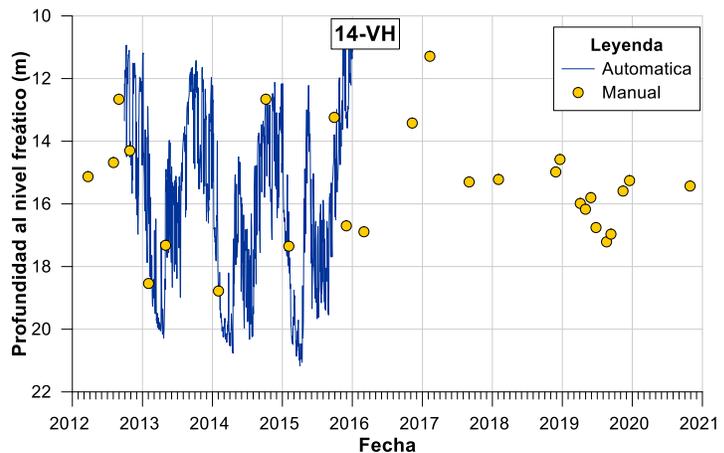


Figura 21 Profundidad al nivel freático en el pozo G-1-15 Piloto.

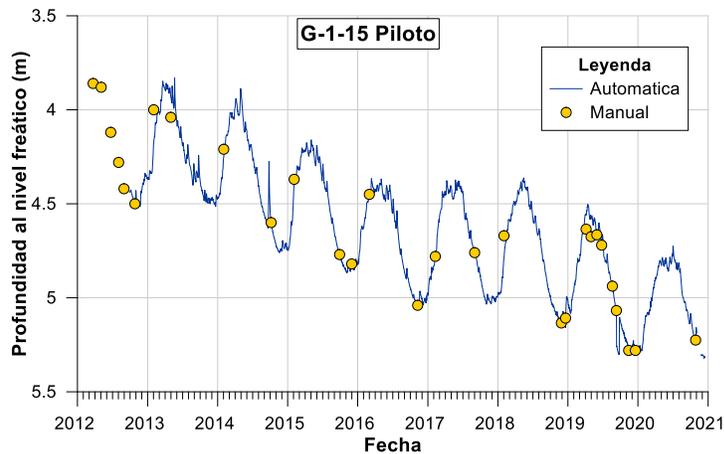
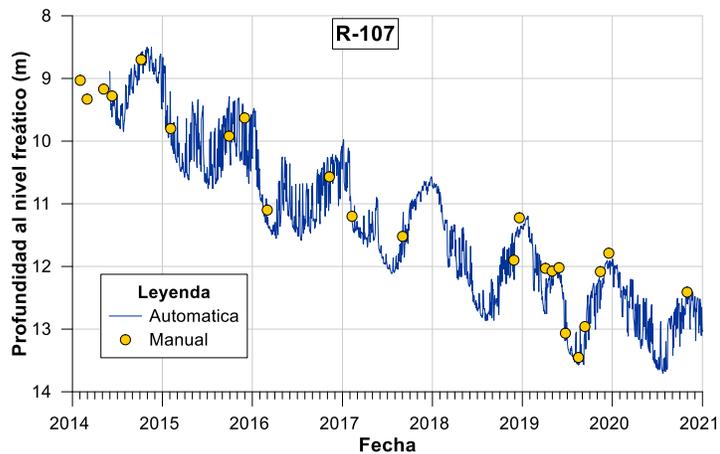


Figura 22 Profundidad al nivel freático en el pozo 4-LESSER.

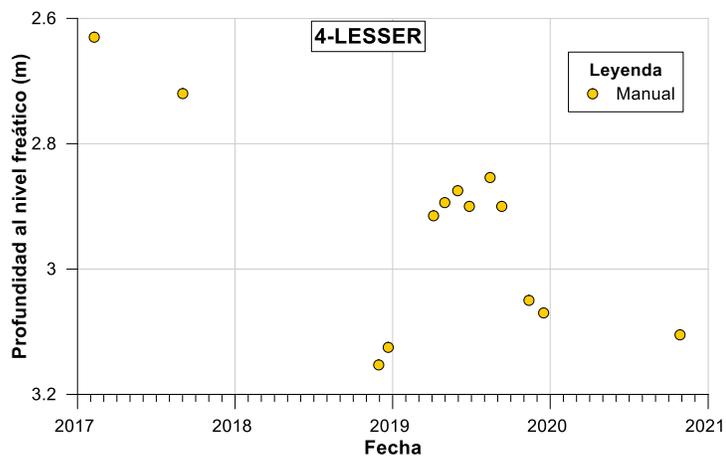


Figura 23 Profundidad al nivel freático en el pozo 10-BÓRQUEZ.

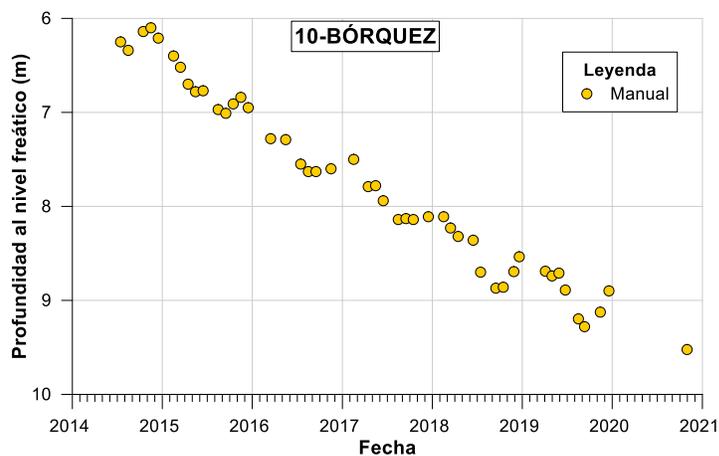


Figura 24 Profundidad al nivel freático en el pozo BC10-15.

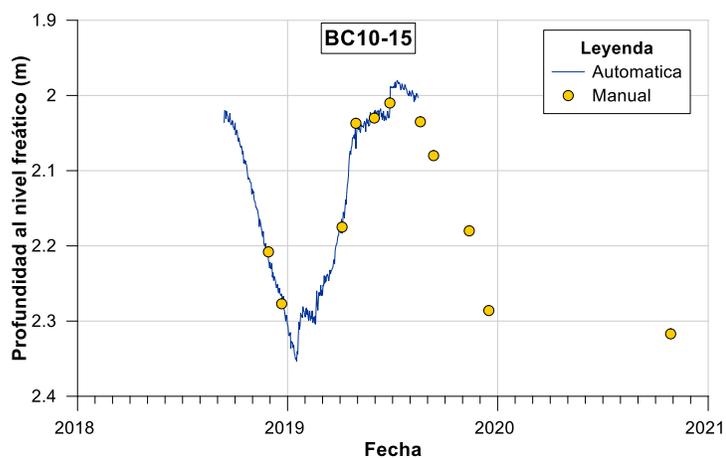


Figura 25 Profundidad al nivel freático en el pozo 4-CH.

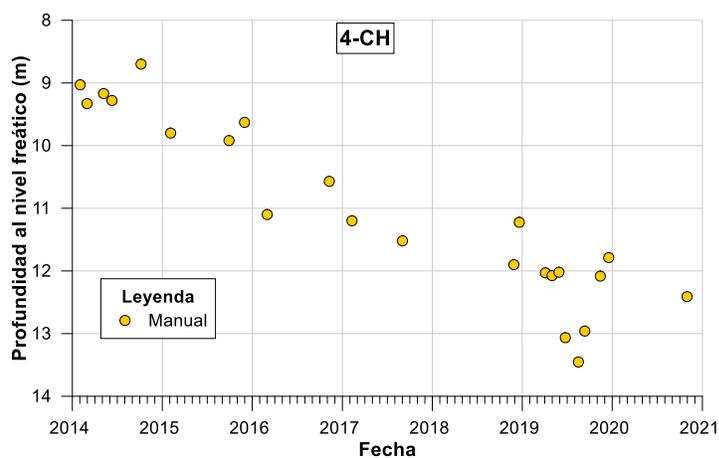
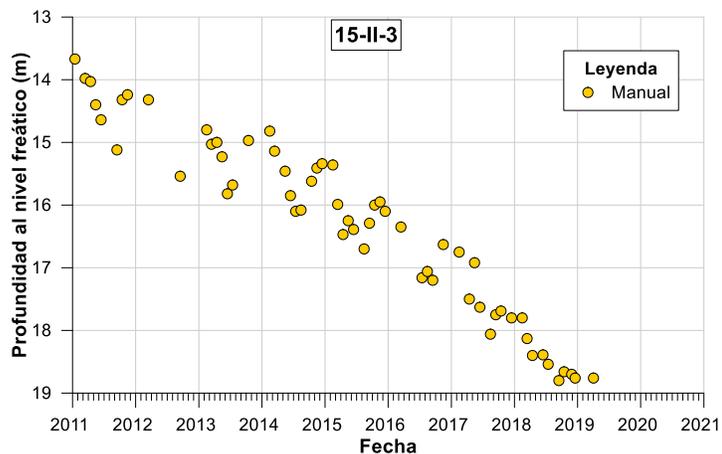


Figura 26 Profundidad al nivel freático en el pozo 15-II-3.



Zona Sur

Figura 27 Profundidad al nivel freático en el pozo 42-CHB.

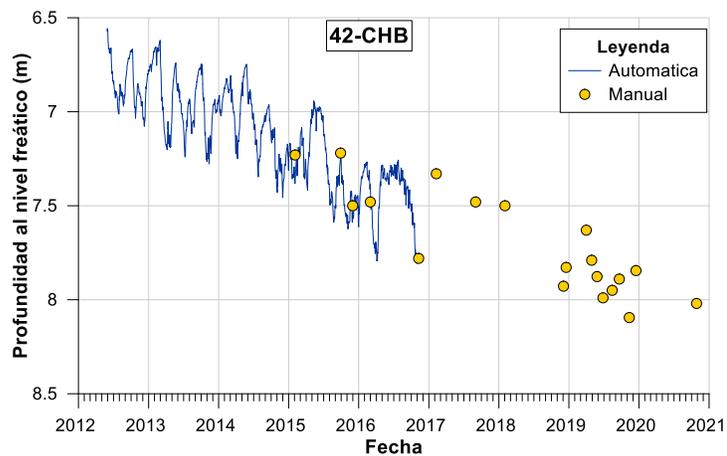


Figura 29 Profundidad al nivel freático en el pozo 105-C.

Figura 28 Profundidad al nivel freático en el pozo G-1-17.

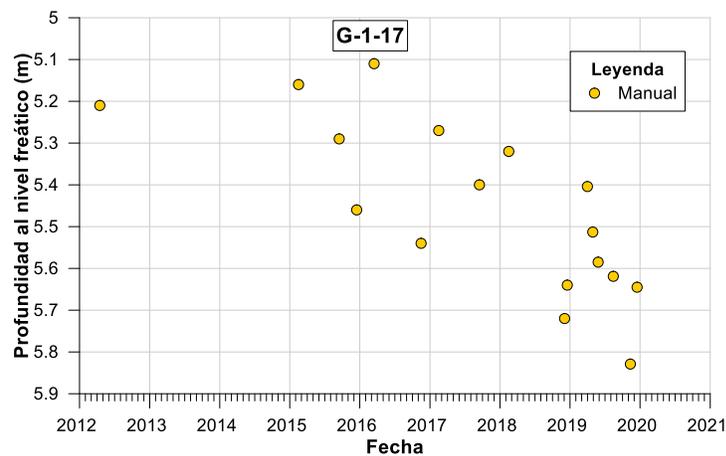
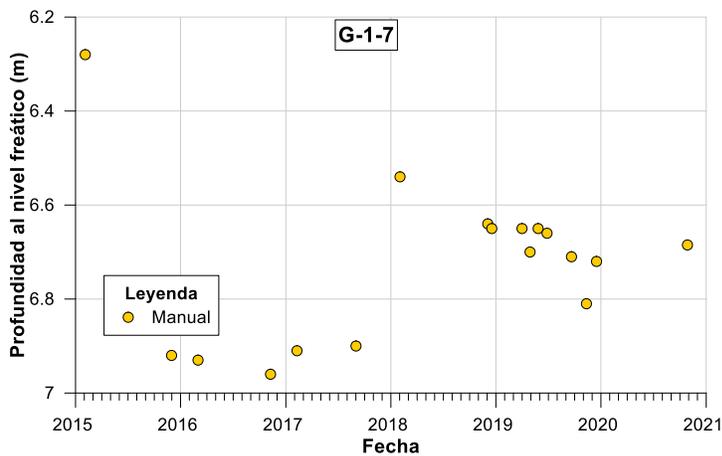
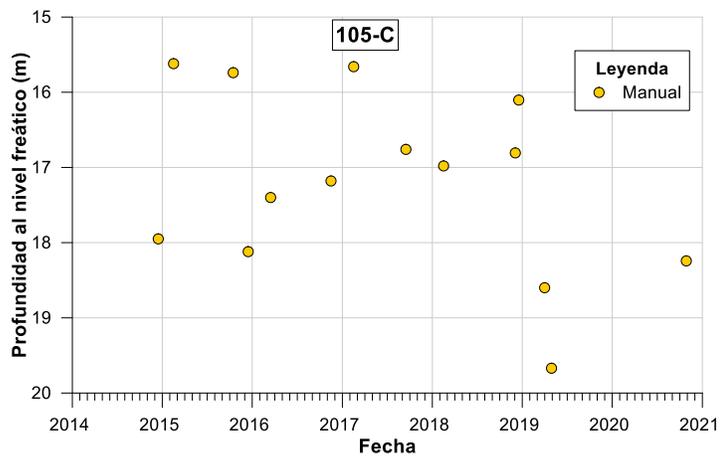


Figura 30 Profundidad al nivel freático en el pozo G-1-7.

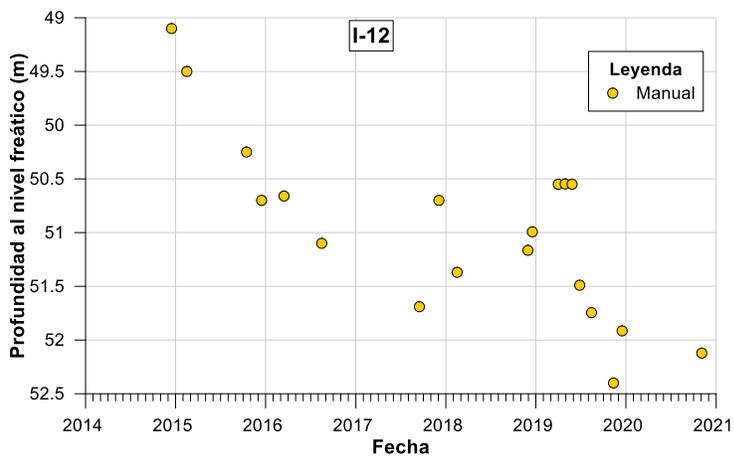
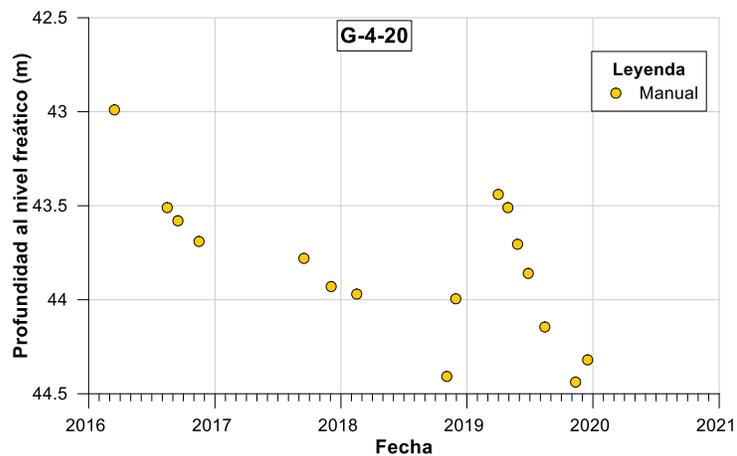


Zona Este (SLRC)

Figura 31 Profundidad al nivel freático en el pozo G-4-

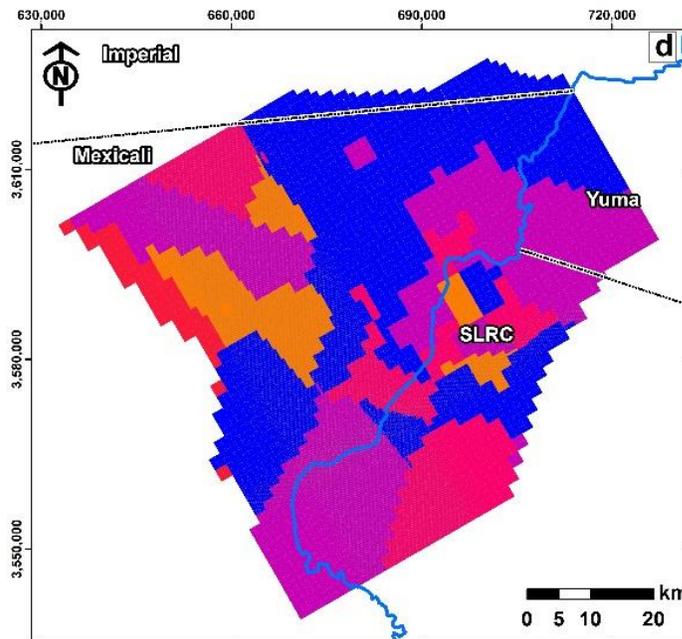
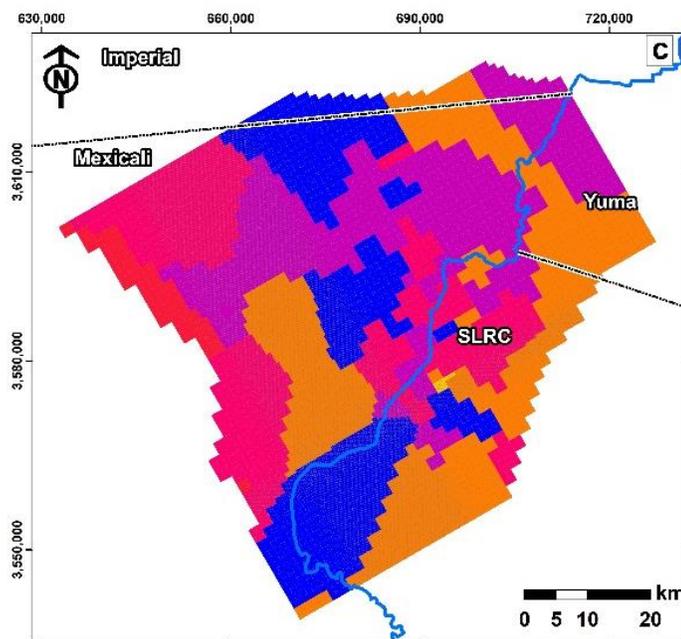
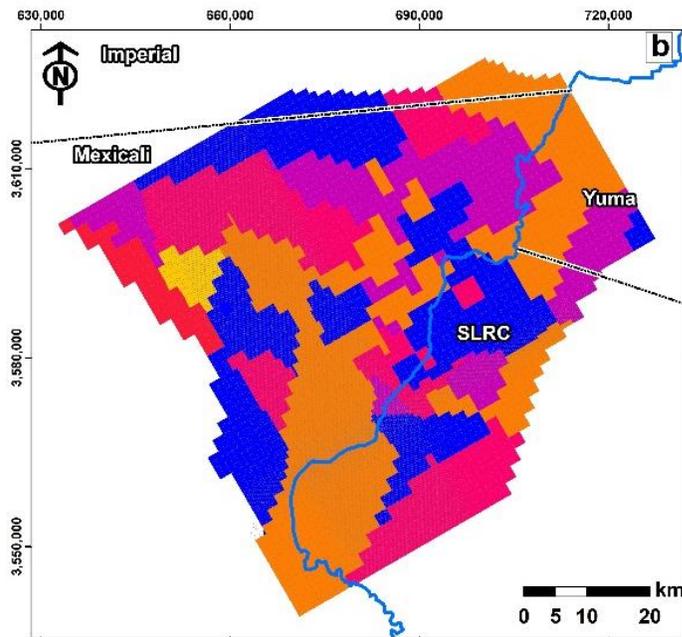
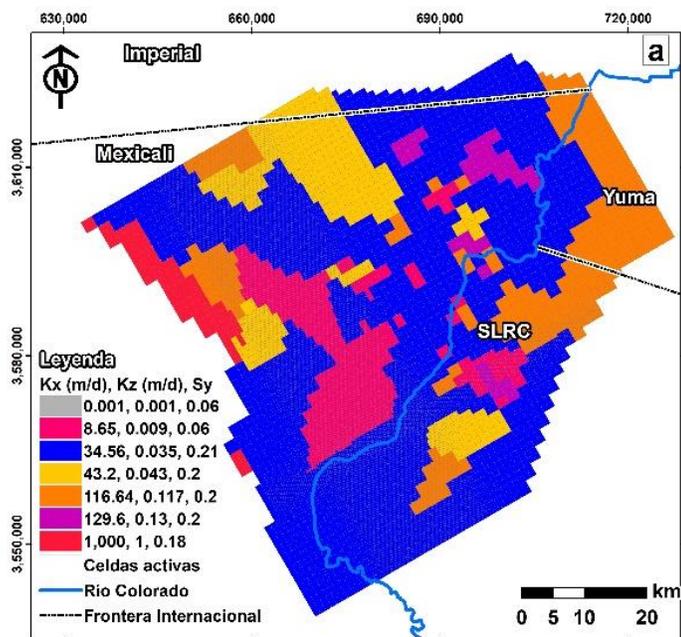
Figura 32 Profundidad al nivel freático en el pozo I-12.

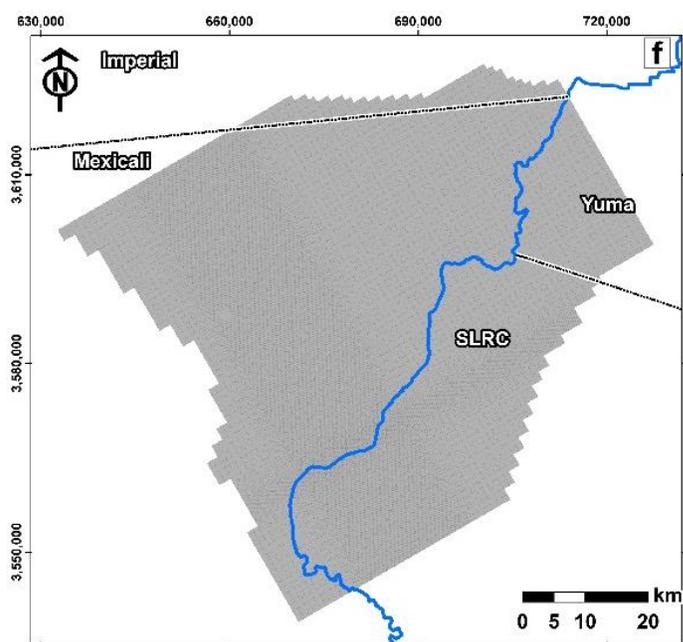
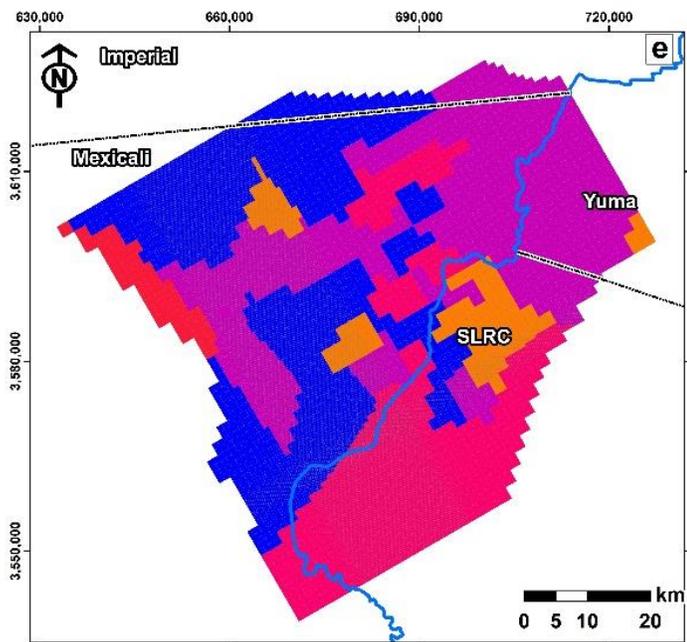
20.



Anexo 2. Condiciones del medio físico asignadas al modelo

Conductividad hidráulica horizontal, vertical y rendimiento específico asignado a cada capa del modelo. a) capa 1, 20 m; b) capa 2, 60 m; c) capa 3, 80 m; d) capa 4, 100 m; e) capa 5, 120 m; capa 6, 480 m.





Anexo 3. Datos de entrada al paquete Recarga (RCH)

Tabla 1 *Recarga estimada para el ciclo agrícola 2018-2019.*

| Módulo | Recarga (m/d) | | | | | | | | | | | |
|--------|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | oct-18 | nov-18 | dic-18 | ene-19 | feb-19 | mar-19 | abr-19 | may-19 | jun-19 | jul-19 | ago-19 | sep-19 |
| 1 | 1.49E-04 | 2.04E-04 | 2.41E-04 | 2.78E-04 | 3.62E-04 | 4.22E-04 | 4.12E-04 | 2.22E-04 | 2.37E-04 | 2.45E-04 | 2.08E-04 | 1.96E-04 |
| 2 | 1.48E-04 | 2.03E-04 | 2.39E-04 | 2.76E-04 | 3.59E-04 | 4.19E-04 | 4.09E-04 | 2.21E-04 | 2.36E-04 | 2.43E-04 | 2.06E-04 | 1.95E-04 |
| 3 | 1.68E-04 | 2.30E-04 | 2.71E-04 | 3.13E-04 | 4.07E-04 | 4.74E-04 | 4.64E-04 | 2.50E-04 | 2.67E-04 | 2.76E-04 | 2.34E-04 | 2.21E-04 |
| 4 | 1.18E-04 | 1.61E-04 | 1.90E-04 | 2.19E-04 | 2.85E-04 | 3.32E-04 | 3.25E-04 | 1.75E-04 | 1.87E-04 | 1.93E-04 | 1.63E-04 | 1.55E-04 |
| 5 | 1.63E-04 | 2.23E-04 | 2.63E-04 | 3.03E-04 | 3.95E-04 | 4.60E-04 | 4.50E-04 | 2.42E-04 | 2.59E-04 | 2.68E-04 | 2.26E-04 | 2.14E-04 |
| 6 | 1.54E-04 | 2.10E-04 | 2.48E-04 | 2.86E-04 | 3.72E-04 | 4.34E-04 | 4.24E-04 | 2.29E-04 | 2.44E-04 | 2.52E-04 | 2.14E-04 | 2.02E-04 |
| 7 | 1.06E-04 | 1.45E-04 | 1.71E-04 | 1.97E-04 | 2.56E-04 | 2.99E-04 | 2.92E-04 | 1.57E-04 | 1.68E-04 | 1.74E-04 | 1.47E-04 | 1.39E-04 |
| 8 | 1.75E-04 | 2.40E-04 | 2.83E-04 | 3.26E-04 | 4.25E-04 | 4.95E-04 | 4.84E-04 | 2.61E-04 | 2.79E-04 | 2.88E-04 | 2.44E-04 | 2.30E-04 |
| 9A | 1.52E-04 | 2.08E-04 | 2.46E-04 | 2.83E-04 | 3.68E-04 | 4.29E-04 | 4.20E-04 | 2.26E-04 | 2.42E-04 | 2.50E-04 | 2.11E-04 | 2.00E-04 |
| 9B | 1.36E-04 | 1.86E-04 | 2.20E-04 | 2.53E-04 | 3.30E-04 | 3.85E-04 | 3.76E-04 | 2.03E-04 | 2.17E-04 | 2.24E-04 | 1.89E-04 | 1.79E-04 |
| 10 | 1.70E-04 | 2.32E-04 | 2.75E-04 | 3.16E-04 | 4.12E-04 | 4.80E-04 | 4.69E-04 | 2.53E-04 | 2.70E-04 | 2.79E-04 | 2.36E-04 | 2.23E-04 |
| 11 | 1.38E-04 | 1.89E-04 | 2.23E-04 | 2.57E-04 | 3.35E-04 | 3.90E-04 | 3.82E-04 | 2.06E-04 | 2.20E-04 | 2.27E-04 | 1.92E-04 | 1.82E-04 |
| 12 | 1.60E-04 | 2.19E-04 | 2.59E-04 | 2.98E-04 | 3.88E-04 | 4.52E-04 | 4.42E-04 | 2.38E-04 | 2.54E-04 | 2.63E-04 | 2.22E-04 | 2.10E-04 |
| 14 | 1.92E-04 | 2.62E-04 | 3.10E-04 | 3.57E-04 | 4.65E-04 | 5.42E-04 | 5.30E-04 | 2.86E-04 | 3.05E-04 | 3.15E-04 | 2.67E-04 | 2.52E-04 |
| 15 | 1.40E-04 | 1.91E-04 | 2.26E-04 | 2.60E-04 | 3.38E-04 | 3.94E-04 | 3.86E-04 | 2.08E-04 | 2.22E-04 | 2.29E-04 | 1.94E-04 | 1.83E-04 |
| 16 | 1.69E-04 | 2.31E-04 | 2.74E-04 | 3.15E-04 | 4.10E-04 | 4.78E-04 | 4.68E-04 | 2.52E-04 | 2.69E-04 | 2.78E-04 | 2.35E-04 | 2.22E-04 |
| 17 | 1.68E-04 | 2.30E-04 | 2.71E-04 | 3.13E-04 | 4.07E-04 | 4.74E-04 | 4.64E-04 | 2.50E-04 | 2.67E-04 | 2.76E-04 | 2.33E-04 | 2.21E-04 |
| 18 | 1.23E-04 | 1.68E-04 | 1.99E-04 | 2.29E-04 | 2.98E-04 | 3.47E-04 | 3.40E-04 | 1.83E-04 | 1.96E-04 | 2.02E-04 | 1.71E-04 | 1.62E-04 |
| 19 | 1.21E-04 | 1.65E-04 | 1.95E-04 | 2.25E-04 | 2.93E-04 | 3.41E-04 | 3.34E-04 | 1.80E-04 | 1.92E-04 | 1.98E-04 | 1.68E-04 | 1.59E-04 |
| 20 | 1.17E-04 | 1.59E-04 | 1.88E-04 | 2.17E-04 | 2.83E-04 | 3.29E-04 | 3.22E-04 | 1.74E-04 | 1.85E-04 | 1.92E-04 | 1.62E-04 | 1.53E-04 |
| 21 | 1.83E-04 | 2.51E-04 | 2.96E-04 | 3.41E-04 | 4.44E-04 | 5.18E-04 | 5.06E-04 | 2.73E-04 | 2.91E-04 | 3.01E-04 | 2.55E-04 | 2.41E-04 |
| 22 | 1.94E-04 | 2.65E-04 | 3.13E-04 | 3.61E-04 | 4.70E-04 | 5.47E-04 | 5.35E-04 | 2.89E-04 | 3.08E-04 | 3.18E-04 | 2.69E-04 | 2.55E-04 |
| FDLC | 2.35E-04 | 3.22E-04 | 3.80E-04 | 4.38E-04 | 5.70E-04 | 6.64E-04 | 6.50E-04 | 3.50E-04 | 3.74E-04 | 3.86E-04 | 3.27E-04 | 3.09E-04 |

Figura 3

Anexo 4. Datos de entrada al paquete Extracción (WEL)

Tabla 1 *Número de pozos por módulo de riego y su tasa de extracción estimada para el ciclo agrícola 2018-2019.*

| Módulo | # de pozos | Extracción (m ³ /d) | | | | | | | | | | | |
|--------|------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | oct-18 | nov-18 | dic-18 | ene-19 | feb-19 | mar-19 | abr-19 | may-19 | jun-19 | jul-19 | ago-19 | sep-19 |
| 1 | 40 | 4,474 | 6,120 | 7,232 | 8,333 | 10,851 | 12,642 | 12,363 | 6,664 | 7,118 | 7,355 | 6,223 | 5,881 |
| 2 | 12 | 3,804 | 5,203 | 6,149 | 7,085 | 9,225 | 10,748 | 10,511 | 5,666 | 6,052 | 6,253 | 5,291 | 5,000 |
| 3 | 5 | 7,516 | 10,280 | 12,150 | 13,999 | 18,228 | 21,236 | 20,768 | 11,195 | 11,958 | 12,356 | 10,454 | 9,879 |
| 4 | 120 | 1,800 | 2,462 | 2,910 | 3,353 | 4,366 | 5,087 | 4,974 | 2,682 | 2,864 | 2,959 | 2,504 | 2,366 |
| 5 | 71 | 2,275 | 2,972 | 3,678 | 4,238 | 5,518 | 6,429 | 6,287 | 3,389 | 3,620 | 3,740 | 3,165 | 2,991 |
| 6 | 35 | 1,810 | 2,476 | 2,927 | 3,372 | 4,391 | 5,115 | 5,003 | 2,697 | 2,880 | 2,976 | 2,518 | 2,380 |
| 7 | 79 | 2,459 | 3,364 | 3,975 | 4,580 | 5,964 | 6,948 | 6,795 | 3,663 | 3,912 | 4,043 | 3,420 | 3,232 |
| 8 | 18 | 1,335 | 1,826 | 2,158 | 2,486 | 3,238 | 3,772 | 3,689 | 1,989 | 2,124 | 2,195 | 1,857 | 1,755 |
| 9A | 21 | 3,349 | 4,580 | 5,413 | 6,237 | 8,121 | 9,461 | 9,253 | 4,988 | 5,327 | 5,505 | 4,657 | 4,401 |
| 9B | 29 | 2,715 | 3,714 | 4,389 | 5,057 | 6,585 | 7,672 | 7,503 | 4,044 | 4,320 | 4,464 | 3,777 | 3,569 |
| 10 | 4 | 4,026 | 5,507 | 6,509 | 7,499 | 9,765 | 11,376 | 11,126 | 5,997 | 6,406 | 6,619 | 5,600 | 5,292 |
| 16 | 9 | 1,052 | 1,438 | 1,700 | 1,959 | 2,550 | 2,971 | 2,906 | 1,566 | 1,673 | 1,729 | 1,463 | 1,382 |
| 17 | 7 | 2,533 | 3,464 | 4,094 | 4,717 | 6,143 | 7,157 | 6,999 | 3,773 | 4,030 | 4,164 | 3,523 | 3,329 |
| FDLC | 18 | 7,530 | 7,530 | 1,808 | 2,083 | 2,713 | 3,160 | 3,091 | 1,666 | 1,780 | 1,839 | 1,556 | 1,470 |

Anexo 5. Datos de entrada al paquete Río (RIV)

Tabla 1 *Datos de entrada al paquete Río correspondientes al Canal Todo Americano.*

| i | j | Elevación del agua (m s.n.m.m.) | Conductancia (m ² /d) | Elevación del lecho del río (m s.n.m.m.) |
|----|-----|---------------------------------|----------------------------------|--|
| 22 | 170 | 49 | 3,500 | 42 |
| 21 | 170 | 49 | 3,500 | 42 |
| 21 | 169 | 49 | 3,500 | 42 |
| 20 | 169 | 49 | 3,500 | 42 |
| 20 | 168 | 49 | 3,500 | 42 |
| 20 | 167 | 49 | 3,500 | 42 |
| 19 | 167 | 46.5 | 375 | 42 |
| 19 | 166 | 46.5 | 375 | 42 |
| 18 | 166 | 46.5 | 375 | 42 |
| 18 | 165 | 46.5 | 375 | 42 |
| 17 | 165 | 46.5 | 375 | 42 |
| 17 | 164 | 46.5 | 375 | 42 |
| 16 | 164 | 46.5 | 375 | 42 |
| 15 | 164 | 46.5 | 375 | 42 |
| 15 | 163 | 46.5 | 375 | 42 |
| 14 | 163 | 46.5 | 375 | 42 |
| 14 | 162 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 162 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 161 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 160 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 159 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 158 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 157 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 156 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 155 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 154 | 46.5 | 375 | 42 |
| 13 | 153 | 43.5 | 375 | 39 |
| 13 | 152 | 43.5 | 375 | 39 |
| 13 | 151 | 43.5 | 375 | 39 |
| 12 | 151 | 43.5 | 375 | 39 |
| 12 | 150 | 43.5 | 375 | 39 |
| 12 | 149 | 43.5 | 375 | 39 |
| 11 | 149 | 43.5 | 375 | 39 |
| 11 | 148 | 43.5 | 375 | 39 |
| 11 | 147 | 43.5 | 375 | 39 |
| 10 | 147 | 43.5 | 375 | 39 |
| 10 | 146 | 43.5 | 750 | 39 |

| | | | | |
|----|-----|------|-------|----|
| 10 | 145 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 9 | 145 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 9 | 144 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 9 | 143 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 8 | 143 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 8 | 142 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 8 | 141 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 7 | 141 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 7 | 140 | 36.5 | 1,250 | 32 |
| 6 | 140 | 36.5 | 2,250 | 32 |
| 6 | 139 | 36.5 | 2,250 | 32 |
| 6 | 138 | 36.5 | 2,250 | 32 |
| 5 | 138 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 5 | 137 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 5 | 136 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 4 | 136 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 4 | 135 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 3 | 135 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 3 | 134 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 3 | 133 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 2 | 133 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 2 | 132 | 32.5 | 2,250 | 28 |
| 2 | 131 | 32.5 | 2,250 | 28 |

Tabla 2

Datos de entrada al paquete Río correspondientes al Río Colorado.

| i | j | Elevación del agua (m s.n.m.) | Conductancia (m ² /d) | Elevación del lecho del río (m s.n.m.) |
|----|-----|-------------------------------|----------------------------------|--|
| 24 | 170 | 30.50 | 23.51 | 30.00 |
| 27 | 167 | 29.35 | 23.51 | 28.85 |
| 26 | 168 | 30.00 | 23.51 | 29.50 |
| 28 | 160 | 27.95 | 23.41 | 27.45 |
| 28 | 163 | 28.50 | 23.41 | 28.00 |
| 27 | 165 | 29.00 | 23.41 | 28.50 |
| 29 | 159 | 28.00 | 23.41 | 27.50 |
| 29 | 161 | 28.25 | 23.41 | 27.75 |
| 29 | 163 | 28.50 | 38.58 | 28.00 |
| 32 | 159 | 27.00 | 38.58 | 26.50 |
| 33 | 157 | 25.50 | 38.58 | 25.00 |
| 36 | 142 | 17.00 | 38.58 | 16.50 |
| 36 | 156 | 23.70 | 46.33 | 23.20 |
| 36 | 157 | 23.80 | 46.33 | 23.30 |

| | | | | |
|----|-----|-------|---------|-------|
| 38 | 140 | 12.00 | 46.33 | 11.50 |
| 37 | 141 | 13.00 | 39.98 | 12.50 |
| 37 | 145 | 18.00 | 39.98 | 17.50 |
| 38 | 147 | 19.00 | 18.86 | 18.50 |
| 38 | 154 | 22.40 | 18.86 | 21.90 |
| 37 | 154 | 23.00 | 18.86 | 22.50 |
| 41 | 138 | 11.00 | 18.86 | 10.50 |
| 40 | 139 | 11.00 | 23.27 | 10.50 |
| 39 | 148 | 20.00 | 23.27 | 19.50 |
| 41 | 149 | 21.00 | 23.27 | 20.50 |
| 39 | 153 | 22.90 | 106.31 | 22.40 |
| 42 | 136 | 13.00 | 106.31 | 12.50 |
| 41 | 137 | 12.00 | 121.16 | 11.50 |
| 44 | 134 | 13.00 | 121.49 | 12.50 |
| 43 | 135 | 13.00 | 121.49 | 12.50 |
| 46 | 134 | 17.00 | 54.56 | 16.50 |
| 48 | 132 | 12.00 | 54.56 | 11.50 |
| 47 | 133 | 16.00 | 55.36 | 15.50 |
| 51 | 122 | 9.00 | 55.36 | 8.50 |
| 50 | 124 | 9.00 | 166.59 | 8.50 |
| 50 | 126 | 8.00 | 166.59 | 7.50 |
| 50 | 127 | 11.00 | 158.75 | 10.50 |
| 49 | 129 | 10.00 | 127.21 | 9.50 |
| 52 | 116 | 9.00 | 85.28 | 8.50 |
| 52 | 118 | 9.00 | 182.48 | 8.50 |
| 51 | 120 | 9.00 | 350.31 | 8.50 |
| 51 | 121 | 9.00 | 69.01 | 8.50 |
| 51 | 124 | 9.00 | 69.01 | 8.50 |
| 51 | 126 | 8.00 | 440.16 | 7.50 |
| 51 | 127 | 11.00 | 440.16 | 10.50 |
| 54 | 106 | 8.50 | 542.84 | 8.00 |
| 54 | 108 | 8.50 | 82.51 | 8.00 |
| 53 | 110 | 9.00 | 201.71 | 8.50 |
| 53 | 111 | 9.00 | 109.38 | 8.50 |
| 53 | 113 | 9.00 | 112.90 | 8.50 |
| 53 | 116 | 9.00 | 1521.98 | 8.50 |
| 56 | 104 | 8.50 | 924.30 | 8.00 |
| 55 | 105 | 8.50 | 420.77 | 8.00 |
| 58 | 100 | 7.50 | 420.77 | 7.00 |
| 58 | 102 | 8.00 | 420.77 | 7.50 |
| 57 | 104 | 8.00 | 1784.84 | 7.50 |

| | | | | |
|----|-----|------|---------|------|
| 60 | 96 | 7.00 | 696.49 | 6.50 |
| 59 | 98 | 7.00 | 2058.84 | 6.50 |
| 59 | 100 | 7.50 | 613.62 | 7.00 |
| 58 | 101 | 7.50 | 216.71 | 7.00 |
| 58 | 103 | 8.00 | 216.71 | 7.50 |
| 62 | 26 | 3.50 | 216.71 | 3.50 |
| 62 | 28 | 3.50 | 395.01 | 3.50 |
| 62 | 30 | 3.50 | 539.28 | 3.50 |
| 62 | 32 | 3.50 | 532.75 | 3.50 |
| 63 | 32 | 3.90 | 57.38 | 3.90 |
| 62 | 94 | 7.00 | 289.44 | 6.50 |
| 61 | 95 | 7.00 | 512.13 | 6.50 |
| 60 | 97 | 7.00 | 253.34 | 6.50 |
| 64 | 20 | 3.00 | 17.55 | 3.00 |
| 64 | 22 | 3.00 | 170.97 | 3.00 |
| 63 | 24 | 3.00 | 37.13 | 3.00 |
| 63 | 25 | 3.00 | 152.21 | 3.00 |
| 62 | 27 | 3.00 | 13.25 | 3.00 |
| 62 | 29 | 3.00 | 98.95 | 3.00 |
| 64 | 33 | 3.90 | 126.90 | 3.90 |
| 64 | 35 | 4.00 | 54.99 | 4.00 |
| 63 | 93 | 7.00 | 143.55 | 6.50 |
| 66 | 16 | 3.00 | 64.18 | 3.00 |
| 65 | 18 | 3.00 | 64.18 | 3.00 |
| 65 | 19 | 3.00 | 43.88 | 3.00 |
| 66 | 37 | 4.25 | 43.88 | 4.25 |
| 67 | 38 | 4.30 | 45.15 | 4.30 |
| 66 | 92 | 6.90 | 45.15 | 6.40 |
| 64 | 92 | 7.00 | 67.16 | 6.50 |
| 68 | 14 | 2.00 | 67.16 | 2.00 |
| 67 | 15 | 3.00 | 112.90 | 3.00 |
| 68 | 40 | 4.30 | 116.03 | 4.30 |
| 69 | 41 | 4.80 | 24.72 | 4.80 |
| 69 | 43 | 4.60 | 82.56 | 4.60 |
| 69 | 46 | 4.70 | 87.08 | 4.70 |
| 69 | 48 | 4.70 | 137.00 | 4.70 |
| 68 | 50 | 4.70 | 113.20 | 4.70 |
| 68 | 52 | 4.80 | 60.30 | 4.80 |
| 68 | 54 | 5.00 | 58.78 | 4.90 |
| 68 | 55 | 4.80 | 120.70 | 4.80 |
| 68 | 58 | 4.80 | 95.88 | 4.70 |

| | | | | |
|----|----|------|--------|------|
| 67 | 61 | 4.90 | 167.83 | 4.70 |
| 68 | 63 | 4.90 | 81.58 | 4.60 |
| 68 | 65 | 4.85 | 42.64 | 4.55 |
| 67 | 90 | 6.90 | 143.63 | 6.40 |
| 66 | 90 | 6.90 | 150.02 | 6.40 |
| 69 | 14 | 2.00 | 96.61 | 2.00 |
| 69 | 42 | 4.70 | 103.41 | 4.70 |
| 69 | 44 | 4.60 | 125.24 | 4.60 |
| 69 | 45 | 4.90 | 139.83 | 4.90 |
| 69 | 47 | 4.65 | 57.89 | 4.60 |
| 69 | 49 | 4.70 | 69.55 | 4.70 |
| 69 | 65 | 5.23 | 289.87 | 5.03 |
| 69 | 68 | 5.20 | 204.75 | 4.98 |
| 69 | 69 | 5.50 | 163.94 | 5.20 |
| 70 | 71 | 5.50 | 141.26 | 5.30 |
| 70 | 72 | 5.40 | 116.06 | 5.00 |
| 70 | 88 | 6.50 | 435.67 | 6.00 |
| 69 | 89 | 6.80 | 319.14 | 6.30 |
| 71 | 13 | 2.00 | 174.91 | 2.00 |
| 71 | 74 | 5.50 | 113.28 | 5.30 |
| 72 | 76 | 5.60 | 112.78 | 5.40 |
| 72 | 78 | 5.70 | 105.21 | 5.40 |
| 72 | 86 | 6.50 | 166.98 | 6.00 |
| 71 | 87 | 6.50 | 98.01 | 6.00 |
| 74 | 12 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 73 | 13 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 72 | 79 | 5.80 | 98.01 | 5.50 |
| 72 | 82 | 6.30 | 98.01 | 6.00 |
| 73 | 83 | 6.40 | 98.01 | 5.90 |
| 75 | 11 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 77 | 11 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 79 | 10 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 82 | 10 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 84 | 8 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 83 | 9 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 86 | 8 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 88 | 8 | 1.00 | 98.01 | 1.00 |
| 90 | 7 | 1.00 | 98.01 | 1.00 |
| 89 | 7 | 1.00 | 98.01 | 1.00 |
| 91 | 7 | 0.50 | 98.01 | 0.50 |
| 91 | 8 | 0.50 | 98.01 | 0.50 |

| | | | | |
|----|-----|-------|--------|-------|
| 91 | 9 | 0.50 | 98.01 | 0.50 |
| 93 | 10 | 0.00 | 98.01 | 0.00 |
| 84 | 11 | -1.50 | 98.01 | -1.50 |
| 95 | 12 | -2.00 | 98.01 | -2.00 |
| 96 | 12 | -2.00 | 98.01 | -2.00 |
| 23 | 171 | 32.90 | 23.51 | 32.40 |
| 24 | 171 | 30.50 | 23.51 | 30.00 |
| 25 | 170 | 30.20 | 23.51 | 29.70 |
| 25 | 169 | 30.00 | 23.51 | 29.50 |
| 25 | 168 | 29.95 | 23.51 | 29.45 |
| 26 | 167 | 29.40 | 23.51 | 28.90 |
| 27 | 166 | 29.30 | 23.51 | 28.80 |
| 28 | 165 | 28.95 | 23.41 | 28.45 |
| 28 | 164 | 28.80 | 23.41 | 28.30 |
| 28 | 162 | 28.40 | 23.41 | 27.90 |
| 29 | 162 | 28.40 | 23.41 | 27.90 |
| 28 | 161 | 28.25 | 23.41 | 27.75 |
| 30 | 159 | 27.50 | 23.41 | 27.00 |
| 31 | 159 | 27.20 | 23.41 | 26.70 |
| 32 | 158 | 28.02 | 38.58 | 27.52 |
| 34 | 156 | 25.30 | 38.58 | 24.80 |
| 35 | 156 | 25.00 | 38.58 | 24.50 |
| 35 | 157 | 24.70 | 38.58 | 24.20 |
| 38 | 155 | 23.00 | 18.86 | 22.50 |
| 37 | 155 | 23.10 | 18.86 | 22.60 |
| 39 | 154 | 22.30 | 18.86 | 21.80 |
| 40 | 153 | 21.60 | 106.31 | 21.10 |
| 41 | 152 | 22.22 | 23.27 | 21.72 |
| 41 | 153 | 22.50 | 23.27 | 22.00 |
| 41 | 151 | 21.00 | 23.27 | 20.50 |
| 41 | 150 | 21.00 | 23.27 | 20.50 |
| 41 | 148 | 21.00 | 23.27 | 20.50 |
| 40 | 148 | 21.00 | 23.27 | 20.50 |
| 39 | 147 | 20.00 | 23.27 | 19.50 |
| 38 | 148 | 20.00 | 23.27 | 19.50 |
| 37 | 147 | 19.00 | 18.86 | 18.50 |
| 37 | 146 | 19.00 | 18.86 | 18.50 |
| 37 | 144 | 18.00 | 39.98 | 17.50 |
| 37 | 143 | 18.00 | 39.98 | 17.50 |
| 36 | 143 | 18.00 | 46.33 | 17.50 |
| 36 | 141 | 17.00 | 38.58 | 16.50 |

| | | | | |
|----|-----|-------|---------|-------|
| 38 | 141 | 13.00 | 39.98 | 12.50 |
| 39 | 140 | 12.00 | 46.33 | 11.50 |
| 40 | 140 | 11.00 | 23.27 | 10.50 |
| 42 | 137 | 12.00 | 121.16 | 11.50 |
| 43 | 136 | 13.00 | 106.31 | 12.50 |
| 44 | 135 | 13.00 | 121.49 | 12.50 |
| 45 | 134 | 13.00 | 121.49 | 12.50 |
| 46 | 133 | 17.00 | 54.56 | 16.50 |
| 48 | 133 | 16.00 | 55.36 | 15.50 |
| 48 | 131 | 12.00 | 54.56 | 11.50 |
| 49 | 131 | 12.00 | 54.56 | 11.50 |
| 49 | 130 | 12.00 | 54.56 | 11.50 |
| 50 | 128 | 10.00 | 127.21 | 9.50 |
| 50 | 129 | 10.00 | 127.21 | 9.50 |
| 51 | 125 | 8.00 | 440.16 | 7.50 |
| 50 | 125 | 8.00 | 166.59 | 7.50 |
| 51 | 123 | 9.00 | 69.01 | 8.50 |
| 52 | 120 | 9.00 | 350.31 | 8.50 |
| 52 | 119 | 9.00 | 350.31 | 8.50 |
| 52 | 117 | 9.00 | 182.48 | 8.50 |
| 53 | 115 | 9.00 | 1521.98 | 8.50 |
| 53 | 114 | 9.00 | 1521.98 | 8.50 |
| 53 | 112 | 9.00 | 112.90 | 8.50 |
| 53 | 109 | 9.00 | 201.71 | 8.50 |
| 53 | 108 | 9.00 | 201.71 | 8.50 |
| 54 | 107 | 8.50 | 82.51 | 8.00 |
| 54 | 105 | 8.50 | 542.84 | 8.00 |
| 56 | 105 | 8.50 | 924.30 | 8.00 |
| 57 | 103 | 8.00 | 1784.84 | 7.50 |
| 59 | 99 | 7.50 | 613.62 | 7.00 |
| 61 | 96 | 7.00 | 696.49 | 6.50 |
| 62 | 95 | 7.00 | 512.13 | 6.50 |
| 63 | 94 | 7.00 | 289.44 | 6.50 |
| 64 | 93 | 7.00 | 143.55 | 6.50 |
| 65 | 92 | 7.00 | 67.16 | 6.50 |
| 66 | 91 | 6.90 | 45.15 | 6.40 |
| 67 | 89 | 6.90 | 143.63 | 6.40 |
| 68 | 89 | 6.90 | 143.63 | 6.40 |
| 69 | 88 | 6.80 | 319.14 | 6.30 |
| 70 | 87 | 6.50 | 435.67 | 6.00 |
| 72 | 87 | 6.50 | 98.01 | 6.00 |

| | | | | |
|----|----|------|--------|------|
| 72 | 85 | 6.50 | 166.98 | 6.00 |
| 72 | 84 | 6.50 | 166.98 | 6.00 |
| 73 | 84 | 6.50 | 166.98 | 6.00 |
| 73 | 85 | 6.50 | 166.98 | 6.00 |
| 72 | 83 | 6.40 | 98.01 | 5.90 |
| 73 | 82 | 6.30 | 98.01 | 6.00 |
| 72 | 81 | 6.30 | 98.01 | 6.00 |
| 72 | 80 | 6.30 | 98.01 | 6.00 |
| 72 | 77 | 5.70 | 105.21 | 5.40 |
| 72 | 75 | 5.60 | 112.78 | 5.40 |
| 72 | 74 | 5.60 | 112.78 | 5.40 |
| 71 | 73 | 5.50 | 113.28 | 5.30 |
| 70 | 73 | 5.40 | 116.06 | 5.00 |
| 70 | 70 | 5.50 | 141.26 | 5.30 |
| 69 | 70 | 5.50 | 141.26 | 5.30 |
| 69 | 67 | 5.20 | 204.75 | 4.98 |
| 69 | 66 | 5.23 | 289.87 | 5.03 |
| 68 | 64 | 4.85 | 42.64 | 4.55 |
| 68 | 62 | 4.90 | 167.83 | 4.70 |
| 68 | 61 | 4.90 | 167.83 | 4.70 |
| 68 | 60 | 4.90 | 101.52 | 4.80 |
| 68 | 59 | 4.90 | 101.52 | 4.80 |
| 68 | 57 | 4.80 | 95.88 | 4.70 |
| 68 | 56 | 4.80 | 95.88 | 4.70 |
| 68 | 53 | 5.00 | 58.78 | 4.90 |
| 68 | 51 | 4.80 | 60.30 | 4.80 |
| 69 | 50 | 4.70 | 113.20 | 4.70 |
| 68 | 49 | 4.70 | 69.55 | 4.70 |
| 68 | 41 | 4.80 | 24.72 | 4.80 |
| 67 | 39 | 4.30 | 116.03 | 4.30 |
| 66 | 36 | 4.25 | 43.88 | 4.25 |
| 66 | 38 | 4.30 | 45.15 | 4.30 |
| 65 | 36 | 4.25 | 43.88 | 4.25 |
| 65 | 35 | 4.25 | 43.88 | 4.25 |
| 64 | 34 | 4.00 | 54.99 | 4.00 |
| 63 | 33 | 3.90 | 126.90 | 3.90 |
| 62 | 31 | 3.50 | 532.75 | 3.50 |
| 62 | 25 | 3.00 | 152.21 | 3.00 |
| 63 | 23 | 3.00 | 37.13 | 3.00 |
| 63 | 22 | 3.00 | 37.13 | 3.00 |
| 64 | 21 | 3.00 | 170.97 | 3.00 |

| | | | | |
|----|-----|-------|--------|-------|
| 64 | 19 | 3.00 | 43.88 | 3.00 |
| 65 | 17 | 3.00 | 64.18 | 3.00 |
| 66 | 17 | 3.00 | 64.18 | 3.00 |
| 66 | 15 | 3.00 | 64.18 | 3.00 |
| 68 | 15 | 3.00 | 112.90 | 3.00 |
| 70 | 14 | 2.00 | 96.61 | 2.00 |
| 70 | 13 | 2.00 | 96.61 | 2.00 |
| 72 | 13 | 2.00 | 174.91 | 2.00 |
| 73 | 12 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 75 | 12 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 76 | 11 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 78 | 10 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 80 | 10 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 78 | 11 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 81 | 10 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 82 | 9 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 84 | 9 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 85 | 8 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 87 | 8 | 2.00 | 98.01 | 2.00 |
| 88 | 9 | 1.00 | 98.01 | 1.00 |
| 89 | 9 | 1.00 | 98.01 | 1.00 |
| 89 | 8 | 1.00 | 98.01 | 1.00 |
| 91 | 10 | 0.50 | 98.01 | 0.50 |
| 92 | 10 | 0.50 | 98.01 | 0.50 |
| 93 | 11 | 0.00 | 98.01 | 0.00 |
| 93 | 12 | -1.50 | 98.01 | -1.50 |
| 94 | 12 | -1.50 | 98.01 | -1.50 |
| 96 | 13 | -2.00 | 98.01 | -2.00 |
| 96 | 14 | -2.00 | 98.01 | -2.00 |
| 29 | 160 | 27.85 | 23.41 | 27.35 |
| 33 | 158 | 26.15 | 38.58 | 25.65 |
| 34 | 157 | 25.50 | 38.58 | 25.00 |
| 35 | 158 | 24.60 | 38.58 | 24.10 |
| 41 | 139 | 11.00 | 23.27 | 10.50 |

Anexo 6. Datos de entrada al paquete Dren (DRN)

Tabla 1

Datos de entrada a las celdas correspondientes al Río Hardy

| i | j | Elevación del dren (m s.n.m.m.) | Conductancia (m ² /d) |
|----|----|---------------------------------|----------------------------------|
| 34 | 12 | 5.15 | 2,000 |
| 33 | 13 | 6.17 | 2,000 |
| 36 | 10 | 4.81 | 2,000 |
| 37 | 10 | 5.00 | 2,000 |
| 39 | 9 | 4.40 | 2,000 |
| 41 | 8 | 3.96 | 2,000 |
| 41 | 9 | 3.99 | 2,000 |
| 43 | 8 | 3.67 | 2,000 |
| 46 | 9 | 3.38 | 2,000 |
| 45 | 10 | 3.66 | 2,000 |
| 48 | 6 | 6.50 | 2,000 |
| 47 | 8 | 2.96 | 2,000 |
| 47 | 10 | 3.18 | 2,000 |
| 49 | 5 | 1.26 | 2,000 |
| 49 | 8 | 2.14 | 2,000 |
| 49 | 9 | 2.13 | 2,000 |
| 51 | 6 | 2.40 | 2,000 |
| 53 | 6 | 1.89 | 2,000 |
| 55 | 6 | 2.36 | 2,000 |
| 56 | 5 | 2.75 | 2,000 |
| 36 | 11 | 5.00 | 2,000 |
| 32 | 16 | 9.00 | 2,000 |
| 32 | 18 | 9.45 | 2,000 |
| 32 | 20 | 9.30 | 2,000 |
| 32 | 21 | 9.40 | 2,000 |
| 31 | 21 | 9.60 | 2,000 |
| 31 | 22 | 9.80 | 2,000 |
| 32 | 19 | 9.50 | 2,000 |
| 32 | 17 | 8.87 | 2,000 |
| 32 | 15 | 9.40 | 2,000 |
| 32 | 14 | 7.98 | 2,000 |
| 33 | 14 | 6.58 | 2,000 |
| 34 | 13 | 5.70 | 2,000 |
| 34 | 11 | 5.03 | 2,000 |
| 35 | 11 | 5.01 | 2,000 |
| 35 | 10 | 4.80 | 2,000 |

| | | | |
|----|----|------|-------|
| 37 | 9 | 4.98 | 2,000 |
| 38 | 9 | 4.71 | 2,000 |
| 40 | 9 | 4.28 | 2,000 |
| 42 | 9 | 4.56 | 2,000 |
| 42 | 8 | 3.56 | 2,000 |
| 43 | 9 | 4.31 | 2,000 |
| 43 | 7 | 3.44 | 2,000 |
| 44 | 7 | 3.69 | 2,000 |
| 44 | 8 | 3.96 | 2,000 |
| 45 | 8 | 3.98 | 2,000 |
| 45 | 9 | 3.71 | 2,000 |
| 46 | 10 | 3.17 | 2,000 |
| 47 | 9 | 2.74 | 2,000 |
| 48 | 9 | 2.75 | 2,000 |
| 48 | 10 | 3.27 | 2,000 |
| 48 | 8 | 1.08 | 2,000 |
| 48 | 7 | 1.69 | 2,000 |
| 48 | 5 | 1.23 | 2,000 |
| 49 | 6 | 1.32 | 2,000 |
| 49 | 7 | 1.28 | 2,000 |
| 50 | 7 | 1.28 | 2,000 |
| 51 | 5 | 1.68 | 2,000 |
| 52 | 5 | 1.97 | 2,000 |
| 52 | 6 | 1.51 | 2,000 |
| 54 | 6 | 2.35 | 2,000 |
| 55 | 5 | 2.09 | 2,000 |

Tabla 2

Datos de entrada a las celdas correspondientes al Río Nuevo.

| i | j | Elevación del dren (m s.n.m.m.) | Conductancia (m ² /d) |
|---|----|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 23 | -1.5 | 2,000 |
| 1 | 22 | -1.5 | 2,000 |
| 1 | 21 | -1 | 2,000 |
| 1 | 20 | -1 | 2,000 |
| 1 | 19 | -1 | 2,000 |
| 1 | 18 | -1 | 2,000 |
| 1 | 17 | -1 | 2,000 |
| 1 | 16 | -1 | 2,000 |
| 1 | 16 | -2.5 | 2,000 |
| 1 | 15 | -2.5 | 2,000 |
| 2 | 15 | -2.5 | 2,000 |

| | | | |
|---|----|----|-------|
| 3 | 15 | -1 | 2,000 |
| 3 | 16 | 0 | 2,000 |
| 3 | 17 | 0 | 2,000 |
| 3 | 18 | 0 | 2,000 |
| 4 | 18 | 0 | 2,000 |
| 4 | 19 | 0 | 2,000 |
| 4 | 20 | 0 | 2,000 |
| 4 | 21 | 0 | 2,000 |
| 4 | 22 | 0 | 2,000 |
| 5 | 22 | 0 | 2,000 |
| 5 | 23 | 1 | 2,000 |
| 5 | 23 | 1 | 2,000 |
| 5 | 22 | 1 | 2,000 |
| 5 | 21 | 1 | 2,000 |
| 5 | 20 | 1 | 2,000 |
| 5 | 19 | 1 | 2,000 |
| 5 | 18 | 1 | 2,000 |
| 6 | 17 | 1 | 2,000 |
| 6 | 18 | 1 | 2,000 |
| 6 | 19 | 1 | 2,000 |
| 7 | 20 | 1 | 2,000 |
| 7 | 21 | 1 | 2,000 |
| 7 | 22 | 1 | 2,000 |
| 7 | 23 | 1 | 2,000 |
| 7 | 24 | 1 | 2,000 |
| 7 | 25 | 1 | 2,000 |
| 7 | 26 | 1 | 2,000 |
| 7 | 27 | 1 | 2,000 |
| 7 | 28 | 1 | 2,000 |
| 6 | 29 | 1 | 2,000 |
| 6 | 30 | 1 | 2,000 |
| 6 | 31 | 1 | 2,000 |
| 6 | 32 | 1 | 2,000 |
| 6 | 33 | 1 | 2,000 |
| 6 | 34 | 1 | 2,000 |
| 6 | 35 | 1 | 2,000 |
| 6 | 36 | 1 | 2,000 |
| 6 | 37 | 1 | 2,000 |
| 6 | 38 | 1 | 2,000 |
| 6 | 39 | 1 | 2,000 |
| 6 | 40 | 1 | 2,000 |

| | | | |
|----|----|---|-------|
| 7 | 40 | 1 | 2,000 |
| 7 | 39 | 1 | 2,000 |
| 8 | 38 | 1 | 2,000 |
| 8 | 37 | 1 | 2,000 |
| 8 | 36 | 1 | 2,000 |
| 8 | 35 | 1 | 2,000 |
| 8 | 34 | 1 | 2,000 |
| 8 | 33 | 1 | 2,000 |
| 8 | 32 | 1 | 2,000 |
| 9 | 31 | 1 | 2,000 |
| 9 | 30 | 1 | 2,000 |
| 10 | 30 | 1 | 2,000 |
| 10 | 31 | 1 | 2,000 |
| 10 | 32 | 1 | 2,000 |
| 11 | 33 | 1 | 2,000 |

Tabla 3

Datos de entrada a las celdas correspondientes al Dren Mesa.

| i | j | Elevación del dren (m s.n.m.) | Conductancia (m ² /d) |
|----|-----|-------------------------------|----------------------------------|
| 17 | 108 | 10 | 50,000 |
| 11 | 117 | 13 | 50,000 |
| 11 | 118 | 13 | 50,000 |
| 11 | 119 | 13 | 50,000 |
| 11 | 120 | 13 | 50,000 |
| 11 | 121 | 13 | 50,000 |
| 11 | 122 | 13 | 50,000 |
| 11 | 123 | 13 | 50,000 |
| 11 | 124 | 13 | 50,000 |
| 11 | 125 | 13 | 50,000 |
| 11 | 126 | 13 | 50,000 |
| 11 | 127 | 13 | 50,000 |
| 11 | 128 | 13 | 50,000 |
| 12 | 128 | 13 | 50,000 |
| 12 | 129 | 13 | 50,000 |
| 12 | 130 | 13 | 50,000 |
| 13 | 130 | 13 | 50,000 |
| 13 | 131 | 13 | 50,000 |
| 13 | 132 | 13 | 50,000 |
| 13 | 133 | 14 | 50,000 |
| 13 | 134 | 14 | 50,000 |
| 14 | 134 | 14 | 50,000 |

| | | | |
|----|-----|----|--------|
| 15 | 134 | 14 | 50,000 |
| 15 | 135 | 14 | 50,000 |
| 15 | 136 | 14 | 50,000 |
| 15 | 137 | 14 | 50,000 |
| 15 | 138 | 14 | 50,000 |
| 15 | 144 | 14 | 50,000 |
| 15 | 145 | 14 | 50,000 |
| 15 | 146 | 14 | 50,000 |
| 16 | 136 | 14 | 50,000 |
| 16 | 137 | 14 | 50,000 |
| 16 | 138 | 14 | 50,000 |
| 16 | 139 | 14 | 50,000 |
| 16 | 140 | 14 | 50,000 |
| 16 | 141 | 14 | 50,000 |
| 16 | 144 | 14 | 50,000 |
| 16 | 146 | 14 | 50,000 |
| 16 | 147 | 17 | 50,000 |
| 16 | 148 | 17 | 50,000 |
| 16 | 149 | 17 | 50,000 |
| 16 | 150 | 17 | 50,000 |
| 16 | 151 | 19 | 50,000 |
| 17 | 141 | 14 | 50,000 |
| 17 | 142 | 14 | 50,000 |
| 17 | 143 | 14 | 50,000 |
| 17 | 144 | 14 | 50,000 |
| 17 | 151 | 22 | 50,000 |
| 17 | 152 | 22 | 50,000 |
| 17 | 153 | 22 | 50,000 |
| 17 | 154 | 22 | 50,000 |
| 17 | 155 | 22 | 50,000 |
| 18 | 142 | 14 | 50,000 |
| 18 | 143 | 14 | 50,000 |
| 18 | 155 | 22 | 50,000 |
| 19 | 156 | 22 | 50,000 |
| 19 | 156 | 22 | 50,000 |
| 19 | 157 | 22 | 50,000 |

Anexo 7. Datos de entrada al paquete GHB

Tabla 1 *Datos de entrada a las celdas correspondientes al paquete de Frontera de Carga General (GHB).*

| i | j | Carga (m) | Conductancia (m ² /d) |
|----|-----|-----------|----------------------------------|
| 45 | 172 | 17 | 8,330 |
| 46 | 172 | 17 | 8,330 |
| 47 | 172 | 17 | 8,330 |
| 48 | 172 | 17 | 8,330 |
| 49 | 172 | 17 | 8,330 |
| 50 | 172 | 17 | 8,330 |
| 37 | 172 | 22 | 8,330 |
| 38 | 172 | 22 | 8,330 |
| 39 | 172 | 22 | 8,330 |
| 40 | 172 | 22 | 8,330 |
| 41 | 172 | 22 | 8,330 |
| 42 | 172 | 22 | 8,330 |
| 43 | 172 | 22 | 8,330 |
| 44 | 172 | 22 | 8,330 |
| 31 | 172 | 30 | 8,330 |
| 32 | 172 | 30 | 8,330 |
| 33 | 172 | 30 | 8,330 |
| 34 | 172 | 30 | 8,330 |
| 35 | 172 | 30 | 8,330 |
| 36 | 172 | 30 | 8,330 |
| 21 | 172 | 36 | 8,330 |
| 22 | 172 | 36 | 8,330 |
| 23 | 172 | 37 | 8,330 |
| 24 | 172 | 37 | 8,330 |
| 25 | 172 | 37 | 8,330 |
| 26 | 172 | 37 | 8,330 |
| 27 | 172 | 37 | 8,330 |
| 28 | 172 | 35 | 8,330 |
| 29 | 172 | 35 | 8,330 |
| 30 | 172 | 35 | 8,330 |
| 96 | 89 | 2 | 2,250 |
| 96 | 90 | 2 | 2,250 |
| 96 | 91 | 2 | 2,250 |
| 96 | 92 | 2 | 2,250 |
| 96 | 93 | 2 | 2,250 |
| 96 | 94 | 2 | 2,250 |

| | | | |
|----|-----|---|-------|
| 96 | 95 | 2 | 2,250 |
| 96 | 96 | 2 | 2,250 |
| 96 | 97 | 2 | 2,250 |
| 96 | 98 | 2 | 2,250 |
| 96 | 99 | 2 | 2,250 |
| 96 | 100 | 2 | 2,250 |
| 96 | 101 | 2 | 2,250 |
| 96 | 102 | 2 | 2,250 |
| 96 | 103 | 2 | 2,250 |
| 96 | 104 | 2 | 2,250 |
| 96 | 105 | 2 | 2,250 |
| 96 | 106 | 2 | 2,250 |
| 96 | 107 | 2 | 2,250 |
| 96 | 108 | 2 | 2,250 |
| 96 | 109 | 2 | 2,250 |
| 96 | 110 | 2 | 2,250 |
| 96 | 111 | 2 | 2,250 |
| 96 | 112 | 2 | 2,250 |
| 96 | 113 | 2 | 2,250 |
| 96 | 114 | 2 | 2,250 |
| 96 | 115 | 2 | 2,250 |
| 96 | 116 | 2 | 2,250 |
| 96 | 117 | 2 | 2,250 |
| 96 | 118 | 2 | 2,250 |
| 96 | 119 | 2 | 2,250 |
| 96 | 120 | 2 | 2,250 |
| 96 | 121 | 2 | 2,250 |
| 96 | 122 | 2 | 2,250 |
| 96 | 123 | 2 | 2,250 |
| 96 | 124 | 2 | 2,250 |
| 96 | 125 | 2 | 2,250 |
| 96 | 126 | 2 | 2,250 |
| 96 | 127 | 2 | 2,250 |
| 96 | 128 | 2 | 2,250 |
| 96 | 129 | 2 | 2,250 |
| 96 | 130 | 2 | 2,250 |
| 96 | 131 | 2 | 2,250 |
| 96 | 132 | 2 | 2,250 |
| 96 | 23 | 1 | 2,250 |
| 96 | 24 | 1 | 2,250 |
| 96 | 25 | 1 | 2,250 |

| | | | |
|----|----|---|-------|
| 96 | 26 | 1 | 2,250 |
| 96 | 27 | 1 | 2,250 |
| 96 | 28 | 1 | 2,250 |
| 96 | 29 | 1 | 2,250 |
| 96 | 30 | 1 | 2,250 |
| 96 | 31 | 1 | 2,250 |
| 96 | 32 | 1 | 2,250 |
| 96 | 33 | 1 | 2,250 |
| 96 | 34 | 1 | 2,250 |
| 96 | 35 | 1 | 2,250 |
| 96 | 36 | 1 | 2,250 |
| 96 | 37 | 1 | 2,250 |
| 96 | 38 | 1 | 2,250 |
| 96 | 39 | 1 | 2,250 |
| 96 | 40 | 1 | 2,250 |
| 96 | 41 | 1 | 2,250 |
| 96 | 42 | 1 | 2,250 |
| 96 | 43 | 1 | 2,250 |
| 96 | 44 | 1 | 2,250 |
| 96 | 45 | 1 | 2,250 |
| 96 | 46 | 1 | 2,250 |
| 96 | 47 | 1 | 2,250 |
| 96 | 48 | 1 | 2,250 |
| 96 | 49 | 1 | 2,250 |
| 96 | 50 | 1 | 2,250 |
| 96 | 51 | 1 | 2,250 |
| 96 | 52 | 1 | 2,250 |
| 96 | 53 | 1 | 2,250 |
| 96 | 54 | 1 | 2,250 |
| 96 | 55 | 1 | 2,250 |
| 96 | 56 | 1 | 2,250 |
| 96 | 57 | 1 | 2,250 |
| 96 | 58 | 1 | 2,250 |
| 96 | 59 | 1 | 2,250 |
| 96 | 60 | 1 | 2,250 |
| 96 | 61 | 1 | 2,250 |
| 96 | 62 | 1 | 2,250 |
| 96 | 63 | 1 | 2,250 |
| 96 | 64 | 1 | 2,250 |
| 96 | 65 | 1 | 2,250 |
| 96 | 66 | 1 | 2,250 |

| | | | |
|----|----|---|-------|
| 96 | 67 | 1 | 2,250 |
| 96 | 68 | 1 | 2,250 |
| 96 | 69 | 1 | 2,250 |
| 96 | 70 | 1 | 2,250 |
| 96 | 71 | 1 | 2,250 |
| 96 | 72 | 1 | 2,250 |
| 96 | 73 | 1 | 2,250 |
| 96 | 74 | 1 | 2,250 |
| 96 | 75 | 1 | 2,250 |
| 96 | 76 | 1 | 2,250 |
| 96 | 77 | 1 | 2,250 |
| 96 | 78 | 1 | 2,250 |
| 96 | 79 | 1 | 2,250 |
| 96 | 80 | 1 | 2,250 |
| 96 | 81 | 1 | 2,250 |
| 96 | 82 | 1 | 2,250 |
| 96 | 83 | 1 | 2,250 |
| 96 | 84 | 1 | 2,250 |
| 96 | 85 | 1 | 2,250 |
| 96 | 86 | 1 | 2,250 |
| 96 | 87 | 1 | 2,250 |
| 96 | 88 | 1 | 2,250 |
| 96 | 3 | 0 | 2,250 |
| 96 | 4 | 0 | 2,250 |
| 96 | 5 | 0 | 2,250 |
| 96 | 6 | 0 | 2,250 |
| 96 | 7 | 0 | 2,250 |
| 96 | 8 | 0 | 2,250 |
| 96 | 9 | 0 | 2,250 |
| 96 | 10 | 0 | 2,250 |
| 96 | 11 | 0 | 2,250 |
| 96 | 12 | 0 | 2,250 |
| 96 | 13 | 0 | 2,250 |
| 96 | 14 | 0 | 2,250 |
| 96 | 15 | 0 | 2,250 |
| 96 | 16 | 0 | 2,250 |
| 96 | 17 | 0 | 2,250 |
| 96 | 18 | 0 | 2,250 |
| 96 | 19 | 0 | 2,250 |
| 96 | 20 | 0 | 2,250 |
| 96 | 21 | 0 | 2,250 |

| | | | |
|----|----|----|-------|
| 96 | 22 | 0 | 2,250 |
| 1 | 46 | 5 | 2,250 |
| 1 | 47 | 5 | 2,250 |
| 1 | 48 | 5 | 2,250 |
| 1 | 49 | 5 | 2,250 |
| 1 | 50 | 5 | 2,250 |
| 1 | 51 | 5 | 2,250 |
| 1 | 52 | 5 | 2,250 |
| 1 | 53 | 5 | 2,250 |
| 1 | 54 | 5 | 2,250 |
| 1 | 55 | 5 | 2,250 |
| 1 | 56 | 5 | 2,250 |
| 1 | 57 | 5 | 2,250 |
| 1 | 58 | 5 | 2,250 |
| 1 | 59 | 5 | 2,250 |
| 1 | 60 | 5 | 2,250 |
| 1 | 61 | 5 | 2,250 |
| 1 | 62 | 5 | 2,250 |
| 1 | 63 | 5 | 2,250 |
| 1 | 64 | 5 | 2,250 |
| 1 | 65 | 5 | 2,250 |
| 1 | 66 | 5 | 2,250 |
| 1 | 67 | 5 | 2,250 |
| 1 | 68 | 5 | 2,250 |
| 1 | 69 | 5 | 2,250 |
| 1 | 70 | 5 | 2,250 |
| 1 | 71 | 5 | 2,250 |
| 1 | 72 | 5 | 2,250 |
| 1 | 73 | 5 | 2,250 |
| 1 | 74 | 5 | 2,250 |
| 1 | 75 | 5 | 2,250 |
| 1 | 76 | 5 | 2,250 |
| 1 | 77 | 5 | 2,250 |
| 1 | 78 | 5 | 2,250 |
| 1 | 79 | 5 | 2,250 |
| 1 | 80 | 5 | 2,250 |
| 1 | 81 | 5 | 2,250 |
| 1 | 82 | 10 | 2,250 |
| 1 | 83 | 10 | 2,250 |
| 1 | 84 | 8 | 2,250 |
| 1 | 85 | 8 | 2,250 |

| | | | |
|---|-----|----|-------|
| 1 | 86 | 8 | 2,250 |
| 1 | 87 | 8 | 2,250 |
| 1 | 88 | 8 | 2,250 |
| 1 | 89 | 8 | 2,250 |
| 1 | 90 | 8 | 2,250 |
| 1 | 91 | 8 | 2,250 |
| 1 | 92 | 8 | 2,250 |
| 1 | 93 | 8 | 2,250 |
| 1 | 94 | 8 | 2,250 |
| 1 | 95 | 8 | 2,250 |
| 1 | 96 | 8 | 2,250 |
| 1 | 97 | 8 | 2,250 |
| 1 | 98 | 8 | 2,250 |
| 1 | 99 | 8 | 2,250 |
| 1 | 100 | 8 | 2,250 |
| 1 | 101 | 8 | 2,250 |
| 1 | 102 | 8 | 2,250 |
| 1 | 103 | 8 | 2,250 |
| 1 | 104 | 8 | 2,250 |
| 1 | 105 | 8 | 2,250 |
| 1 | 106 | 8 | 2,250 |
| 1 | 107 | 8 | 2,250 |
| 1 | 108 | 8 | 2,250 |
| 1 | 109 | 8 | 2,250 |
| 1 | 110 | 8 | 2,250 |
| 1 | 111 | 8 | 2,250 |
| 1 | 112 | 8 | 2,250 |
| 1 | 113 | 8 | 2,250 |
| 1 | 114 | 8 | 2,250 |
| 1 | 115 | 8 | 2,250 |
| 1 | 116 | 8 | 2,250 |
| 1 | 117 | 10 | 2,250 |
| 1 | 118 | 10 | 2,250 |
| 1 | 119 | 10 | 2,250 |
| 1 | 120 | 10 | 2,250 |
| 1 | 121 | 10 | 2,250 |
| 1 | 122 | 10 | 2,250 |
| 1 | 123 | 10 | 2,250 |
| 1 | 124 | 10 | 2,250 |
| 1 | 125 | 10 | 2,250 |
| 1 | 126 | 10 | 2,250 |

| | | | |
|---|-----|-------------|-------|
| 1 | 127 | 10 | 2,250 |
| 1 | 128 | 10 | 2,250 |
| 1 | 129 | 15 | 2,250 |
| 1 | 130 | 15 | 2,250 |
| 1 | 131 | <transient> | 8,330 |
| 1 | 24 | 1 | 2,250 |
| 1 | 25 | 5 | 2,250 |
| 1 | 26 | 5 | 2,250 |
| 1 | 27 | 5 | 2,250 |
| 1 | 28 | 5 | 2,250 |
| 1 | 29 | 5 | 2,250 |
| 1 | 30 | 5 | 2,250 |
| 1 | 31 | 5 | 2,250 |
| 1 | 32 | 5 | 2,250 |
| 1 | 33 | 5 | 2,250 |
| 1 | 34 | 5 | 2,250 |
| 1 | 35 | 5 | 2,250 |
| 1 | 36 | 5 | 2,250 |
| 1 | 37 | 5 | 2,250 |
| 1 | 38 | 5 | 2,250 |
| 1 | 39 | 5 | 2,250 |
| 1 | 40 | 5 | 2,250 |
| 1 | 41 | 5 | 2,250 |
| 1 | 42 | 5 | 2,250 |
| 1 | 43 | 5 | 2,250 |
| 1 | 44 | 5 | 2,250 |
| 1 | 45 | 5 | 2,250 |
| 1 | 1 | 1 | 2,250 |
| 1 | 2 | 1 | 2,250 |
| 1 | 3 | 1 | 2,250 |
| 1 | 4 | 1 | 2,250 |
| 1 | 5 | 1 | 2,250 |
| 1 | 6 | 1 | 2,250 |
| 1 | 7 | 1 | 2,250 |
| 1 | 8 | 1 | 2,250 |
| 1 | 9 | 1 | 2,250 |
| 1 | 10 | 1 | 2,250 |
| 1 | 11 | 1 | 2,250 |
| 1 | 12 | 1 | 2,250 |
| 1 | 13 | 1 | 2,250 |
| 1 | 14 | 1 | 2,250 |

| | | | |
|----|-----|-------------|-------|
| 1 | 132 | <transient> | 8,330 |
| 1 | 133 | <transient> | 8,330 |
| 1 | 134 | <transient> | 8,330 |
| 2 | 134 | 24 | 8,330 |
| 2 | 135 | 24 | 8,330 |
| 2 | 136 | 24 | 8,330 |
| 3 | 136 | 24 | 8,330 |
| 3 | 137 | 24 | 8,330 |
| 4 | 137 | 24 | 8,330 |
| 4 | 138 | 24 | 8,330 |
| 4 | 139 | 24 | 8,330 |
| 5 | 139 | 20 | 8,330 |
| 5 | 140 | 20 | 8,330 |
| 5 | 141 | 20 | 8,330 |
| 6 | 141 | 20 | 8,330 |
| 6 | 142 | 20 | 8,330 |
| 7 | 142 | 20 | 8,330 |
| 7 | 143 | 20 | 8,330 |
| 7 | 144 | 20 | 8,330 |
| 8 | 144 | 20 | 8,330 |
| 8 | 145 | 20 | 8,330 |
| 8 | 146 | 20 | 8,330 |
| 9 | 146 | 20 | 8,330 |
| 9 | 147 | <transient> | 8,330 |
| 9 | 148 | <transient> | 8,330 |
| 10 | 148 | <transient> | 8,330 |
| 10 | 149 | <transient> | 8,330 |
| 10 | 150 | <transient> | 8,330 |
| 11 | 150 | <transient> | 8,330 |
| 11 | 151 | <transient> | 8,330 |
| 11 | 152 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 152 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 153 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 154 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 155 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 156 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 157 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 158 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 159 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 160 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 161 | <transient> | 8,330 |

| | | | |
|----|-----|-------------|-------|
| 12 | 162 | <transient> | 8,330 |
| 12 | 163 | <transient> | 8,330 |
| 13 | 163 | <transient> | 8,330 |
| 13 | 164 | <transient> | 8,330 |
| 14 | 164 | <transient> | 8,330 |
| 14 | 165 | <transient> | 8,330 |
| 15 | 165 | <transient> | 8,330 |
| 16 | 165 | <transient> | 8,330 |
| 16 | 166 | <transient> | 8,330 |
| 17 | 166 | <transient> | 8,330 |
| 17 | 167 | <transient> | 8,330 |
| 18 | 167 | <transient> | 8,330 |
| 18 | 168 | <transient> | 8,330 |
| 19 | 168 | <transient> | 8,330 |
| 19 | 169 | <transient> | 8,330 |
| 19 | 170 | <transient> | 8,330 |
| 20 | 170 | <transient> | 8,330 |
| 20 | 172 | 36 | 8,330 |

Anexo 8. Descripción del reservorio de agua

| DESCRIPCION DEL CONCEPTO | UNID. | VOL. | P.U. | IMPORTE |
|--|----------------|------|-----------|----------------------------------|
| Excavación a mano en material tipo "b", hasta una profundidad máxima de 150 cm., medidas en líneas de proyecto. Incluye: acarreo libre del material sobrante hasta 20 m. | m ³ | 0.64 | \$ 289.19 | \$ 185.08 MXN. (9.25 US dólares) |