



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Implicaciones de la Variabilidad  
Climática en el Acuífero Buenos  
Aires, Monterrey, N.L.**

**TESINA**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geóloga**

**P R E S E N T A**

Clara Elena Tello Soto

**DIRECTOR DE TESINA**

Dr. Saúl Arciniega Esparza



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**

**Tesis Digitales**

**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**

**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Con el más profundo respeto y gratitud, agradezco al Dr. Saúl Arciniega Esparza, mi director de tesis, por su invaluable apoyo durante mi formación investigativa. Su paciencia, comprensión y experiencia fueron determinantes para avanzar en este desafiante camino. Su confianza en mis habilidades me motivó a alcanzar metas inesperadas, y no encuentro palabras suficientes para manifestar mi gratitud por su constante guía.

A mis padres, les debo todo por el amor incondicional y la fortaleza que me brindaron en cada paso de este proceso. Su fe inquebrantable en mí me permitió superar los desafíos más grandes. De igual manera, agradezco a mis amigos, quienes siempre estuvieron dispuestos a escuchar y acompañarme.

Finalmente, mi reconocimiento y gratitud a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Centro del Agua del Tecnológico de Monterrey con el apoyo del Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco y la Mtra. Roxana Fonseca. Por haberme brindado la oportunidad de avanzar en mi carrera profesional, cuyo apoyo incondicional y confianza resultaron imprescindibles para la finalización de esta tesina.

## Resumen:

La crisis hídrica que el estado de Nuevo León está pasando es muy clara por la falta de conocimiento previo para mejorar la gestión de este. Por ello se analizará la influencia de la variabilidad climática en el acuífero de Buenos Aires, Monterrey, con el fin de evaluar los efectos en la disponibilidad y percolación de este.

El acuífero está al oeste de Nuevo León, México. Pertenecce a la región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo, con una veda tipo II y una recarga anual promedio de 57 millones de m<sup>3</sup> con un déficit de más de 5 millones de m<sup>3</sup>. Geológicamente, está formado por rocas mesozoicas sobre un basamento paleozoico, y su geología estructural se relaciona con la Sierra Madre Oriental. Las actividades económicas principales son la agricultura y el turismo con el Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

La metodología utilizada incluye: 1) recopilación de datos hidrogeológicos y climatológicos (precipitación, temperatura, etc.) con diversas bases de datos como GRACE y otras dadas por el Centro del Agua del Tecnológico de Monterrey, 2) análisis de series temporales, y 3) un modelo de balance de agua usando LuMod para estimar la percolación, calibrado con datos de caudales, de precipitación y temperaturas.

Los resultados obtenidos fueron: No existe una correlación directa entre la precipitación y el abastecimiento de agua subterránea, aunque tras lluvias extremas, como los huracanes entre 2010 y 2014, el almacenamiento aumenta. Desde 2016, las pérdidas anuales en volumen de agua tienen una tendencia de -1.36 mm/año y en el abastecimiento de -1.9 hm<sup>3</sup>/año. La simulación hidrológica mostró una relación entre precipitación y percolación del 0.15%, está asociada con la geología local y sigue un patrón en el caudal desde septiembre a noviembre y de percolación de julio a marzo, en línea con el clima regional.

## Abstract:

At the present time, the water crisis in the state of Nuevo León is evident, partly due to the lack of previous knowledge to improve water management. For that reason, this study will analyze the influence of climate variability on the Buenos Aires aquifer in Monterrey, with the objective of evaluating its effects on water availability and percolation.

The aquifer is located west of Nuevo León, Mexico. It belongs to Hydrological-Administrative Region VI Río Bravo, with a type II closure and an average annual recharge of 57 million m<sup>3</sup> with a deficit of more than 5 million m<sup>3</sup>. It is formed geologically by Mesozoic rocks on a Paleozoic basement, and its structural geology is related to the Sierra Madre Oriental. The principal economic activities are agriculture and tourism with the Parque Nacional Cumbres de Monterrey.

The methodology used includes: 1) compilation of hydrogeological and climatological data (precipitation, temperature, etc.) with various databases such as GRACE and others provided by the Water Center of the Tecnológico de Monterrey, 2) time series analysis, and 3) a water balance model using LuMod to estimate percolation, calibrated with flow, precipitation and temperature data.

The results obtained were: There is no direct correlation between precipitation and groundwater storage, although after extreme rains, such as the hurricanes of 2010 and 2014, storage increases. Since 2016, annual loss in water volume has a trend of -1.36 mm/year and in supply of -1.9 hm<sup>3</sup>/year. The hydrological simulation showed a relationship between precipitation and percolation of 0.15%, it is associated with the local geology and shows a pattern in flow from September to November and percolation from July to March, in line with the regional climate.

# Contenido

|                                                                          |           |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>                                            | <b>6</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>                                           | <b>6</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>                                             | <b>8</b>  |
| <b>2. CONCEPTOS PREVIOS.....</b>                                         | <b>9</b>  |
| <b>3. DESCRIPCIÓN DEL ACUÍFERO BUENOS AIRES, N.L. ....</b>               | <b>16</b> |
| 3.1. GEOLOGÍA.....                                                       | 19        |
| 3.2. ESTRATIGRAFÍA .....                                                 | 20        |
| 3.2.1. <i>Serie Sabinense</i> .....                                      | 20        |
| 3.2.2. <i>Series Coahuila y Comanche</i> .....                           | 20        |
| 3.2.3. <i>Serie del Golfo</i> .....                                      | 21        |
| 3.2.4. <i>Depósitos sedimentarios</i> .....                              | 22        |
| 3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....                                           | 22        |
| 3.4. GEOLOGÍA DEL SUBSUELO .....                                         | 23        |
| 3.5. EDAFOLOGÍA Y USO DE SUELO.....                                      | 23        |
| 3.6. CLIMA.....                                                          | 26        |
| 3.7. ACTIVIDADES ECONÓMICAS .....                                        | 26        |
| <b>4. METODOLOGÍA.....</b>                                               | <b>28</b> |
| 4.1. RECOPIACIÓN DE DATOS HIDROLÓGICOS Y CLIMATOLÓGICOS.....             | 29        |
| 4.2. ANÁLISIS DE LAS SERIES DE TIEMPO.....                               | 32        |
| 4.3. MODELO DE BALANCE DE AGUA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PERCOLACIÓN..... | 32        |
| <b>5. RESULTADOS .....</b>                                               | <b>35</b> |
| <b>6. CONCLUSIONES .....</b>                                             | <b>41</b> |
| <b>7. REFERENCIAS.....</b>                                               | <b>42</b> |
| <b>8. ANEXO .....</b>                                                    | <b>49</b> |

## Índice de Tablas

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Índice de disponibilidad del Acuífero Buenos Aires, NL.....                                                                    | 17 |
| Tabla 2. Localización, su situación administrativa y características hidrográficas e hidrogeológicas del Acuífero Buenos Aires, NL..... | 17 |
| Tabla 3. Características de recarga del Acuífero Buenos Aires, NL 2007-2024.....                                                        | 18 |
| Tabla 4. Volumen concesionado desglosado por uso 2008-2011.....                                                                         | 26 |
| Tabla 5. Características generales del conjunto de datos del DAYMET y ERA5 Ag.....                                                      | 29 |
| Tabla 6. Estaciones meteorológicas del Acuífero Buenos Aires N.L. ....                                                                  | 31 |
| Tabla 7. Datos de salida del modelo MILC.....                                                                                           | 34 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Figura 1. A) Regiones Hidrológicas B) Disponibilidad de Acuíferos. Elaboración Propia. Fuente: CONAGUA, 2024 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 11 |
| Figura 2. Representación del satélite GRACE y los satélites gemelos GRACE-FO.1) Cuando las naves están sobre el océano, la distancia entre ellas es casi constante. 2) Cuando la nave líder (N1) toca tierra, la gravedad provoca que se desplace mayor medida en referencia de la nave que la sigue (N2), que todavía está sobre el agua. 3) Una vez que N2 también toca tierra, de igual manera es atraído hacia la montaña o masa y, en consecuencia, hacia N1. A medida que N1 se aleja de la masa, es retrocede ligeramente hacia atrás por la gravedad de la tierra. 4) Cuando ambas naves espaciales vuelven a estar sobre el agua, N2 es frenada, antes de regresar a su distancia original detrás de N1. Fuente: (NASA, 2018)..... | 14 |
| Figura 3. Ciclo Hídrico, Interpretación propia. Fuentes: Ministerio de agricultura pesca y alimentación, 2003; Ramírez, 2013.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 15 |
| Figura 4. Mapa de localización de los acuíferos concesionados. Fuente: INEGI .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 16 |
| Figura 5. Mapa geológico del Acuífero Buenos Aires, NL. Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I INEGI. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 19 |
| Figura 6. A) Columna estratigráfica del noreste de México B) Columna estratigráfica Acuífero Buenos Aires. Fuente: Aguirre Reyes, 1984; Amezcua, 2006; Basáñez & Amezcua, 2004; Garza Ramírez & López Palomino, 2009; Juárez Arriaga, 2010; López Palomino, 2016; Monier A & López Palomino I, 2011; Piña Arce & López Palomino, 2007; Ramírez Garza & López Palomino, 2009; Remigio Morales & López Palomino, 2013; Sáenza Pita & López Palomino, 2010. ....                                                                                                                                                                                                                                                                               | 24 |
| Figura 7. A) Mapa Edafológico del Acuífero Buenos Aires, NL. B) Mapa de uso de suelo del acuífero Buenos Aires, N.L. Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie VII, INEGI.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 25 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Figura 8. Mapa de ubicación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey con respecto a el acuífero Buenos Aires. Fuente: Áreas Naturales Protegidas Federales de México, enero 2024, CONABIO y CONANP. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                    | <i>27</i> |
| <i>Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología utilizada. Elaboración propia.....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <i>28</i> |
| <i>Figura 10. Polígono de Thiessen que abarca las estaciones meteorológicas del acuífero Buenos Aires N.L. Fuente: CONAGUA &amp; Secretaria de Gobierno de México, 2020.....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                   | <i>31</i> |
| <i>Figura 11. Escalamiento espacial de modelos a nivel de subcuenca. I) Modelos agrupados, II) Modelos semidistribuidos, III) Modelos completamente distribuidos: Los parámetros se asignan individualmente a cada celda de la cuadrícula. Fuente Shekhar Prasad et al., 2015.....</i>                                                                                                                                                             | <i>33</i> |
| <i>Figura 12. A) Serie de tiempo de abastecimiento y precipitación mensual del Acuífero Buenos Aires N.L. B) Serie de tiempo de abastecimiento y TWSa del Acuífero Buenos Aires N.L. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                      | <i>35</i> |
| <i>Figura 13. Comparación de la simulación Monte Carlo con los datos observados de gasto de la estación hidrométrica Cadereyta del Acuífero Buenos Aires N.L. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                             | <i>36</i> |
| <i>Figura 14. Diferencia consecutiva del almacenamiento del acuífero Buenos Aires N.L. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <i>36</i> |
| <i>Figura 15. Líneas de tendencia. A) Línea de tendencia y media anual del abastecimiento del Acuífero Buenos Aires N.L. Con una media anual de 29830.23 mm/año B) Línea de tendencia del TWSa del Acuífero Buenos Aires N.L. La línea de TWSa suavizado (smooth) representa al acuífero ya que elimina los picos que se deben a cambios de humedad y superficiales. ....</i>                                                                      | <i>37</i> |
| <i>Figura 16. Población de Nuevo León de 1990 a 2015 con estimación a 2030. Fuente:INEGI, 2020. ....</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <i>38</i> |
| <i>Figura 17. Resultados del Modelo: A) Diagrama de dispersión Anual de la Precipitación y Percolación (mm) obtenido de los resultados del modelo MILC, del acuífero Buenos Aires N.L. B) Comparación de: precipitación, evapotranspiración, percolación, y escurrimiento anual del acuífero Buenos Aires N.L D) Distribución de la percolación (mm/mes) con Media: 8.8, Desviación estándar: 9.3, Mediana: 6.14 y con un sesgo positivo. ....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 18. Resultados variabilidad: A) Variabilidad de la percolación resultado del modelo del acuífero Buenos Aires N.L. B) Variabilidad del caudal resultado del modelado del acuífero Buenos Aires N.L.....</i>                                                                                                                                                                                                                              | <i>40</i> |

# 1. Introducción

El "cambio climático" se puede definir como una alteración del clima atribuida a la actividad humana, que se suma a la variabilidad natural del clima (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1997). Considerado un fenómeno identificable y persistente en el clima, observable mediante análisis estadísticos, con duraciones de más de una década; analizando cualquier cambio espacial y/o temporal de variables hidroclimatológicas como la temperatura, precipitación, entre otras (Miller Jr., 2007). Estos cambios temporales a largo plazo del clima representan uno de los desafíos más significativos para el desarrollo humano de nuestra generación, amenazando los esfuerzos internacionales para combatir la pobreza (Watkins, 2007).

Por otro lado, la variabilidad climática, asociada a las variaciones interanuales naturales del clima en una región, pueden favorecer o limitar la disponibilidad de agua en una región a corto o mediano plazo. Las alteraciones de la variabilidad climática por efecto del cambio climático pueden llegar a afectar la distribución del agua disponible, la cual representa retos en el diseño y operación de estructuras para el aprovechamiento de recursos. Además, otros parámetros como la calidad del agua pueden verse igualmente afectados por las variaciones climatológicas a largo plazo; ya que al reducirse la disponibilidad natural del agua se estima que la cantidad de esta puede empeorar, modificando su uso consuntivo, ya sea para riego, suministro doméstico o industrial (Organización de los Estados Americanos, 1974).

Una de las variables que puede llegar a ser más sensible a la variabilidad climática y que puede afectar a la disponibilidad de agua subterránea, es la recarga de los acuíferos (Ndehedehe et al., 2023). El proceso de recarga del agua subterránea, a diferencia del agua superficial, está influenciado anualmente por las variables climáticas. Se considera un proceso lento y dependiente de las fluctuaciones climáticas transitorias. Por ello, el cambio climático provoca variaciones bruscas de temperatura, disminución de la precipitación y aumento de la evapotranspiración, lo que incrementa el riesgo de sequías. A su vez, estos factores impactan el sistema hidrogeológico, del cual depende la recarga de agua subterránea (Sheffield et al., 2018; Wilderer et al., 2011).

La falta de datos y registros hidroclimatológicos en distintas regiones del mundo, como en el caso de México, limitan el análisis de los efectos de la variabilidad climática y del cambio climático en la disponibilidad de agua (OMM, 2001). No obstante, los avances en tecnologías satelitales en las últimas décadas han permitido monitorear de manera continua en el tiempo y espacio una gran cantidad de procesos hidrológicos y climatológicos en la superficie terrestre (Sheffield et al., 2018; Wilderer et al., 2011), permitiendo la aplicación de métodos y modelos más sofisticados de los que se podrían realizar sólo con estaciones en tierra.

La zona Metropolitana de Monterrey es abastecida de agua superficial y subterránea, en el caso de la subterránea cuenta con 4 acuíferos, de los cuales se analizará el acuífero Buenos Aires, situado al oeste de Nuevo León, México, siendo el de mayor aporte de abastecimiento a la zona. Se modelará la sensibilidad de la recarga del acuífero ante la variabilidad climática para conocer cómo el cambio climático podría afectar en un futuro la disponibilidad del acuífero; así como, el caudal de los ríos de acuerdo con escenarios posteriores y previstos del cambio climático en la región.

## 2. Conceptos previos

El agua subterránea representa la mayor fuente de agua dulce terrestre en el planeta y se encuentra almacenada en el subsuelo, en formaciones geológicas que se clasifican como: acuífero, acuitardos, acuicludos y acuífugos. Todos ellos son a su vez son subdivididos de forma subjetiva (ya que depende de la escala y los objetivos del proyecto) en unidades geológicas, las cuales por sus características (entradas, salidas y balance) en sus formaciones geológicas se consideran de una única formación (Sánchez San Roman, 1993).

Un acuífero se caracteriza por una alta permeabilidad que permite la retención del agua en cantidades suficientes para su posterior extracción en beneficio del hombre (Dávila Burga, 2011). Los acuíferos se clasifican según Fuentes Yagüe en 1992:

1. El Material Constituyente:
  - a. Porosos: Caracterizados por materiales como arenas y gravas (materiales no consolidados). El agua se encuentra fluyendo por los espacios entre partículas.

- b. Fisurados: En este tipo de acuífero el agua circula por las fisuras y/o grietas que tiene la roca (material consolidado). Algunos tipos de rocas (como las carbonatadas) con características solubles forman conductos de gran tamaño, lo que se conoce como karstificación. Por el contrario, si no tienen dicha característica actúa la meteorización, aunque las fisuras son más superficiales.
  - c. Porosos y fisurados: Combinación de los anteriores, materiales.
2. El Grado de Presión:
- a. Libres: Sobre ellos actúa solamente la presión atmosférica y presentan mayor interacción con el agua superficial. Una característica es que el nivel freático medido mediante un sondeo es el mismo que el espesor saturado del acuífero.
  - b. Confinados: Este se encuentra confinado por dos capas impermeables (una debajo y otra encima), por lo cual se encuentra a una presión mayor a la atmosférica. El nivel del agua una vez perforado el acuífero sobrepasa el espesor saturado, generando un nivel de presión conocido como piezométrico. Este nivel piezométrico puede alcanzar grandes elevaciones dependiendo la presión a la que se encuentre el acuífero, siendo que en ocasiones el nivel piezométrico se puede encontrar encima del nivel del terreno, generando pozos artesianos o surgentes.
  - c. Semiconfinados: En la parte superior del acuífero se tiene una capa semipermeable, lo que da como consecuencia que se tenga una combinación de los dos tipos de acuíferos mencionados anteriormente.

El *acuicludo* es una formación geológica que contiene una cantidad significativa de agua y no permite que esta circule a través de su estructura, como son los limos y arcillas. Un *acuitardo* de igual manera contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula con mayor dificultad. Y por último el *acuifugo* no contiene agua porque no permite que circule a través de ella (Sánchez San Roman, 1993).

México está dividido en Regiones Hidrológicas (Figura 1a). Las cuales son zonas geográficas definidas por sus características de forma del terreno, relieve y su sistema de agua. Sus límites son diferentes a los límites políticos. Existen 37 regiones hidrológicas, determinadas a partir de las grandes divisorias de aguas superficiales del país. Cada una de estas regiones contiene al

menos una cuenca hidrográfica, y ninguna cuenca hidrográfica se encuentra en más de una región hidrológica (SEMARNAT, 2010).

Por otro lado, México está dividido en 653 acuíferos (Figura 1b) de carácter administrativo que corresponden a áreas específicas con características geológicas similares, de los cuales 101 están sobreexplotados y 17 presentan problemas de salinización. Estas unidades administrativas de agua subterránea pueden extenderse a lo largo de varias entidades federativas, sin coincidir necesariamente con las fronteras políticas (SEMARNAT, 2012).

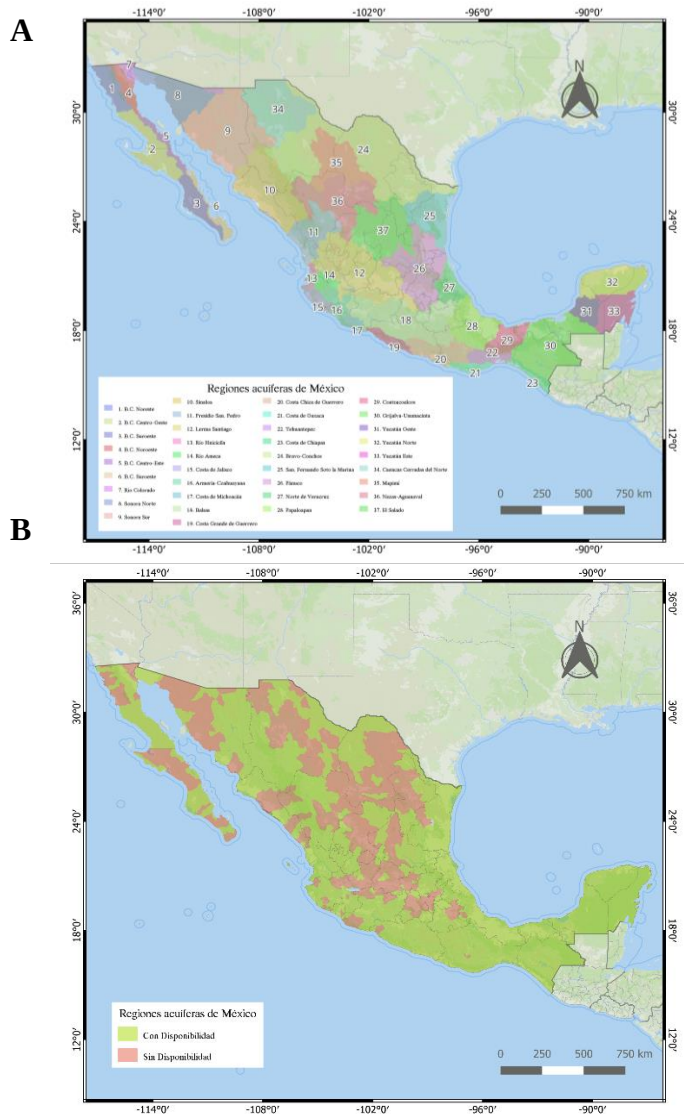


Figura 1. Figura 1. A) Regiones Hidrológicas B) Disponibilidad de Acuíferos. Elaboración Propia. Fuente: CONAGUA, 2024

El agua subterránea es gestionada a escala de acuífero administrativo, en donde los diferentes usuarios del agua deben solicitar sus títulos de concesión a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para el aprovechamiento y/o descarga del agua superficial y subterránea. Las concesiones son documentos emitidos por CONAGUA que permiten a personas físicas o jurídicas utilizar el agua de ríos, lagos, presas, pozos o norias. Un título de asignación se concede exclusivamente a municipios, estados o al gobierno de la Ciudad de México para proporcionar servicio de agua potable a centros de población y asentamientos humanos mediante una red de distribución (Comisión Nacional del Agua, 2016).

Para el cálculo de la Disponibilidad Media Anual (DMA); la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento requieren que la CONAGUA publique la Disponibilidad Media Anual de las Aguas Nacionales. Para las aguas subterráneas, con la "NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015", la cual establece que el cálculo del DMA debe incluir un balance de aguas subterráneas, considerando la recarga (R), la descarga natural comprometida (DNC), y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS), entre otros volúmenes de carácter administrativo. Según la siguiente fórmula (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015):

*Ecuación 1. Disponibilidad Media Anual*

$$DMA = R - DNC - VEAS$$

Describiendo más detalladamente dichos conceptos:

1. Disponibilidad Media Anual de Agua Subterránea (DMA): Es el promedio anual de agua subterránea que puede extraerse de un acuífero sin perjudicar los ecosistemas, siempre que este valor sea positivo. Incluye usos adicionales a los ya autorizados y la descarga natural comprometida. Un valor negativo indica un déficit.
2. Descarga Natural Comprometida (DNC): Representa una parte de la descarga natural de un acuífero. Se calcula sumando los volúmenes de agua autorizados de manantiales y ríos alimentados por el acuífero, así como las descargas necesarias para mantener otros acuíferos y prevenir la entrada de agua de mala calidad.

3. Recarga Media Anual (R): Es el volumen de agua que un acuífero recibe anualmente, obtenido dividiendo la recarga total deducida del balance de aguas subterráneas entre el número de años considerado.
4. Volumen de Extracción de Aguas Subterráneas (VEAS): Se obtiene sumando los volúmenes anuales de agua asignados o autorizados por la Comisión, registrados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), y aquellos en proceso de registro y titulación. En zonas de libre alumbramiento, la extracción se basa en estudios técnicos y estimaciones de volúmenes extraídos. Los volúmenes registrados en el Registro Nacional Permanente no se contabilizan a menos que se demuestre su extracción física.

Para el análisis de la variabilidad climática uno de los parámetros en el que se enfoca este trabajo es la *precipitación pluvial*, que puede manifestarse como lluvia, nieve o granizo (Dávila Burga, 2011). La precipitación es una variable clave en el ciclo hidrológico (Ordoñez Gálvez, 2011) siendo un proceso en el que comienza con las partículas de vapor de agua (contenidas en las nubes), y al momento de tener una disminución de la temperatura alcanzan un tamaño determinado que permite la precipitación (Ruiz Romera & Martínez Santos, 2019).

Para el análisis de la variación del almacenamiento de agua subterránea en el acuífero se suelen utilizar datos de niveles de pozos, sin embargo, debido a la falta de información se emplearon datos satelitales (Figura 2) de la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) de la NASA, la cual permite obtener las anomalías de almacenamiento terrestre de agua (TWSa, por sus siglas en inglés) a partir del espesor de agua equivalente, referidos a las variaciones de gravedad terrestre causadas por cambios en la masa de agua. TWSa de GRACE representa la acumulación de todos los almacenamientos de agua terrestre (Barrera et al., 2020), dados por:

*Ecuación 2. Anomalías de Almacenamiento Terrestre*

$$TWS = SN + SW + SM + GW$$

- SN: almacenamiento de nieve.
- SW: almacenamiento de agua superficial.
- SM: almacenamiento de humedad en el subsuelo.
- GW: almacenamiento de agua subterránea.

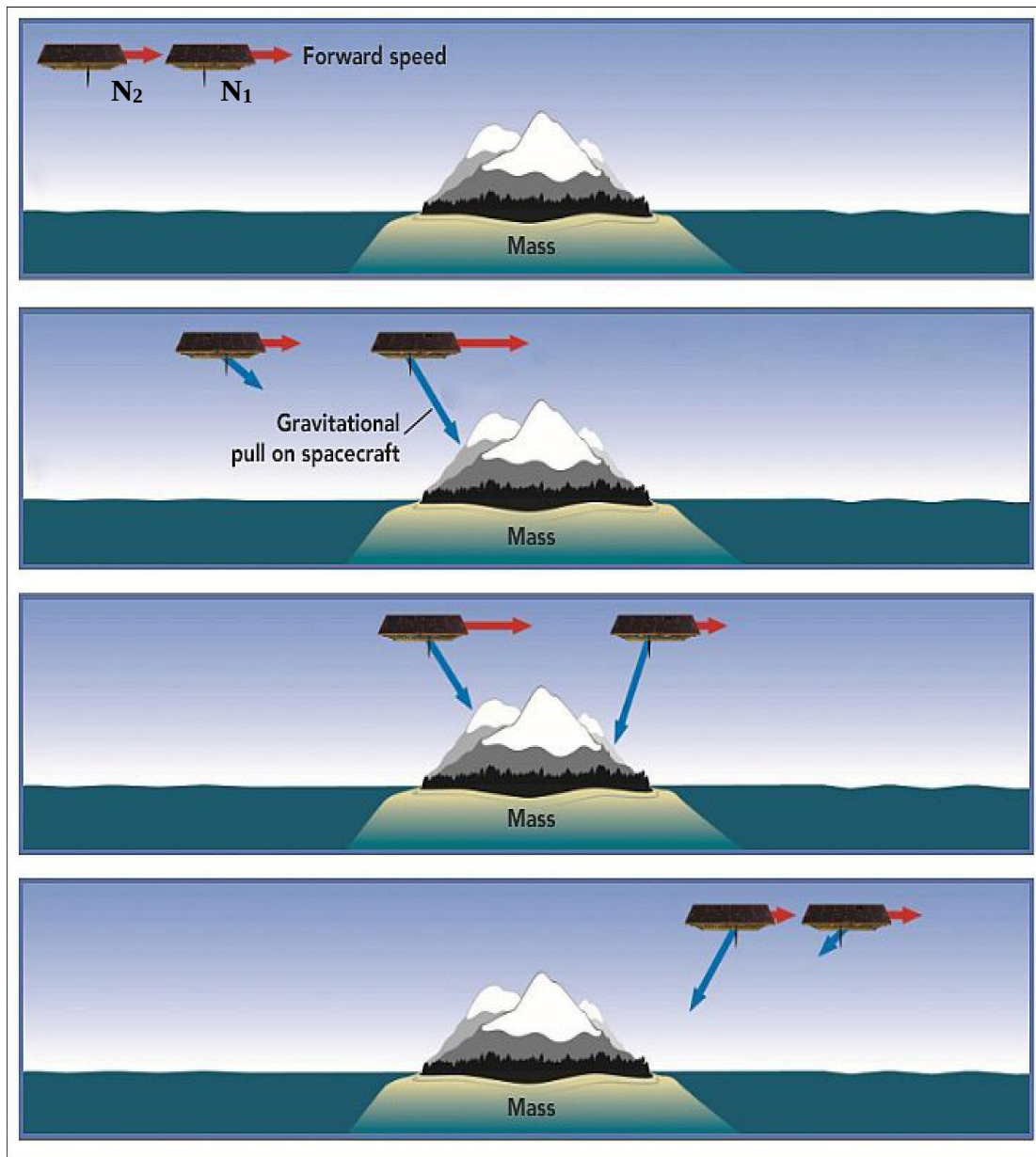


Figura 2. Representación del satélite GRACE y los satélites gemelos GRACE-FO.1) Cuando las naves están sobre el océano, la distancia entre ellas es casi constante. 2) Cuando la nave líder (N1) toca tierra, la gravedad provoca que se desplace mayor medida en referencia de la nave que la sigue (N2), que todavía está sobre el agua. 3) Una vez que N2 también toca tierra, de igual manera es atraído hacia la montaña o masa y, en consecuencia, hacia N1. A medida que N1 se aleja de la masa, es retrocede ligeramente hacia atrás por la gravedad de la tierra. 4) Cuando ambas naves espaciales vuelven a estar sobre el agua, N2 es frenada, antes de regresar a su distancia original detrás de N1. Fuente: (NASA, 2018)

De manera general, podemos referirnos al balance de agua (Figura 3), como la relación entre la cantidad de agua que entra en el suelo (precipitación, riego, rocío y el ascenso por capilaridad), junto con el agua que se pierde en la zona del suelo (evapotranspiración, escorrentía y percolación profunda) (Ministerio de agricultura pesca y alimentación, 2003).

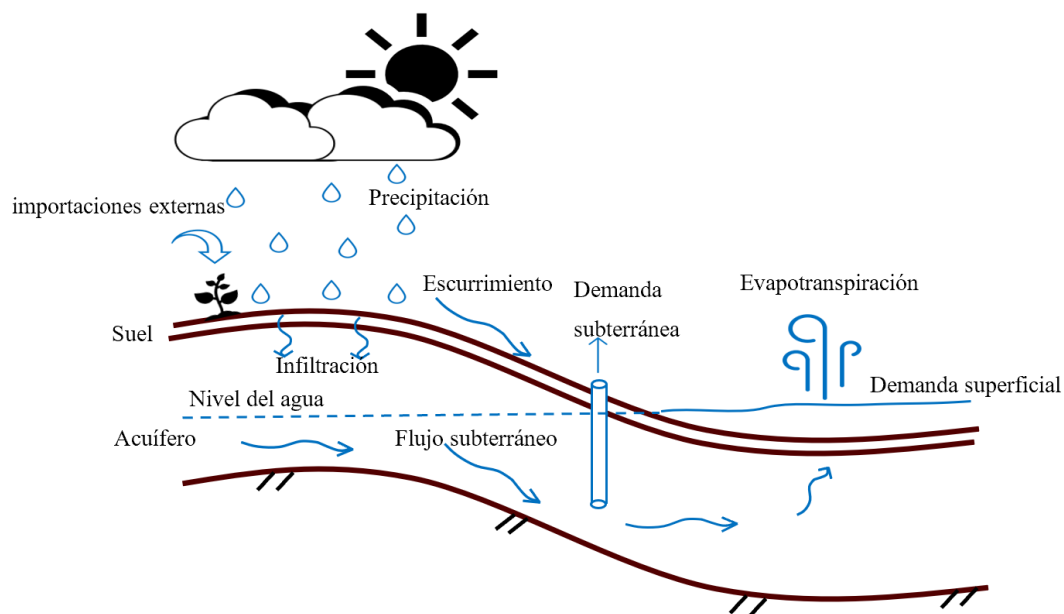


Figura 3. Ciclo Hídrico, Interpretación propia. Fuentes: Ministerio de agricultura pesca y alimentación, 2003; Ramírez, 2013

### 3. Descripción del Acuífero Buenos Aires, N.L.

El acuífero Campo Buenos Aires con la clave 1907, se localiza al oeste del estado de Nuevo León, con una superficie aproximada de 916 km<sup>2</sup> (Figura 4). Hacia el norte colinda con el acuífero Campo Durazno, al noreste con Área Metropolitana de Monterrey, al este con Cañón del Huajuco, al sureste con Citrícola Norte, al suroeste con Región Manzanera-Zapalanímé y al noroeste con Saltillo Ramos Arizpe dentro del complejo montañoso de la Sierra Madre Oriental (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024).

Se localiza en la región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo y tiene veda tipo II publicado el 17 de julio de 1951 en el DOF (Luege Tamargo, 2011a), lo que significa que, salvo para usos domésticos, no se podrán realizar nuevos alumbramientos de aguas subterráneas. Según la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2024, el acuífero está clasificado como una zona de disponibilidad 1 (Tabla 1). Las características generales del acuífero se pueden consultar en la Tabla 2, mientras que la información de la disponibilidad media anual se muestra en la Tabla 3.

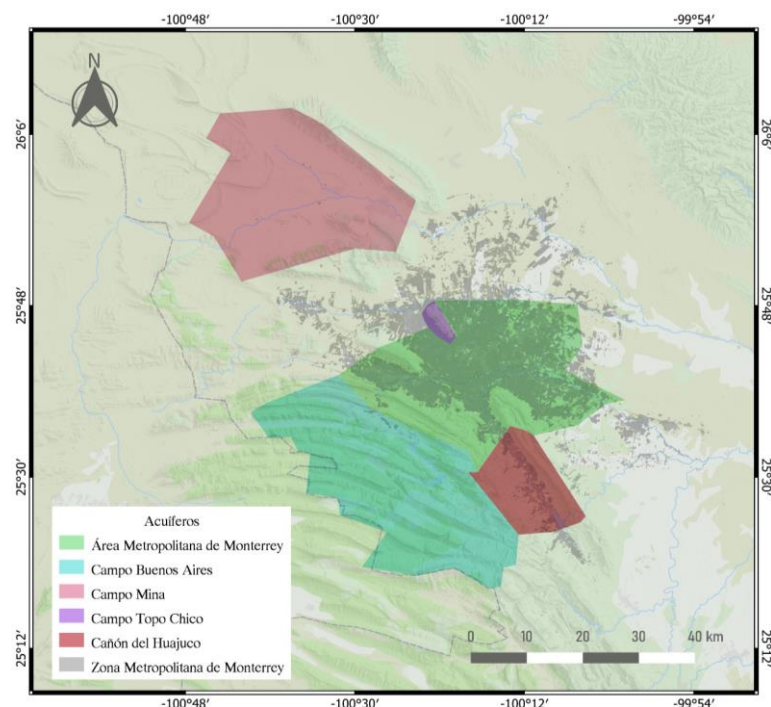


Figura 4. Mapa de localización de los acuíferos concesionados. Fuente: INEGI

Tabla 1. Índice de disponibilidad del Acuífero Buenos Aires, NL.

| Año       | Índice de disponibilidad (Idas) | Zona de disponibilidad |
|-----------|---------------------------------|------------------------|
| 2019 2020 | -0.1018                         | 1                      |
| 2021-2022 | -0.1017                         |                        |

Fuente: Jiménez Cisneros, 2019, 2020; Martínez Santoyo, 2022

Tabla 2. Localización, su situación administrativa y características hidrográficas e hidrogeológicas del Acuífero Buenos Aires, NL.

|                                          |                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Clave</b>                             | 1907                                                                                                                                                                                         |
| <b>Acuífero</b>                          | Buenos Aires                                                                                                                                                                                 |
| <b>Localización</b>                      | Al Oeste de Nuevo León, en la Sierra Madre Oriental                                                                                                                                          |
|                                          | Paralelos: 25° 18' y 25° 41 latitud norte                                                                                                                                                    |
|                                          | Meridianos: 100° 12' y 100° 42' de longitud oeste                                                                                                                                            |
| <b>Superficie</b>                        | 916.45 km <sup>2</sup>                                                                                                                                                                       |
| <b>Municipios</b>                        | Santa Catarina y Santiago                                                                                                                                                                    |
| <b>Región Hidrogeológica</b>             | 24 Río Bravo                                                                                                                                                                                 |
| <b>Subregión</b>                         | Bajo Río Bravo, Cuenca del Río San Juan                                                                                                                                                      |
| <b>Subcuenca</b>                         | Río Santa Catarina                                                                                                                                                                           |
| <b>Unidades Acuíferas</b>                | 1. K-Cal: Cañón de la Huasteca, 22 pozos<br>2. Al-GrAr: Río Catarina, Galerías Huasteca y Morteros, pozos someros.<br>3. J-Cal: pozos número 25, 28, 33 y 39, cotas de brocal 721 a 747 msnm |
| <b>Precipitación media anual</b>         | 368.8 mm (Huasteca) y 607.4 mm (Agua Blanca), Promedio de 420 mm                                                                                                                             |
| <b>Temperatura media anual</b>           | 13.8 °C (Agua Blanca)                                                                                                                                                                        |
|                                          | 20.5 °C (Las Comitas).                                                                                                                                                                       |
| <b>Evaporación potencial media anual</b> | 1846 mm (Estación Huasteca)                                                                                                                                                                  |
| <b>Transmisividad</b>                    | 1.8 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s (155 m <sup>2</sup> /día).                                                                                                                          |
| <b>Veda Volumen concesionado</b>         | Tipo II                                                                                                                                                                                      |
|                                          | 62.67 hm <sup>2</sup>                                                                                                                                                                        |

Fuente: Jiménez Cisneros, 2020; Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015

Tabla 3. Características de recarga del Acuífero Buenos Aires, NL 2007-2024.

| Año                                          | R    | DNC | VCAS      | VEXTET | DAS | VPRH         | DÉFICIT   | Disponibilidad |
|----------------------------------------------|------|-----|-----------|--------|-----|--------------|-----------|----------------|
| cifras en millones de metros cúbicos anuales |      |     |           |        |     |              |           |                |
| 2007 <sup>1</sup>                            | 57   | 0   | 62.714291 | 62.4   | 0   | 0            | -5.714291 | 3 y 6          |
| 2009 <sup>1</sup>                            | 57   | 0   | 62.715155 | 62.4   | 0   | 0            | -5.715155 |                |
| 2011 <sup>1</sup>                            | 57.4 | 0   | 62.715155 | 0      | 0   | 0            | -5.715155 |                |
| 2013 <sup>1</sup>                            | 57   | 0   | 62.716255 | 62.4   | 0   | 0            | -5.716255 |                |
| 2015 <sup>2</sup>                            | 57.4 | 0   | 62.715155 | 0      | 0   | 0            | -5.715155 |                |
| 2018 <sup>2</sup>                            | 57   | 0   | 62.8004   | 0      | 0   | 0            | -5.8004   |                |
| 2023 <sup>2</sup>                            | 57   | 0   | 62.83089  | 0      | 0   | 0.0768<br>69 | -5.907758 | 1              |
| 2024 <sup>2</sup>                            | 57   | 0   | 62.907758 | 0      | 0   | 0            | -5.907758 |                |

R: recarga total media anual; DNC: descarga natural comprometida; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEXTET: volumen de extracción de agua subterránea consignado en estudios técnicos; DAS: disponibilidad media anual de agua subterránea; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica. 1) La NOM011-2000 está en cumplimiento. 2) La NOM011-2015 está en cumplimiento. Fuentes: Guerra Abud, 2015; Jaquez, 2002; Korenfeld Fedrman David, 2013; Luege Tamargo, 2007, 2009, 2011a, 2011b; Martínez Santoyo, 2022, 2023; Ramírez de la Parra, 2018; Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024

### 3.1. Geología

El acuífero está constituido por rocas sedimentarias mesozoicas y evolucionaron sobre un basamento paleozoico-precámbrico (Figura 5), las cuales podemos dividir en 3 grupos (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024):

- Depósitos marinos calcáreos del Jurásico Superior-Cretácico Superior: Sierras.
- Depósitos clásticos del Paleoceno: Valles.
- Depósitos continentales del Cuaternario: Abanicos aluviales.

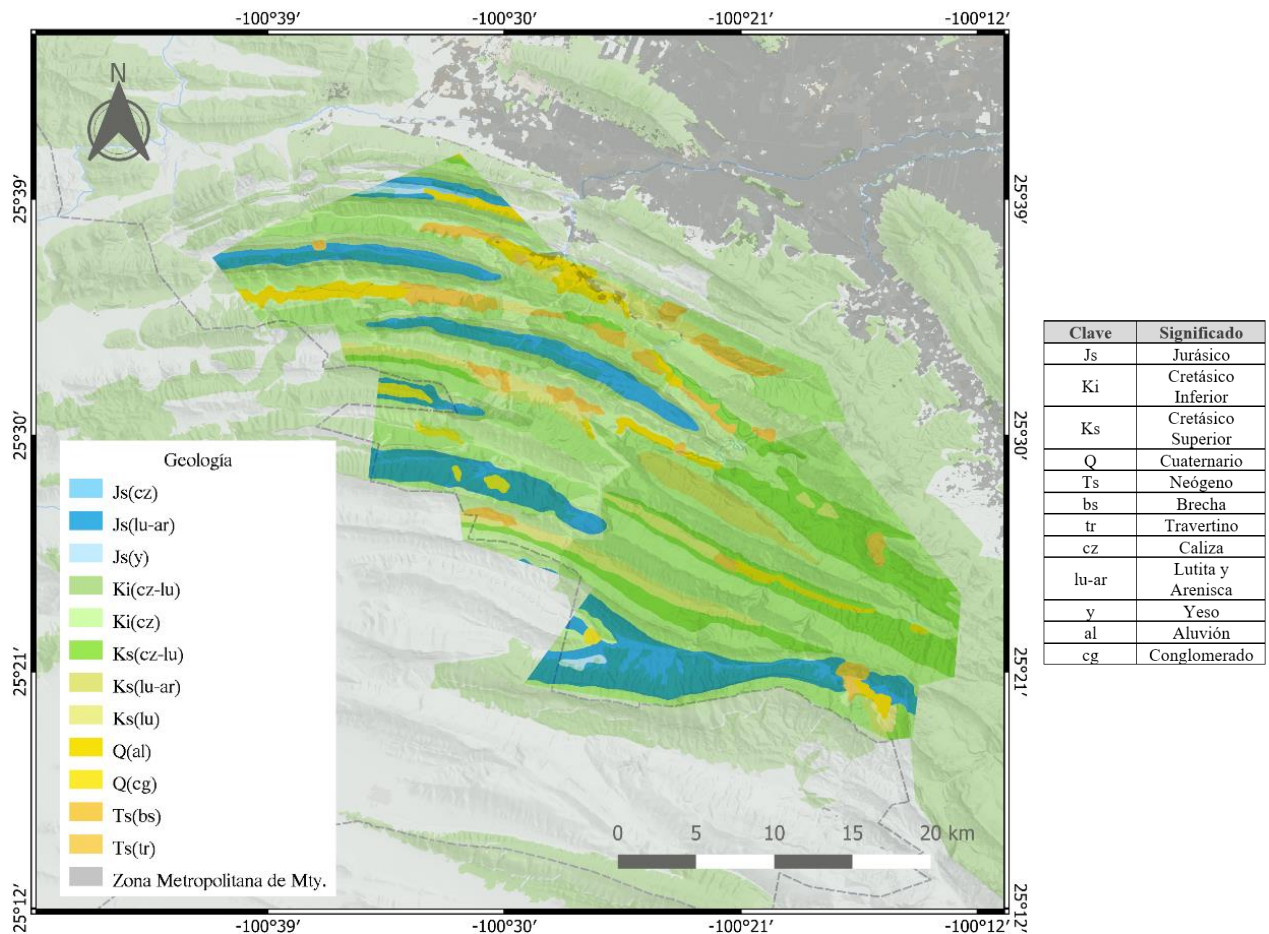


Figura 5. Mapa geológico del Acuífero Buenos Aires, NL. Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie I INEGI.

## 3.2. Estratigrafía

En general, podríamos referirnos a la Sierra Madre Oriental (Figura 6a) como rocas Carbonatadas sobre un conjunto de lechos rojos del Triásico -Jurásico. En su historia geológica tenemos una estrecha relación con la apertura del Golfo de México. Comenzamos con los grabens del Triásico Superior con un sistema de rift y zonas de sutura, las cuales indican una convergencia de placas. Continúa la ruptura y el depósito de los lechos rojos de la Formación Huizachal. Los sedimentos fluviales del syn-rift se caracterizan por un ambiente con baja sinuosidad. Posteriormente, la disminución de la intensidad del relieve provocó el cambio del sistema; junto con el clima semiárido durante esa época, dando una composición sedimentaria-metamórfica en el basamento (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024). La transición del rift está definida por una discordancia angular; éste coincidió en su formación con el primer emplazamiento de corteza oceánica del Golfo. Posteriormente el rift de La Joya muestra en su formación, un megaciclo ascendente, con una transición terrestre a marina hasta principios del Cenozoico (Michalzik, 1991), tal y como se muestra en la Figura 6b.

### 3.2.1. Serie Sabinense

Unidad del Jurásico Superior, conformada por los grupos Zuloaga y Casita. El grupo Zuloaga lo conforman a su vez: los “Yesos Minas Viejas” (Js(y)) que son intercalaciones de anhidritas con lutitas calcáreas, areniscas y calizas arcillosas; subyaciendo están las “Calizas Zuloaga” o “Formación Zuloaga” (Js(cz)). En el caso de la Casita litológicamente en la parte superior comprende calizas arcillosas; en la zona intermedia se tiene una alternancia de limolitas arcillosas, lutitas y calizas arenosas; y en la parte inferior lutitas carbonosas (Js(lu-ar)) (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024).

### 3.2.2. Series Coahuila y Comanche

La Serie Coahuila es del Cretácico Superior; la construyen básicamente depósitos terrígenos y una de las formaciones que la conforma es Cupido (Ks(cz), el cual está dividido en 6 facies (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015)

1. Pelágicas (unidad basal).
2. Pre-arrecife y talud: Caracterizada por calizas bioclásticas y litoclásticas con textura Wackstone a grainstone.
3. Arrecifal: Facies masivas en parte dolomitizada y fuertemente fracturada.
4. Posts-arrecifales someras.
5. Infranerítica y de marea.
6. Lagunares evaporíticos.

La otra formación que la conforma es Tamaulipas Superior (Ks(cz)); la cual tiene una alternancia de calizas arcillosas delgadas y margas (Rafael Barboza-Gudiño et al., 2004), dichas calizas son consideradas criptocristalinas de color crema a gris oscuro o negro en su parte superior. En cambio en la parte media de nódulos de pedernal gris con planos de estratificación; y para la parte superior las mismas calizas pero de color acero, bandeadas y menor espesor (Carrillo Bravo, 1961).

La Serie Comanche abarca del Aptense Superior-Cenomaniense Inferior (Ks(cz-lu)) con una litología de mayor a menor correlación: calizas, margas y lutitas, caracterizado por un ambiente de plataforma somero, que a su vez está subdividido en: Grupo Trinity, Grupo Fredericksburg y Grupo Washita. Los grupos Trinity y Fredericksburg también unidas con el término “Caliza Aurora” con una litología de calizas grises con rudistas, de estratificación gruesa; incluye las Formaciones La Peña y Aurora Inferior (Ks(lu-ar)). Por otra parte, el Grupo Washita son depósitos carbonatos extralitorales como: calizas bandeadas y estratificadas; con las formaciones: Cuesta del Cura, Georgetown, Lutita del Río y Buda (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024).

### 3.2.3. Serie del Golfo

Empezando el Cretácico Superior (Cenomanense Superior al Maestrichtense Ki(cz-lu)), la Serie del Golfo incluye (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024):

- Grupo Eagle Ford:
  - Formación Indidura: Intercalación de lutitas y lutitas calcáreas, en capas delgadas.

- Formación Agua Nueva: Alternancia de Caliza poco arcillosa color gris oscuro y lutita laminada bituminosa y/o carbonosa.
- Grupo Austin:
  - Formación San Felipe: Calizas arcillosas gris claro, verde o marrón.
  - Formación Parras: Intercalación de lutitas con toba y lutitas: negras, yesíferas y carbonosas.
  - Formación Austin: Calizas en general, pero en la parte inferior son blancas; y en la parte superior la acompaña margas y limolitas calcáreas.
- Grupo Taylor y Navarro: Involucra en orden descendente la Lutita Méndez, Formación Difunta, la cuenca de Sabinas Arcilla Upson, Formación San Miguel, Formación Olmos y Formación Escondido.

#### 3.2.4. Depósitos sedimentarios

Se tiene material clástico continental que involucra depósitos de gravas y arenas (Q(gr)), aluviales como limos, arcillas, arenas finas (Q(al)), fluviales, brechas sedimentarias (Ts(bs)) y travertino (Ts(tr)). Depositado en el Cuaternario hasta la actualidad (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015).

### 3.3. Geología Estructural

Básicamente la zona del acuífero abarca la geología estructural de la Sierra Madre Oriental (SOM); la cual, al ser una serie de montañas orogénicas, involucra pliegues estrechos y anticlinales hacia el occidente cubiertos de rocas volcánicas. Los pliegues podemos dividirlos en áreas (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024):

- a) Norte: simétricos, apretados, arqueados y con planos axiales casi verticales
- b) Sur: arqueados y elongados, simétricos y asimétricos, recumbentes y con planos buzando hacia el sur y suroeste de 85 a 60°.
- c) Basamento: casi simétricos con pliegues secundarios, apretados y simétricos.
- d) Vergencia opuesta: apretados, elongados, asimétricos, recostados y planos axiales que buzcan ~50° al noreste.

- e) La Silla: único anticlinal que es simétrica en sus extremos y en su parte central: asimétrica, con fallas y recostada.

### 3.4. Geología del Subsuelo

En Monterrey, se encuentran complejos arrecifales con permeabilidad primaria dentro de la parte más extensa de la sierra, la cual se incrementa debido al fracturamiento. Las elevaciones superiores son zonas de recarga, mientras que los acuíferos se ubican en las áreas más bajas. Los anticlinales presentan pendientes pronunciadas, flancos inclinados y estratos escarpados, lo que mejora tanto la porosidad primaria como la secundaria y facilita el desarrollo de acuíferos. En los flancos y anticlinales con nariz buzante, el agua se encuentra a una profundidad aproximada de 1,000 metros y bajo condiciones artesianas (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024).

### 3.5. Edafología y Uso de suelo

La zona de estudio cuenta con varios tipos de suelo, ordenados en orden descendente con respecto al volumen que ocupan dentro del acuífero: Vertisols, Calcisols, Fluvisols, Phaeozems y Leptosols (Figura 7a). Dicha clasificación fue tomada del WRB, ocupada a su vez en la base de datos del INEGI (IUSS, 2014).

Los suelos con enraizamiento limitado, que se definen como suelos poco profundos (igual o inferior a 25 cm), con alta pedregosidad y pueden contener una considerable cantidad de material calcáreo, lo cual limita el desarrollo de las raíces de las plantas. En este rubro involucra los suelos tipo Leptosols (fragmentos gruesos) y Vertisols (alternancias de sequía-humedad, arcilla de expansión-retracción) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

También en la zona se tienen suelos con acumulación de sales moderadamente solubles o de sustancias no-salinas, como son los carbonatos secundarios presentes en los suelos tipo Calcisols, si no tiene carbonatos secundarios son suelos tipo Phaeozems. En el caso de tener una litología básica de sedimentos estratificados fluviales, marinos y lacustres son clasificados como suelos Fluvisols. En el rubro de uso de suelo, en general podemos clasificar la zona como una

zona de bosque y matorrales (Figura 7b) (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2015).

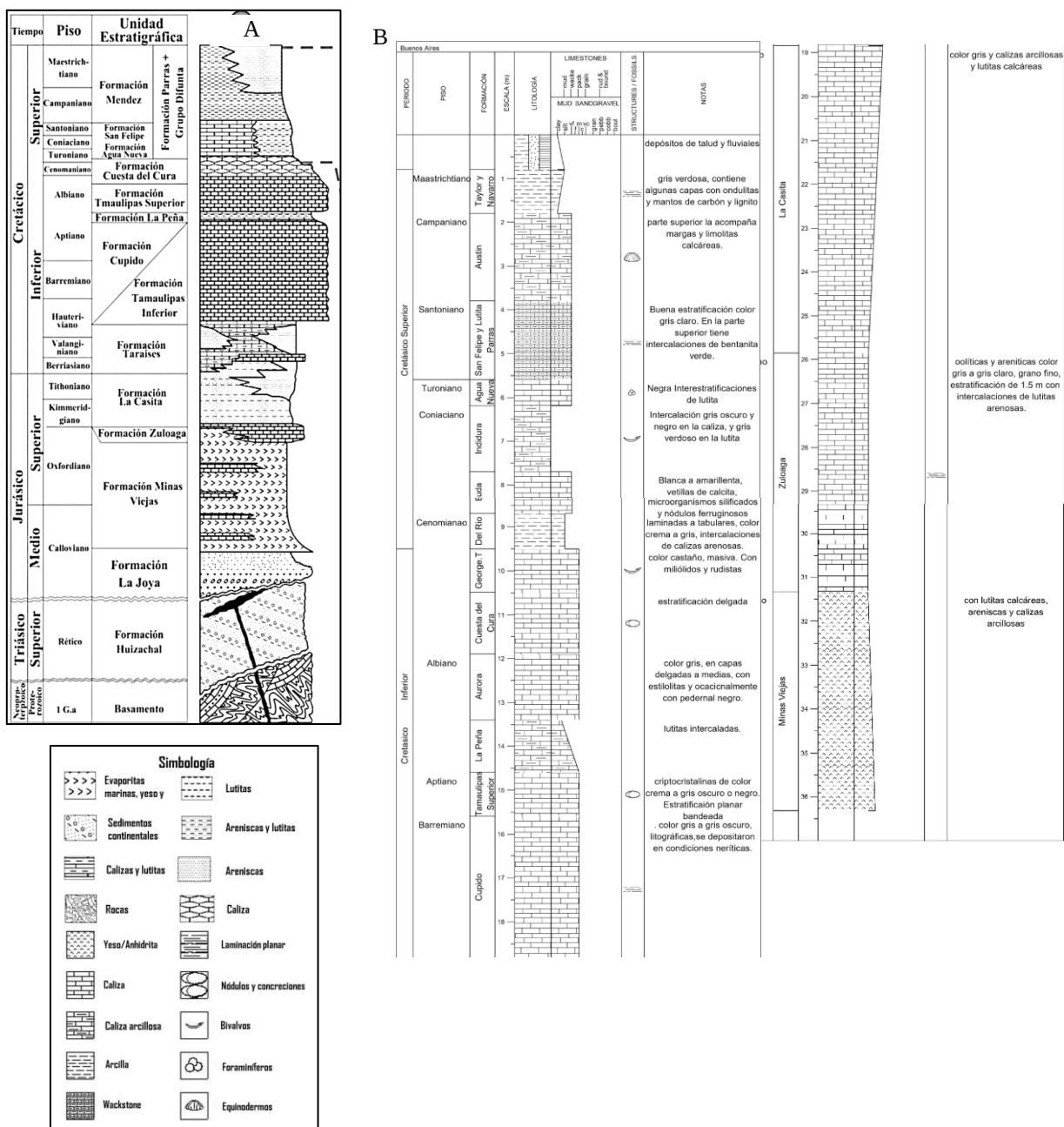


Figura 6. A) Columna estratigráfica del noreste de México B) Columna estratigráfica Acuífero Buenos Aires. Fuente: Aguirre Reyes, 1984; Amezcua, 2006; Basáñez & Amezcua, 2004; Garza Ramírez & López Palomino, 2009; Juárez Arriaga, 2010; López Palomino, 2016; Monier A & López Palomino I, 2011; Piña Arce & López Palomino, 2007; Ramírez Garza & López Palomino, 2009; Remigio Morales & López Palomino, 2013; Sáenza Pita & López Palomino, 2010.

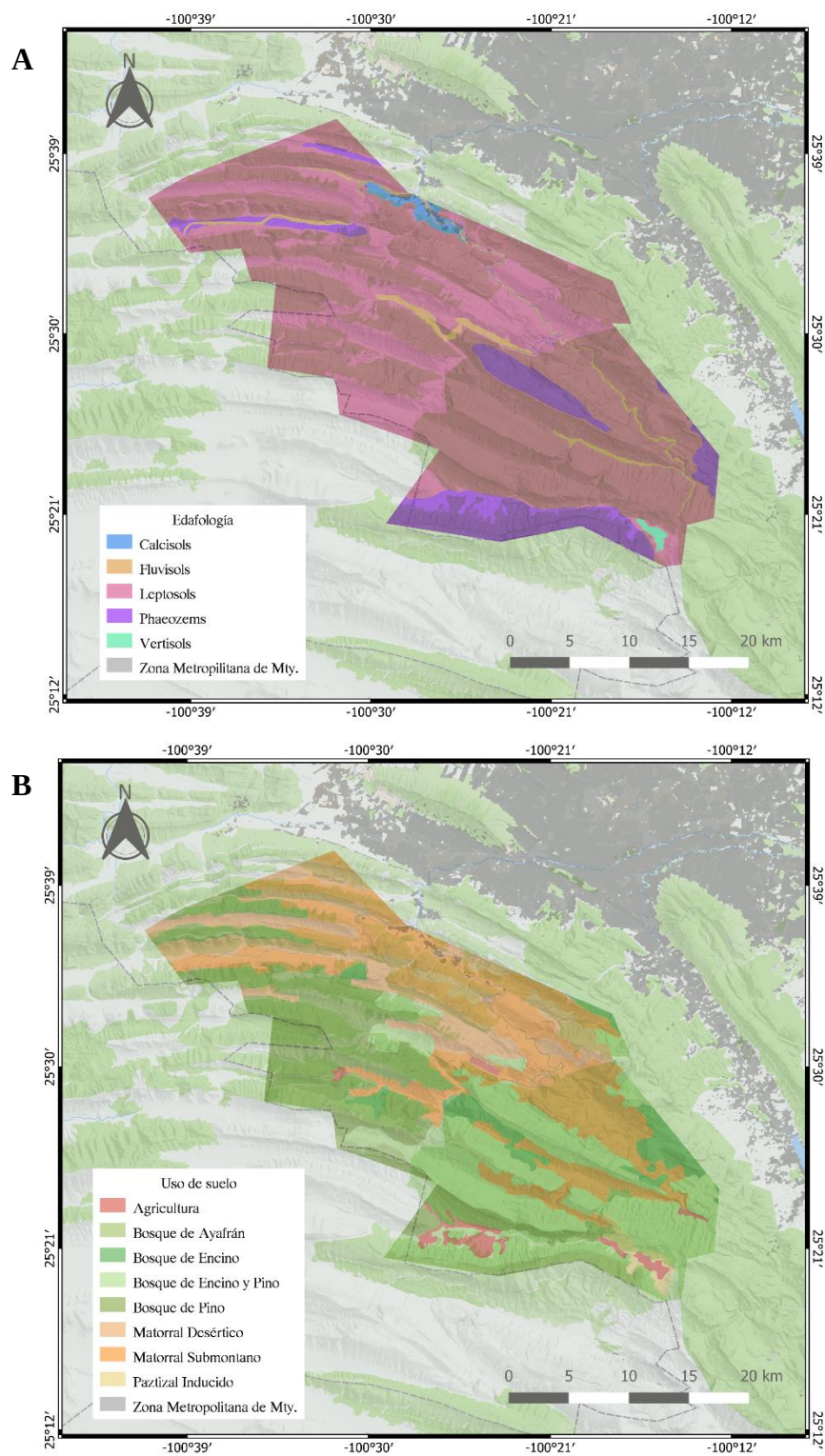


Figura 7. A) Mapa Edafológico del Acuífero Buenos Aires, NL. B) Mapa de uso de suelo del acuífero Buenos Aires, N.L. Conjunto de datos vectoriales Geológicos serie VII, INEGI.

### 3.6. Clima

En la región existen cinco estaciones climatológicas: la estación Las Comitas en Santa Catarina con una precipitación media anual de 420 mm y temperatura media anual de 20.5°C (siendo la más representativa del acuífero), sin embargo está suspendida. Por otro lado, en la Estación Huasteca, la temperatura media anual es de 19.4°C y la precipitación media anual es de 347 mm (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015). La zona ha sido afectada por fenómenos climatológicos extremos, como son los huracanes Helene en 1958, Beulah en 1967, Gilberto en 1988, Emily en 2005, Alex en 2010, Ingrid en 2013 (Florida International University, 2017) y Alberto en 2024. La lluvia representa la región donde está el acuífero.

### 3.7. Actividades económicas

Una de las principales actividades económicas es la agricultura, para la cual se dedican 900 hectáreas para la siembra de maíz, frijol, avena y cebada, además de zonas frutales en el área rural de la Huasteca, Santa Cruz, Los Nogales, San Antonio de la Osamenta, el Pajonal y Canoas. Por otro lado, en la Ganadería se produce ganado bovino, caprino y porcino (Tabla 4). Y se menciona el turismo, uno de los más grandes atractivos turísticos se ubica en las serranías de la Huasteca y en el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015).

*Tabla 4. Volumen concesionado desglosado por uso 2008-2011.*

| <b>1907 Campo Buenos Aires</b> | <b>Volumen Concesionado (m<sup>3</sup>/a)</b> | <b>Usuarios</b> |
|--------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|
| Agrícola                       | 46,613.5                                      | 2               |
| Doméstico                      | 864                                           | 1               |
| Publico Urbano                 | 62,667,677                                    | 1               |
| Total                          | 62,715,154.5                                  | 29              |

*Fuente: Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea, 2015*

Cabe enfatizar que el Parque Nacional Cumbres de Monterrey (PNCM) tiene un área de 177,395.98 ha, siendo más extenso que los municipios circundantes. En la zona se encuentran zonas vegetales de mayor valor ecológico del Estado, y de igual manera en el ámbito turístico

tiene cañadas, grutas, cascadas entre cadenas montañosas y desiertos (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2006). Podemos recalcar que una de las principales zonas de recarga forma parte el acuífero Buenos Aires (Figura 8).

El PNCM se encuentra en la región hidrológica del Río Bravo, con los ríos Bravo, San Juan y Pesquería. El río Sta. Catarina se origina del arroyo San José de las Boquillas y por el sur con el arroyo San Sebastián. Tiene varias zonas captación de este, al sureste el cañón San Cristóbal, por el noroeste el arroyo los Soldados conjunto con el cañón Huasteco, donde se encuentran las instalaciones del Acueducto Huasteca-Monterrey (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2006).

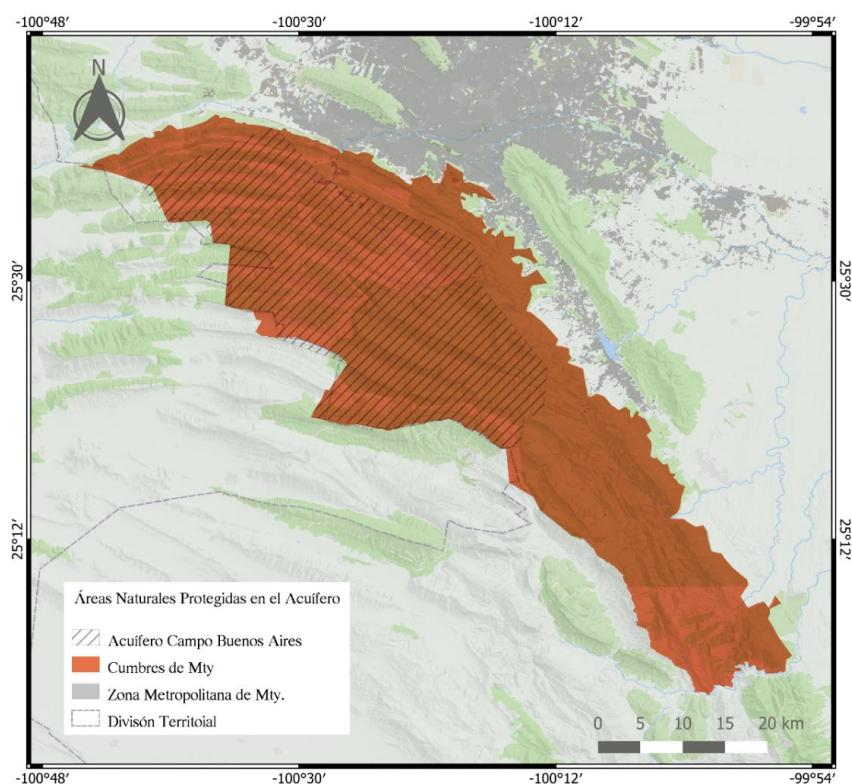


Figura 8. Mapa de ubicación del Parque Nacional Cumbres de Monterrey con respecto al acuífero Buenos Aires. Fuente: Áreas Naturales Protegidas Federales de México, enero 2024, CONABIO y CONANP.

## 4. Metodología

La metodología implementada para la evaluación de los impactos de la variabilidad climática en el acuífero Buenos Aires se muestra en la Figura 9, la cual se divide en: 1) recopilación de datos hidrogeológicos y climatológicos, 2) análisis de las series de tiempo, 3) Modelo de balance de agua para la estimación de la percolación. En los siguientes subcapítulos se detalla cada una de las secciones de la metodología.

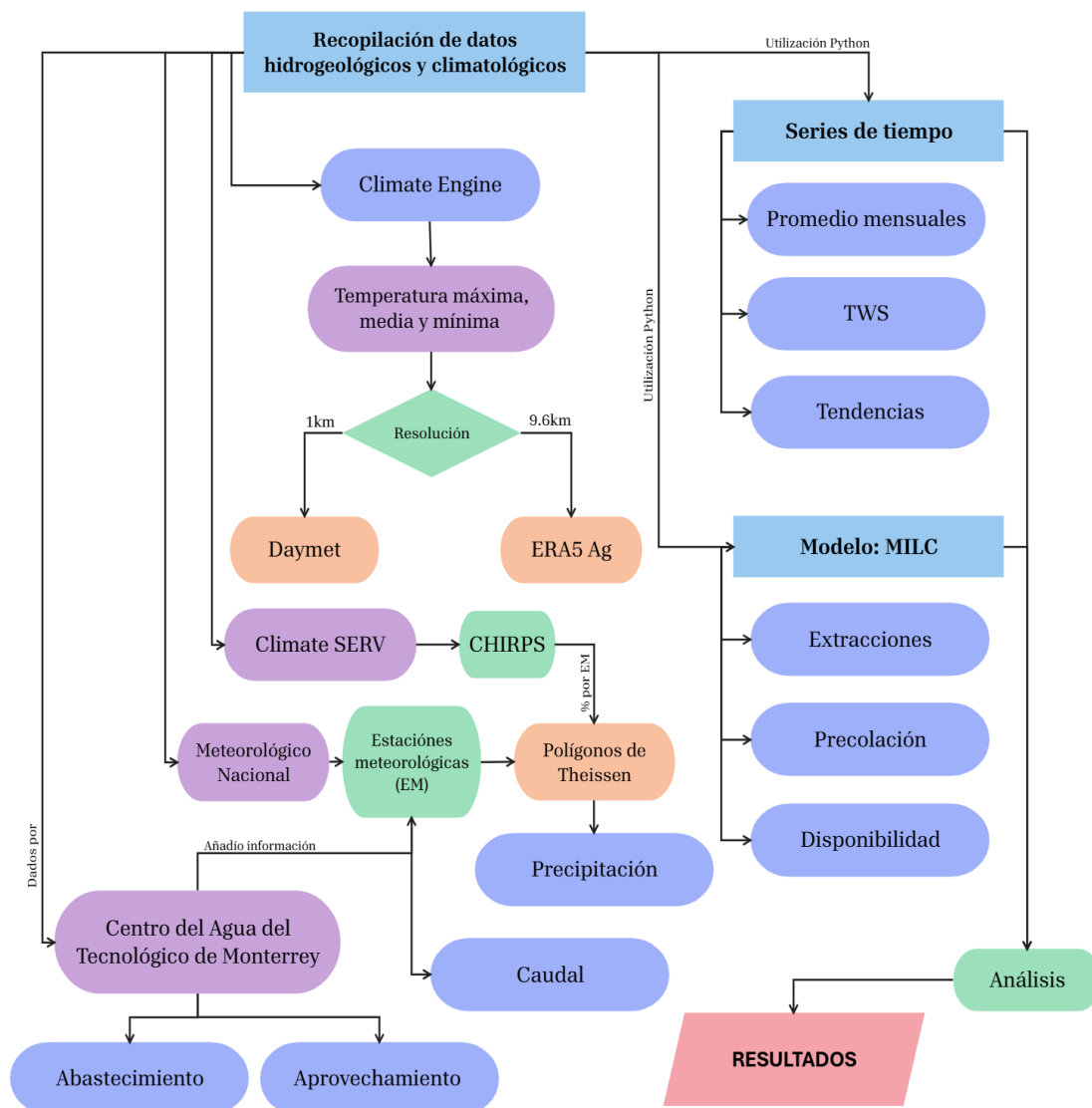


Figura 9. Diagrama de flujo de la metodología utilizada. Elaboración propia.

## 4.1. Recopilación de datos hidrológicos y climatológicos

Los datos hidroclimatológicos analizados para evaluar los impactos de la variabilidad climática en el acuífero Buenos Aires fueron: la precipitación, temperaturas mínima, media y máxima. Las temperaturas del aire a 2 m de altura fueron obtenidas de la plataforma Climate Engine, la cual permite procesar, visualizar y descargar datos derivados de productos globales y de teledetección (Huntington et al., 2017). De Climate Engine se consultó la base de datos del producto de reanálisis ERA5 Ag; siendo la 5ta generación (ERA5) del ECMWF (Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo) con temporalidad a escala diaria (Ag); y la base de datos de DAYMET (*Daily Surface Weather and Climatological Summaries*), que contiene datos interpolados (Tabla 5) de climatología (Climate Engine, 2024a, 2024b).

Tabla 5. Características generales del conjunto de datos del DAYMET y ERA5 Ag.

| Nombre              | DAYMET                                                                                                                                                                                                       | ERA5 Ag                                                                                                                                                                 |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Organización        | NASA ORNL DACC de Oak Ridge<br>National Library                                                                                                                                                              | ECMWF                                                                                                                                                                   |
| Resolución espacial | 1km (1/96 grados)                                                                                                                                                                                            | 9.6 km (1/10 grados)                                                                                                                                                    |
| Intervalo de tiempo | 1980 hasta el presente                                                                                                                                                                                       | 1970/01/01 al presente (actualización<br>cada 7 días)                                                                                                                   |
| Variables           | Temperatura mínima/máxima/media<br>Precipitación<br>Índice de precipitación<br>estandarizado (SPI)<br>Equivalente en agua de nieve<br>Radiación de onda corta descendente<br>( $W/m^2$ )<br>Presión de vapor | Temperatura mínima/máxima/media<br>Precipitación<br>Dewpoint<br>Nieve<br>Velocidad del viento<br>Radiación de onda corta descendente<br>( $W/m^2$ )<br>Presión de vapor |

Fuente: Climate Engine, 2024a, 2024b

Por su parte, los datos de precipitación fueron obtenidos del Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS), un conjunto de datos de precipitaciones casi globales con cobertura temporal diaria desde 1981 hasta la actualidad. Utiliza imágenes satelitales con una resolución de  $0.05^\circ$  junto con datos de estaciones meteorológicas para crear series temporales y mapas de precipitaciones. Esto permite el análisis de tendencias y el monitoreo de sequías estacionales (por ejemplo, utilizada por la Red de Sistemas de Alerta Temprana de Hambruna

de USAID) (Water Resource Associates, 2024). Una de las plataformas utilizadas para la obtención de estos datos es Climate SERV, donde se puede descargar y los datos históricos de precipitación. Además, pronósticos de lluvia y temperatura con una temporalidad de 180 días con el fin de mejorar la comprensión y tomar mejores decisiones sobre cuestiones relacionadas con la agricultura y la disponibilidad de agua (Sarva, 2019).

Para analizar la respuesta del almacenamiento de agua en el acuífero por las variaciones climáticas se utilizaron las Anomalías de Almacenamiento Terrestre de Agua (TWSa) proporcionados por la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), que es una colaboración entre la NASA y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR). GRACE consiste en dos satélites en la misma órbita separadas por unos 220 km, la cual se ve afectada por las anomalías en la gravedad o cambios en la concentración en masa terrestre. Los sensores principales del satélite GRACE son: instrumento de microondas Banda-K (mide el grado de precisión), los acelerómetros (evalúa las aceleraciones no gravitatorias) y los receptores para Sistemas de Posicionamiento Global (proporciona la posición exacta de los satélites) (Mehta et al., 2020).

Los datos GRACE son proporcionados en un formato Network Common Data Form (netCDF), que representan datos estructurados en matrices que facilita la creación, el acceso y su intercambio. El formato netCDF está respaldado por The Unidata Program Center con interfaces de programación para: C, C++, Java, Fortran, Python, IDL, MATLAB, R, Ruby y Perl (NSF Unidata, 2018).

Los datos de abastecimiento de agua subterránea, los aprovechamientos subterráneos, y la precipitación de las estaciones climatológicas de la CONAGUA fueron proporcionados por el Centro del Agua de Latinoamérica y del Caribe del Tecnológico de Monterrey. Para las estaciones climatológicas se utilizaron los polígonos de Thiessen (Tabla 6) para poder calcular los porcentajes que abarca cada estación meteorológica con respecto al área total del Acuífero (Figura 10). Por su parte, para los registros de caudales se utilizó la información de la estación hidrométrica de Cadereyta; ubicada 11 km de la confluencia de los ríos Sana Catarina y San Juan, a 2 km de la carretera no.40 y 35 km al este sureste de Monterrey N.L (Martínez Zepeda, 2012).

Tabla 6. Estaciones meteorológicas del Acuífero Buenos Aires N.L.

| ID    | Nombre            | longitud | latitud | Situación  | Porcentaje (%) |
|-------|-------------------|----------|---------|------------|----------------|
| 19033 | Laguna de Sánchez | -100.28  | 25.3461 | Operando   | 22             |
| 19038 | Las Comitas       | -100.356 | 25.5133 | Suspendida | 13             |
| 19096 | La Huastequita    | -100.455 | 25.6386 | Operando   | 8              |
| 19031 | La Cruz           | -100.523 | 25.546  | Operando   | 32             |
| 19018 | El Pantojal       | -100.389 | 25.49   | Operando   | 25             |
|       |                   |          |         |            | 100            |

Fuente: CONAGUA & Secretaria de Gobierno de México, 2020

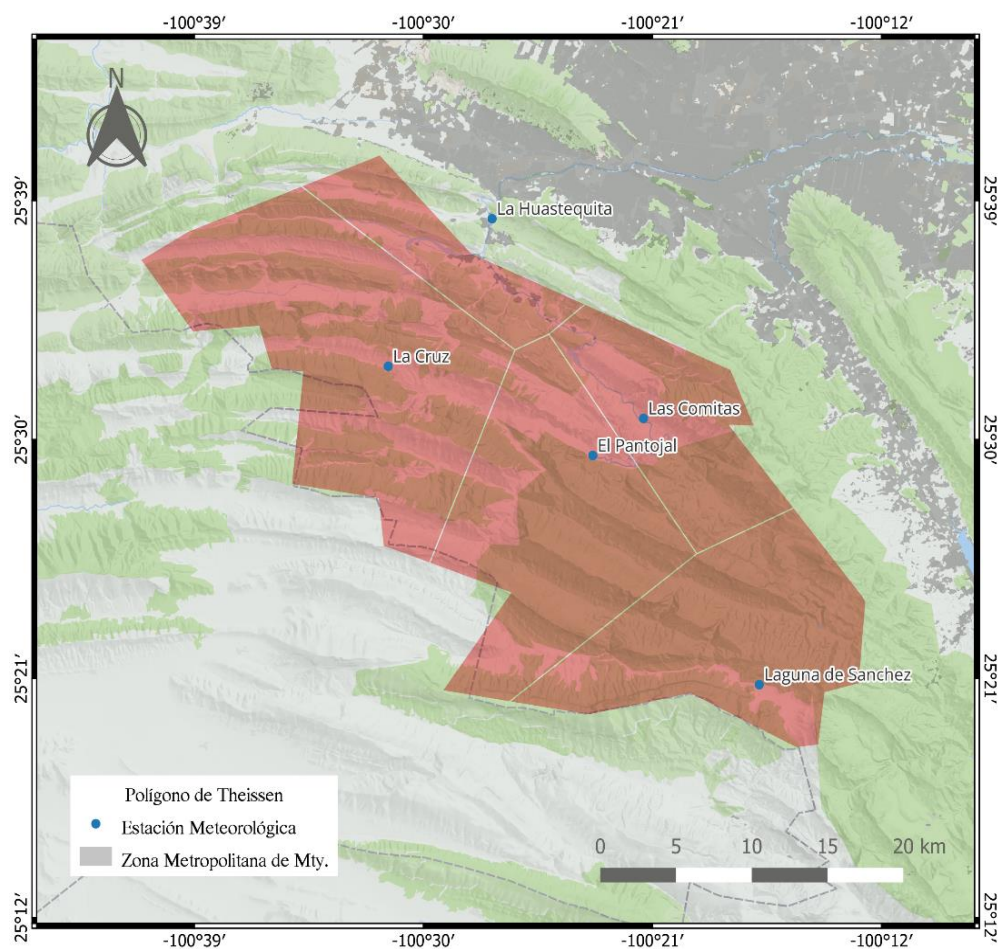


Figura 10. Polígono de Thiessen que abarca las estaciones meteorológicas del acuífero Buenos Aires N.L. Fuente: CONAGUA & Secretaria de Gobierno de México, 2020

## 4.2. Análisis de las series de tiempo

Las series temporales hidrológicas anuales pueden analizarse en términos de su media, varianza, asimetría y estructura de dependencia a lo largo del tiempo. Por otro lado, las series estacionales presentan una media periódica, desviación estándar, asimetría y una estructura de dependencia característica (Salas et al., 1982).

La SDAM (Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey) abastece al Área Metropolitana de Monterrey a través de 56% de aguas superficiales y 44% de aguas subterráneas (Barragán Villarreal et al., 2022). En el Anexo 1, describe la ubicación espacial de las fuentes de agua subterránea que administra SADM. Las temporadas de mayor extracción del agua subterránea, se observan del 2011-2012 y del 2014-2016 anomalías del almacenamiento terrestre de agua (TWSa).

Las TWSa de GRACE consideran el conjunto de almacenamientos de aguas terrestres, incluyendo la subterránea, humedad del suelo, y agua superficial. Estas anomalías representan el estado de almacenamiento del agua con respecto a un valor de referencia y sirven para inferir las ganancias y/o pérdidas del agua a lo largo del tiempo. Estas anomalías cubren el periodo del 17 de marzo de 2002 al 12 de octubre de 2016 para la misión GRAE y GRACE-FO del 22 de mayo de 2018 hasta la fecha para su misión de continuación (Barrera et al., 2020). Así mismo, se calculó la señal de cambio de almacenamiento terrestre (dTWS), la cual nos indica el cambio de volumen del acuífero entre fechas consecutivas.

## 4.3. Modelo de balance de agua para la estimación de la percolación

Para el modelo hidrológico se implementó la librería LuMod, la cual es una colección de modelos conceptuales integrados, diseñados para facilitar la simulación hidrológica utilizando el lenguaje Python. A diferencia de otros códigos que priorizan la velocidad, LuMod fue desarrollado para simplificar el modelado y el análisis de resultados. La estructura del modelo hidrológico implementado para este análisis fue MILC (Modello Idrologico Semi-Distribuido

incontinuo), el cual es un modelo de balance de agua en el suelo que permite la simulación de la recarga potencial mediante la percolación del suelo (Esparza-Arciniega, 2022).

(Saaverda & Vallester, 2006) Un parámetro importante para la gestión del agua es la percolación, definida como un cambio de fase geométrico, lo que implica la filtración del agua a través de los poros de una capa permeable a un estrato más profundo (Universidad de Granada, 2014). En este contexto, la percolación se refiere al proceso en el que el agua pasa a través de los poros de un material granulado, llenándolos total o parcialmente, y al trasladarse a estratos más profundos hasta alcanzar la zona saturada se conoce como recarga (Saaverda & Vallester, 2006). MILC, ha sido implementado en las inundaciones en Italia por el Alto Río Tíber, ya que toma en cuenta las variables de la humedad del suelo y la escorrentía en una escala de tiempo diaria (Brocca et al., 2011).

Para la simulación con el modelo MILC, es necesario definir una serie de parámetros asociados a distintos procesos hidrológicos que son simulados, estos parámetros se asignan para toda una cuenca analizada; a diferencia de los modelos semidistribuidos o distribuidos que asignan parámetros a diferentes subcuencas o a un conjunto de mallas (Figura 11) (Raducan, 2018). Los parámetros requeridos por el modelo MILC se muestran en la Tabla 7.

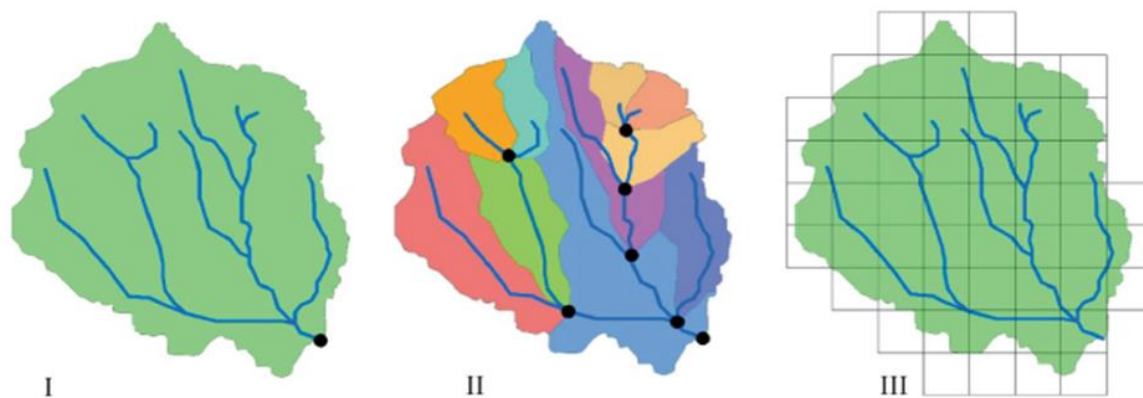


Figura 11. Escalamiento espacial de modelos a nivel de subcuenca. I) Modelos agrupados, II) Modelos semidistribuidos, III) Modelos completamente distribuidos: Los parámetros se asignan individualmente a cada celda de la cuadrícula. Fuente Shekhar Prasad et al., 2015.

Tabla 7. Datos de salida del modelo MILC.

| Salidas  | Descripción                                                                                    |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| qt       | Caudal enrutado o <i>Routed streamflow</i> ( $q_d+q_b$ ) en la salida de la cuenca ( $m^3/s$ ) |
| qd       | Caudal superficial o <i>Routed overland flow</i> en la salida de la cuenca ( $m^3/s$ )         |
| qb       | Caudal base enrutado o <i>Routed baseflow</i> en la salida de la cuenca ( $m^3/s$ )            |
| pet      | Evapotranspiración potencial (mm/d)                                                            |
| et       | Evapotranspiración (mm/d)                                                                      |
| runoff   | Escorrentía (mm/d)                                                                             |
| baseflow | Caudal base (mm/d)                                                                             |
| infil    | Infiltración (mm/d)                                                                            |
| perc     | Percolación (mm/d)                                                                             |
| ws       | Contenido de agua en el suelo a-dimensional ( $w/w_{max}$ ) (-)                                |

Fuente: Esparza Arciniega, 2022

Para la calibración del modelo MILC se utilizaron datos de gato de la estación hidrométrica de Cadereyta; ya que es la más cercana a la zona de estudio. También se utilizaron datos de precipitación (obtenidos de las estaciones meteorológicas) y temperaturas máxima, media y mínima (recaudados de Climate Engine con ERA5 y DAYMET) para ejecutar el modelo. La calibración para la optimización de los parámetros consistió en una Simulación de Monte Carlo (MC); el cual tiene como principal función la realización de combinaciones aleatorias de los parámetros del modelo para evaluar cuáles generan el menor error entre los valores simulados y observados (Halton, 1968). Para la calibración del modelo se realizaron con 20,000 simulaciones aleatorias de MC con el criterio Nash-Sutcliffe (NSE) como métrica de error.

## 5. Resultados

La Figura 12a muestra que, en general, no hay una correlación directa entre la precipitación y el abastecimiento de agua subterránea, sin embargo, los incrementos en el abastecimiento se han incrementado después de precipitaciones extremas. En el caso comparativo con TWSa se observa una correlación del 2010 a antes del 2016 (Figura 12b). Las altas tasas de precipitación observadas están asociadas con el huracán Alex en 2010, y en 2014 a los huracanes y/o ciclones que afectaron en el mar del pacífico (Norbert, Odile, DT16E, Polo y Rachel) y en el mar de atlántico (Dolly y Edouard) (Florida International University, 2017), mientras que las tendencias negativas están asociadas a periodos de sequía. Los impactos de las fuertes lluvias por los huracanes también son observados en los caudales con el modelo MILC de la Figura 13.

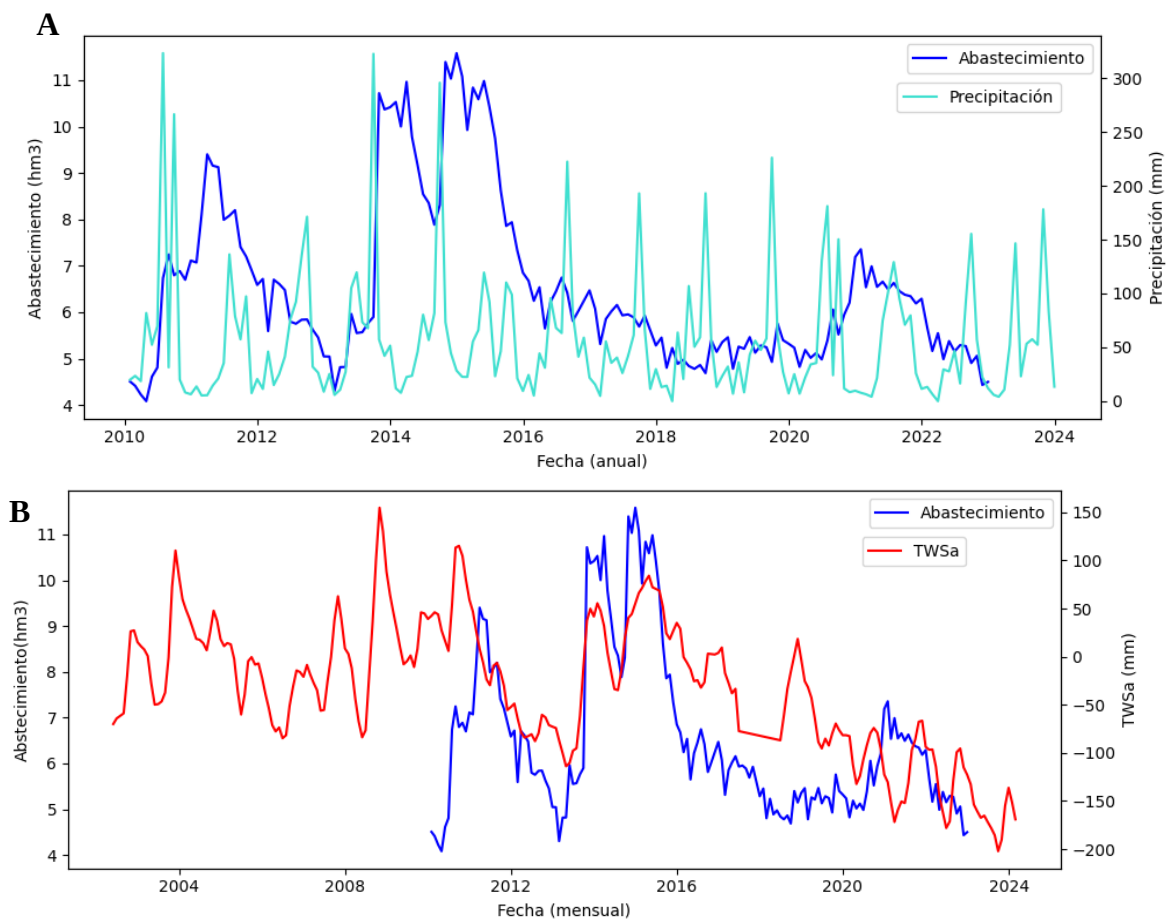


Figura 12. A) Serie de tiempo de abastecimiento y precipitación mensual del Acuífero Buenos Aires N.L. B) Serie de tiempo de abastecimiento y TWSa del Acuífero Buenos Aires N.L.

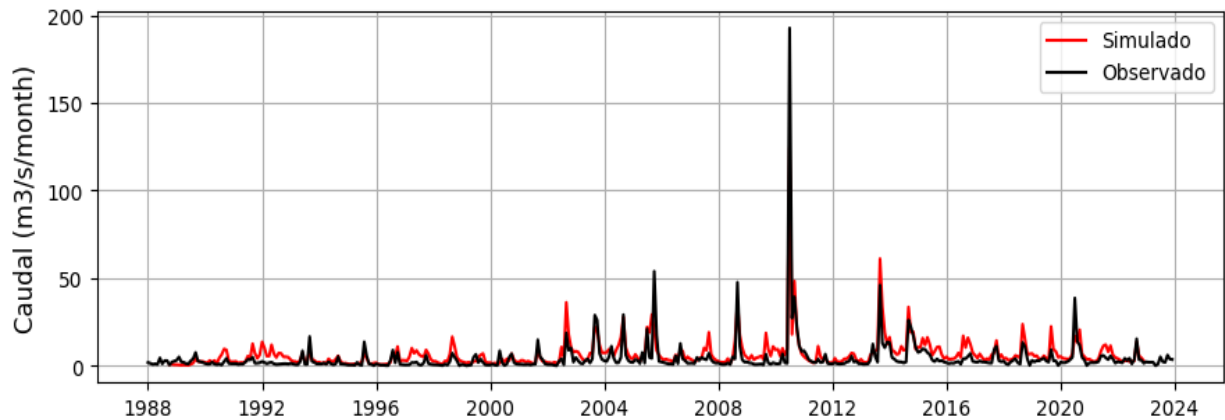


Figura 13. Comparación de la simulación Monte Carlo con los datos observados de gasto de la estación hidrométrica Cadereyta del Acuífero Buenos Aires N.L.

Con respecto a la gráfica de cambio de almacenamiento de agua dTWS a escala anual (Figura 14), resaltando los periodos de ganancia de agua más relevantes: 2007, 2010, 2014 y 2015. Desde el 2016 se observa que prevalecen los años con pérdidas de volumen de agua respecto a las ganancias. Con una pendiente  $-1.36 \text{ mm/año}$ .

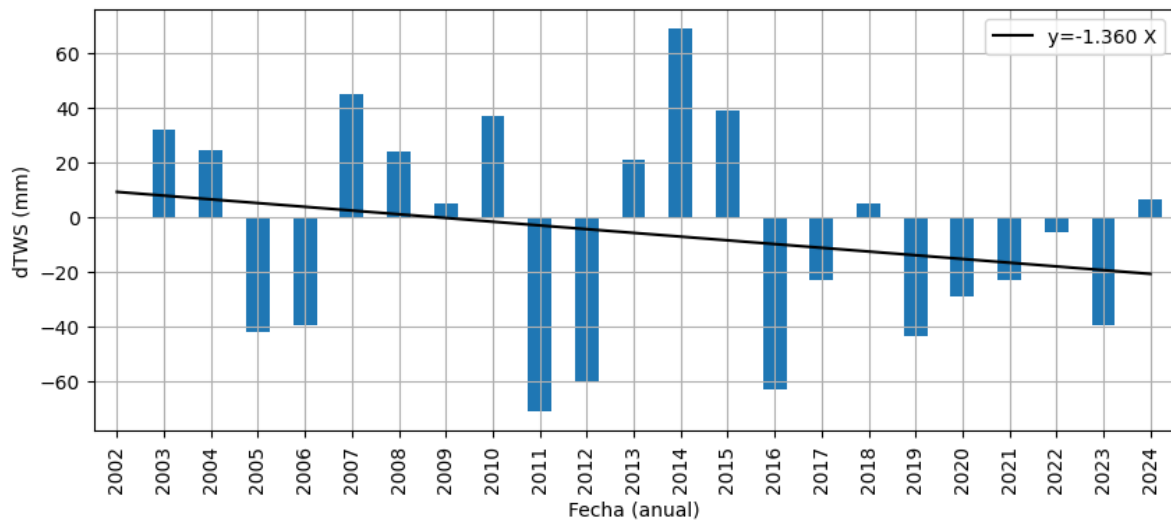


Figura 14. Diferencia consecutiva del almacenamiento del acuífero Buenos Aires N.L.

La línea de tendencia del abastecimiento (Figura 15a) muestra una pendiente de  $-1.9 \text{ hm}^3/\text{año}$ , de manera similar, la tendencia de TWSa (Figura 15b) resultó de  $-0.544 \text{ mm/año}$ . Un factor asociado a este patrón es el incremento de la recarga por los huracanes, que provocan un

incremento en la infiltración y el almacenamiento de agua terrestre; lo que a su vez está relacionado con el aumento de la extracción de agua subterránea, debido a que el nivel de agua subterránea se hace somero y accesible. Un factor social puede deberse al aumento de la población (Figura 16), y por ende no se puede tener un abastecimiento eficiente.

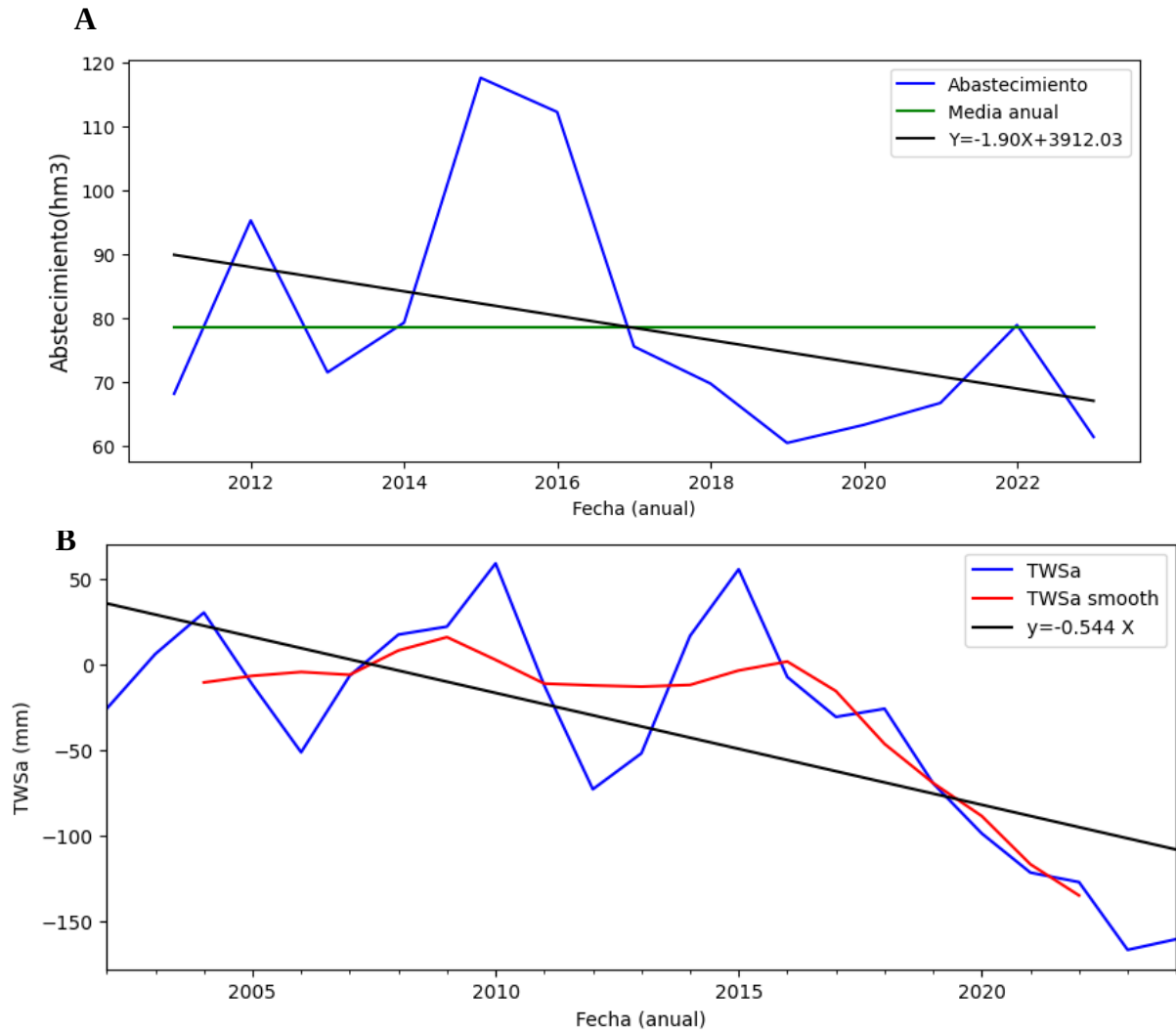


Figura 15. Líneas de tendencia. A) Línea de tendencia y media anual del abastecimiento del Acuífero Buenos Aires N.L. Con una media anual de 29830.23 mm/año B) Línea de tendencia del TWSa del Acuífero Buenos Aires N.L. La línea de TWSa suavizado (smooth) representa al acuífero ya que elimina los picos que se deben a cambios de humedad y superficiales.

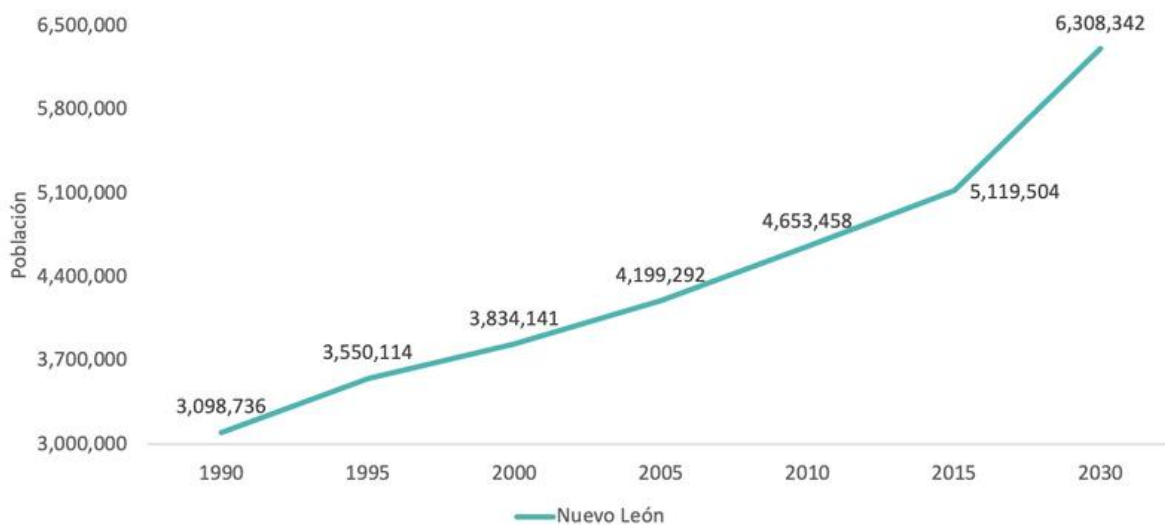


Figura 16. Población de Nuevo León de 1990 a 2015 con estimación a 2030. Fuente:INEGI, 2020.

Al comparar la percolación simulada contra la precipitación (Figura 17a) se puede visualizar una posible relación lineal entre las variables  $y = 0.17$ , con una relación anual de 0.87 y una tasa media anual del 0.15%; en donde la precipitación mensual promedio ronda los 54.82 *mm/mes* y la percolación mensual en 8.8 *mm/mes*. Se observa una alta tasa de percolación está relacionada a la geología, como son las unidades acuíferas de calizas fracturadas y la complejidad estructural de la zona (Figura 17b). El análisis estadístico (Figura 17c) muestra una distribución con sesgo positivo debido a la presencia de datos con valores altos de percolación; esto nuevamente refleja la existencia de mayores episodios de percolación en la zona y que dichos momentos no demuestran una continuidad, debido al clima regional.

La Figura 18 presenta las fluctuaciones mensuales del escurrimiento y la percolación, destacando que los escurrimientos se concentran mayormente entre septiembre y noviembre. Mientras que, los valores elevados de percolación se prolongan desde julio hasta marzo, que justamente concuerdan con el clima típico de la región.

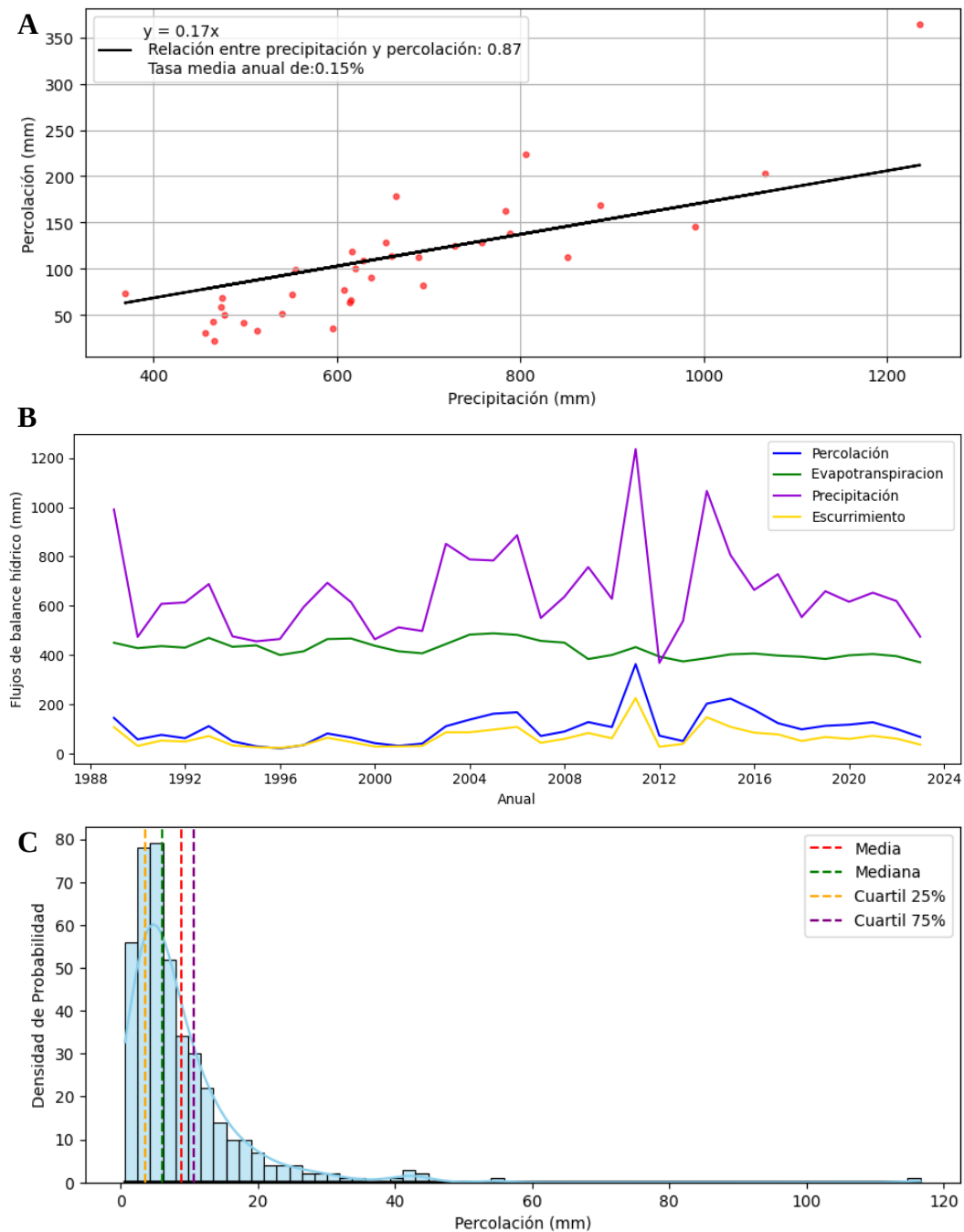


Figura 17. Resultados del Modelo: A) Diagrama de dispersión Anual de la Precipitación y Percolación (mm) obtenido de los resultados del modelo MILC, del acuífero Buenos Aires N.L. B) Comparación de: precipitación, evapotranspiración, percolación, y escurrimiento anual del acuífero Buenos Aires N.L. D) Distribución de la percolación (mm/mes) con Media: 8.8, Desviación estándar: 9.3, Mediana: 6.14 y con un sesgo positivo.

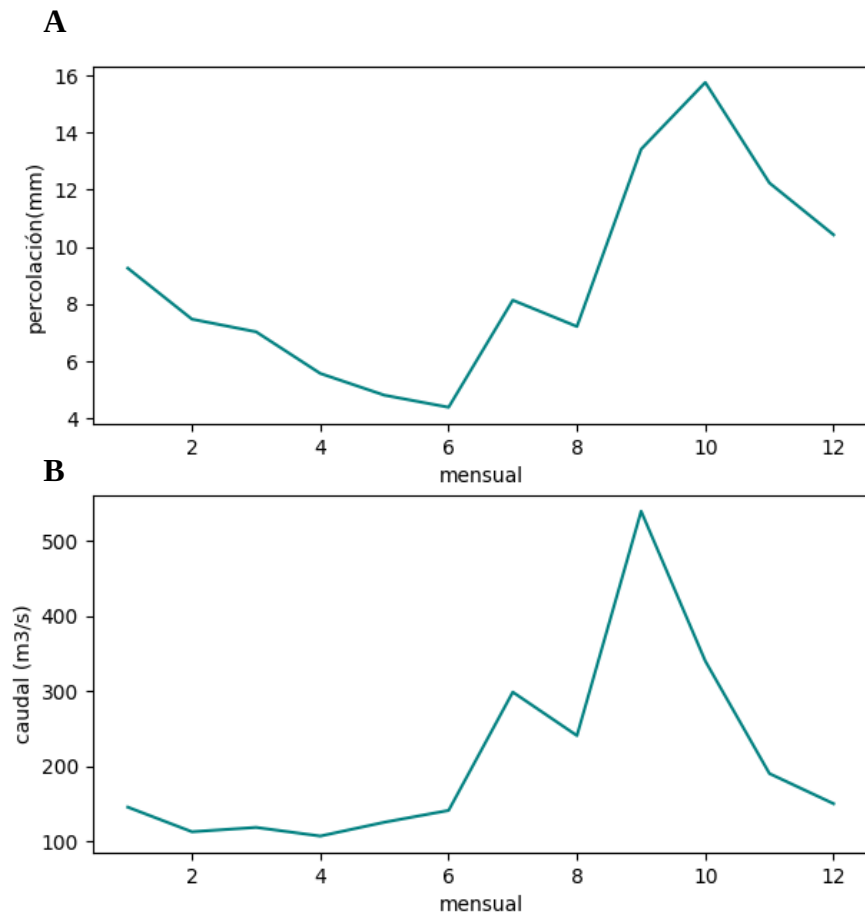


Figura 18. Resultados variabilidad: A) Variabilidad de la percolación resultado del modelo del acuífero Buenos Aires N.L.  
B) Variabilidad del caudal resultado del modelado del acuífero Buenos Aires N.L.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se analizó el efecto de la variabilidad climática en el acuífero Buenos Aires, Nuevo León. Para ello se recurrió al uso de datos derivados de percepción remota y modelos globales, así como de modelado hidrológico para determinar variables clave que expliquen cómo la variabilidad climática afecta al acuífero.

Para ello se desarrolló en tres etapas principales: 1) Recopilación de datos hidrogeológicos y climatológicos, donde se utilizaron diversas fuentes de datos como ERA5 Ag, DAYMET y CHIRPS para analizar variables como precipitación, temperaturas y evaluar el almacenamiento terrestre de agua; 2) Análisis de series de tiempo, en ello se evaluaron las tendencias de las series hidrológicas y climatológicas para identificar anomalías en el almacenamiento de agua; y 3) Modelo de balance de agua, implementado con la librería LuMod con el modelo MILC, para estimar la percolación y evaluar la recarga del acuífero, considerando parámetros hidrológicos como caudales, temperaturas y precipitación.

Las series de tiempo dadas por los datos satelitales de GRACE demostraron que la variabilidad climática (especialmente los eventos extremos como los huracanes) juega un papel clave en la recarga del acuífero, afectando significativamente el almacenamiento y la disponibilidad de agua subterránea. Además resultaron fundamentales para la evaluación de las anomalías de almacenamiento terrestre (TWSa), permitiendo un monitoreo continuo de los cambios en el almacenamiento de agua en el acuífero a lo largo del tiempo.

## 7. Referencias

- Aguirre Reyes, V. M. (1984). *Geohidrología del margen oriental de la Sierra Madre Oriental* [Digital]. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Amezcu, N. (2006). *Léxico Estratigráfico de México Formación Navarro*.
- Barragán Villarreal, I. B., Esparza Hernández, J. M., González Chío, R., Dávila Páez, P., Ramírez Santos, H., Oejo Miramontes, M. G., López Corzo, R., Cuity Siller, A. C., Cuellar Mijares, E., Olivo Guzmán, J. D., Velázquez Zepeda, L. G., Panti Garza, H., Ortégón, E., Terra Guerra, P., Aguilar Limón, K. J., Ayala Delgado, C. D., Herrera Lozano, A., Sepúlveda Treviño, L. A., Manzera Balderas, O., ... Tagle Pérez, E. (2022). *Plan estratégico de Servicios de Agua y Drenaje Monterrey 2022-2027*.
- Barrera, T., James, F., Matthew, R., & John, B. (2020). *Sinopsis del Satélite GRACE y Sus Datos y Aplicaciones*. <http://arset.gsfc.nasa.gov@NASAARSET>
- Basáñez, L., & Amezcua, M. (2004). *Léxico Estratigráfico de México: Formación Aurora*.
- Brocca, L., Melone, F., & Moramarco, T. (2011). Distributed rainfall-runoff modelling for flood frequency. In *Hydrological Processes* (18th ed., Vol. 25, pp. 2801–2813).
- Carrillo Bravo, J. (1961). *Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria*. [https://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1961/1961\\_Ene\\_Feb\\_01X.htm3/3](https://archives.datapages.com/data/amgp/pdf-content/1961/1961_Ene_Feb_01X.htm3/3)
- Climate Engine. (2024a, May 13). *DAYMET*. <https://support.climateengine.org/article/54-daymet>
- Climate Engine. (2024b, June 13). *ERA5 Ag*. Climate Engine. <https://support.climateengine.org/article/58-era5-ag>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2006). *Programa de Conservación y Manejo: Parque Nacional Cumbres de Monterrey*.
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Decreto 2016*. <http://www.gob.mx/conagua>

- CONAGUA. (2024). *CONAGUA Sistema Nacional de Información del Agua*.  
[https://geosinav30.conagua.gob.mx:8080/geoserver/Sina/ows?service=WFS&version=1.0.0&request=GetFeature&outputFormat=shape-zip&srsName=EPSG%3A4326&typeName=Sina%3Am06\\_acuiferos\\_disponibilidad](https://geosinav30.conagua.gob.mx:8080/geoserver/Sina/ows?service=WFS&version=1.0.0&request=GetFeature&outputFormat=shape-zip&srsName=EPSG%3A4326&typeName=Sina%3Am06_acuiferos_disponibilidad)
- CONAGUA, & Secretaria de Gobierno de México. (2020). *Información Estadística Climatológica*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (1997). *Protocolo de Kyoto de la Convención de las Naciones Unidas: Cambio Climático*.
- Dávila Burga, J. (2011). *Diccionario Geológico*. ARTHALTUNA.
- Esparza Arciniega, S. (2022). *Lumed Models (LuMod) for Hydrology*. The Hydrology Grupo, Faculty of Engineering UNAM. [https://zaul\\_ae.gitlab.io/lumod-docs/](https://zaul_ae.gitlab.io/lumod-docs/)
- Florida International University, F. (2017). *Nombres de Huracanes ya retirados desde 1954: Seguimiento De Tormentas*. <https://huracanes.fiu.edu/seguimiento-de-tormentas/nombres-de-ciclones-tropicales-mundiales/nombres-de-ciclones-tropicales-ya-retirados/index.html>
- Fuentes Yagüe, J. L. (1992). Aguas Subterráneas. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario*.
- Garza Ramírez, & López Palomino. (2009). *Léxico Estratigráfico de México: Lutita del Río*.
- Guerra Abud, J. J. (2015). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua. NOM-011-2015*.  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5387027&fecha=27/03/2015#gsc.tab=0)
- Halton, J. (1968). *A retrospective and prospective survey of the Monte Carlo method*.
- INEGI. (2020). *Panorama Sociodemográfico de México*.  
<https://participa.conl.mx/pub/demografia/release/4>

- IUSS. (2014). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014: Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos* (Actualización 2016). FAO. <http://www.fao.org>
- Jaquez, C. J. (2002). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua. NOM-011-2000.*  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=734510&fecha=17/04/2002#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=734510&fecha=17/04/2002#gsc.tab=0)
- Jiménez Cisneros, B. E. (2019). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*
- Jiménez Cisneros, B. E. (2020). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600593&fecha=17/09/2020#gsc.tab=0)
- Juárez Arriaga, E. (2010). *Léxico Estratigráfico de México Grupo Washita.*  
<http://tin.er.usgs.gov/geology/state/sgmc-unit.php?unit=TXKw1%3B0>
- Korenfeld Fedrman David. (2013). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5327360&fecha=20/12/2013#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5327360&fecha=20/12/2013#gsc.tab=0)
- López Palominio, I. (2016). *Léxico Estratigráfico de México: Formación Austin.*
- Luege Tamargo, J. L. (2007). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4996252&fecha=13/08/2007#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4996252&fecha=13/08/2007#gsc.tab=0)

- Luege Tamargo, J. L. (2009). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*
- Luege Tamargo, J. L. (2011a). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*
- Luege Tamargo, J. L. (2011b). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*
- Martínez Santoyo, G. A. (2022). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*
- Martínez Santoyo, G. A. (2023). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales, Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*
- Martínez Zepeda, L. M. (2012). *Determinación de Caudales Ambientales para ríos de la Cuenca del río San. Juan (México) Mediante la aplicación de métodos hidrológicos.* Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Mehta, A., Podest, E., & McCartney, S. (2020). *El Monitoreo de Aguas Subterráneas Usando Observaciones de las Misiones “Gravity Recovery and Climate Experiment” (GRACE) de la NASA.* <https://gracefo.jpl.nasa.gov/resources/50/how-grace-fo-measures-gravity/>
- Michalzik, D. (1991). Facies sequence of Triassic-Jurassic red beds in the Sierra Madre Oriental (NE Mexico) and its relation to the early opening of the Gulf of Mexico. In *Sedimentary Geology* (Vol. 71).
- Miller Jr., T. G. (2007). *Ciencia ambiental: Desarrollo sostenible, un enfoque integral* (International Thomson, Ed.; 8th ed.).

- Ministerio de agricultura pesca y alimentación. (2003). *Balance de Agua*.
- Monier A, & López Palomino I. (2011). *Léxico Estratigráfico de México Formación Cupido*.
- NASA. (2018). *How GRACE-FO Measures Gravity \_ GRACE-FO*.  
<https://gracefo.jpl.nasa.gov/resources/50/how-grace-fo-measures-gravity/>
- Ndehedehe, C. E., Adeyeri, O. E., Onojeghuo, A. O., Ferreira, V. G., Kalu, I., & Okwuashi, O. (2023). Understanding global groundwater-climate interactions. *Science of the Total Environment*, 904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166571>
- NSF Unidata. (2018, December). *netCDF*. Programas Comunitarios UCAR de La a Corporación Universitaria Para La Investigación Atmosférica y Financiados Por La Fundación Nacional de Ciencias de EE. UU.  
<https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- OMM. (2001). *INTERCAMBIO DE DATOS Y PRODUCTOS HIDROLÓGICOS PRÁCTICA Y POLÍTICA* (Vol. 925). OMN.
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Aguas Subterráneas-Acuíferos*. Sociedad Geográfica de Lima.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, F. (2015). Base referencial mundial del recurso suelo: Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes Sobre Recursos Mundiales de Suelos*. <http://www.fao.org>
- Organización de los Estados Americanos. (1974). *El Salvador-Zonificación Agrícola-Fase I*.  
<http://www.oas.org/usde/publications/Unit/oea34s/begin.htm>
- Piña Arce, & López Palomino. (2007). *Léxico Estratigráfico de México: Formación Agua Nueva*.
- Raducan, G. (2018). *The Impact of Bushfires on Water Quality*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19565.03043>
- Ramírez de la Parra, R. (2018). *Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], a Ley Orgánica de la Administración Pública Federal, Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales,*

*Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua.*

[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php%3Fcodigo%3D5510042%26fecha%3D04/01/2018#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php%3Fcodigo%3D5510042%26fecha%3D04/01/2018#gsc.tab=0)

Ramírez Garza, B., & López Palominio, I. (2009). *Léxico Estratigráfico de México: Formación Buda*.

Ramírez, R. (2013, Septiembre 22). *Balance Hídrico*. Prezi.  
<https://prezi.com/b14wlk8fdz8a/balance-hidrico/>

Remigio Morales, & López Palomino. (2013). *Léxico Estratigráfico de México: Formación Tamaulipas Superior*.

Ruiz Romera, E., & Martínez Santos, M. (2019). Análisis de Precipitación. In *Hidrología Aplicada: Análisis de la precipitación*.

Saaverda, S., & Vallester, E. (2006). *Procedimiento para la Prueba de Percolación*.

Sáenza Pita, & López Palomino. (2010). *Léxico Estratigráfico de México: Grupo Washita*.

Salas, J., Boes, D., & Smith, R. (1982). Estimation of ARMA Models With Seasonal Parameters. In *WATER RESOURCES RESEARCH* (Vol. 18, Issue 4).

Sánchez San Roman, J. (1993). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología: Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrológico*.  
<http://hidrologia.usal.esPág.1>

Sarva, P. (2019). *ClimateSERV Documentation*.

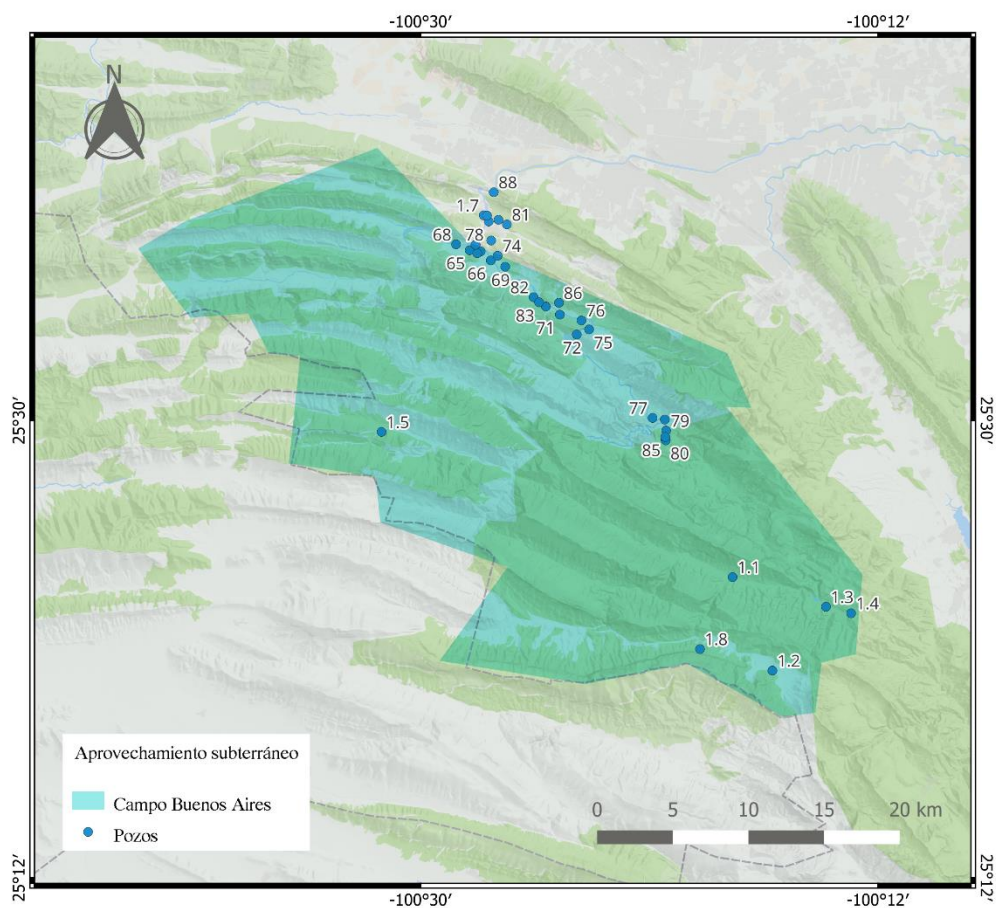
SEMARNAT. (2010). *Atlas Geográfico del medio ambiente y recursos naturales*. Gobierno Federal. [www.gobiernofederal.gob.mx](http://www.gobiernofederal.gob.mx)  
[www.semarnat.gob.mx](http://www.semarnat.gob.mx)

SEMARNAT. (2012). *AGUA*. [www.conagua.gob.mx](http://www.conagua.gob.mx)

Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. In *Water Resources*

- Research* (Vol. 54, Issue 12, pp. 9724–9758). Blackwell Publishing Ltd.  
<https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- Shekhar Prasad, O. C., Sharma, C., Upreti, H., Arora, H., & Neema, M. (2015). *Climate Change and Sustainable Water Resource Management*. 6–19.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4213.6722>
- Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterránea. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Campo Buenos Aires (1907), Estado de Nuevo León*.
- Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Campo Buenos Aires (1907), Estado de Nuevo León*.
- Universidad de Granada. (2014). *Precolación: cambio de fase geométrico*.
- Water Resource Associates. (2024). *Servicio de datos CHIRPS*.  
<https://www.watres.com/CHIRPS/>
- Watkins, K. (2007). *Informe sobre desarrollo Humano 2007-2008: Lucha contra el cambio climático: Solidaridad frente a un mundo dividido* (Green Ink Inc., Ed.). Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
- Wilderer, P., Su, Z., Roebeling, R., Schulz, J., Holleman, I., Levizzani, V., Timmermans, W., Rott, H., Mognard-Campbell, N., de Jeu, R., Wagner, W., Rodell, M., Salama, M., Parodi, G., & Wang, L. (2011). *Observation of Hydrological Processes Using Remote Sensing*. <https://doi.org/.B----.->

## 8. Anexo



| ID  | Uso       | Fecha de registro | VEAN    | Latitud   | Longitud        | Municipio      | Vol. (m3/año) |
|-----|-----------|-------------------|---------|-----------|-----------------|----------------|---------------|
| 1.1 | Agrícola  | 26/09/2022        | 30000   | 25.397223 | -<br>100.295278 | Santiago       | 30000         |
| 1.2 | Agrícola  | 22/03/2022        | 7702.2  | 25.335857 | -<br>100.269177 | Santiago       | 7702.2        |
| 1.3 | Doméstico | 02/04/2014        | 1095    | 25.37775  | -<br>100.234056 | Santiago       | 1095          |
| 1.4 | Doméstico | 16/03/2012        | 1100    | 25.373472 | -<br>100.217556 | Santiago       | 1100          |
| 1.5 | Doméstico | 11/06/2007        | 864     | 25.4925   | -<br>100.525556 | Santa Catarina | 864           |
| 1.6 | Agrícola  | 21/02/2006        | 86100   | 25.610944 | -<br>100.460556 | Santa Catarina | 86100         |
| 1.7 | Agrícola  | 10/07/2003        | 10613.5 | 25.634611 | -<br>100.458528 | Santa Catarina | 10613.5       |

|     |                 |            |           |            |                 |                |         |
|-----|-----------------|------------|-----------|------------|-----------------|----------------|---------|
| 1.8 | Diferentes Usos | 17/05/2001 | 440       | 25.35      | -<br>100.316667 | Santiago       | 440     |
| 1.9 | Agrícola        | 21/02/2000 | 25297.8   | 25.335841  | -100.26917      | Santiago       | 25297.8 |
| 65  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6116667 | -<br>100.467778 | Santa Catarina | 2137195 |
| 66  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.605     | -<br>100.453889 | Santa Catarina | 2730860 |
| 67  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6097222 | -<br>100.462778 | Santa Catarina | 3561991 |
| 68  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6155556 | -<br>100.476667 | Santa Catarina | 0       |
| 69  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6008333 | -<br>100.444444 | Santa Catarina | 2635873 |
| 70  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5747222 | -<br>100.417778 | Santa Catarina | 4963041 |
| 71  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5694444 | -<br>100.408611 | Santa Catarina | 3087059 |
| 72  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5563889 | -100.3975       | Santa Catarina | 0       |
| 73  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5005556 | -<br>100.339722 | Santa Catarina | 0       |
| 74  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6080556 | -<br>100.449444 | Santa Catarina | 2089702 |
| 75  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5597222 | -<br>100.389444 | Santa Catarina | 0       |
| 76  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5655556 | -<br>100.394444 | Santa Catarina | 2137195 |
| 77  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5016667 | -<br>100.347778 | Santa Catarina | 0       |
| 78  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6305556 | -<br>100.455278 | Santa Catarina | 4820561 |
| 79  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.4933333 | -<br>100.338889 | Santa Catarina | 0       |
| 80  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.4869444 | -<br>100.339167 | Santa Catarina | 0       |
| 81  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6286111 | -<br>100.443333 | Santa Catarina | 2065955 |
| 82  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5808333 | -<br>100.425833 | Santa Catarina | 0       |
| 83  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5775    | -<br>100.422222 | Santa Catarina | 3870697 |
| 84  | Publico Urbano  | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6316667 | -<br>100.448889 | Santa Catarina | 831131  |

|     |                   |            |           |            |                 |                   |          |
|-----|-------------------|------------|-----------|------------|-----------------|-------------------|----------|
| 85  | Publico<br>Urbano | 20/03/2003 | 510288547 | 25.4891667 | -<br>100.339444 | Santa<br>Catarina | 0        |
| 86  | Publico<br>Urbano | 20/03/2003 | 510288547 | 25.5772222 | -<br>100.409167 | Santa<br>Catarina | 0        |
| 87  | Publico<br>Urbano | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6180556 | -<br>100.453611 | Santa<br>Catarina | 2992073  |
| 88  | Publico<br>Urbano | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6497222 | -<br>100.451944 | Santa<br>Catarina | 1092344  |
| 127 | Publico<br>Urbano | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6344444 | -<br>100.456389 | Santa<br>Catarina | 18921600 |
| 128 | Publico<br>Urbano | 20/03/2003 | 510288547 | 25.6152778 | -<br>100.463889 | Santa<br>Catarina | 4730400  |

*Anexo 1. Usos, localización y volumen de m3/año de los pozos encontrados en el acuífero Buenos Aires N.L*