



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua  
subterránea mediante la actualización de un modelo numérico  
del acuífero de San Luis Potosí.**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

Ing. Guadalupe Lizeth Velázquez Zepeda

Asesor:

Dr. Hermann Rocha Escalante

Co-asesor:

Dr. Antonio Cardona Benavides

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2026



19 de junio de 2025

**ING. GUADALUPE LIZETH VELÁZQUEZ ZEPEDA  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Hermann Rocha Escalante y Antonio Cardona Benavides, Asesor y Coasesor del Trabajo de Tesis** que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante la actualización de un modelo numérico en el acuífero de San Luis Potosí"**

Introducción

- I. Antecedentes del acuífero San Luis Potosí, SLP
- II. Modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea
- III. Implementación del modelo numérico del flujo de agua subterránea
- IV. Evaluación ante escenarios futuros de aprovechamiento de agua subterránea
- V. Propuesta de estrategias de gestión sostenible

Conclusiones

Referencias

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**ATENTAMENTE**

  
**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
DIRECTOR.  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo  
-bvlg

**"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

**DECLARACIÓN**

El presente trabajo que lleva por título:

Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante la actualización  
de un modelo numérico en el acuífero de San Luis Potosí

se realizó en el periodo septiembre de 2023 a febrero de 2026 bajo la dirección del Dr. Hermann Rocha Escalante y del co-asesor Dr. Antonio Cardona Benavides.

**Originalidad**

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Guadalupe Lizeth Velázquez Zepeda

---

Firma

# **CRÉDITOS INSTITUCIONALES**

## **PROYECTO:**

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA  
SUBTERRÁNEA MEDIANTE LA ACTUALIZACIÓN DE UN MODELO NUMÉRICO DEL  
ACUÍFERO DE SAN LUIS POTOSÍ.

## **POR:**

GUADALUPE LIZETH VELÁZQUEZ ZEPEDA

## **DESARROLLADO EN:**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

ÁREA CIVIL

ÁREA CIENCIAS DE LA TIERRA

## **FONDOS:**

FIDEICOMISO 18397 MULTAS ELECTORALES CONVOCATORIA 2024-04:  
“CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA  
EN LA REGIÓN DE SAN LUIS POTOSÍ: INTERSECCIONES ENTRE EL DERECHO  
HUMANO AL AGUA Y RIESGO EN LA SALUD”.

RESPONSABLE TÉCNICO: DR. GUILLERMO JAVIER CASTRO LARRAGOITIA.

## **AGRADECIMIENTO:**

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT), POR LA BECA  
NÚMERO 4008084 CVU: 1308703, OTORGADA DURANTE EL

PERIODO OCTUBRE 2023 A SEPTIEMBRE 2025

AL POSGRADO DE MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA Y GESTIÓN DEL AGUA A TRAVÉS  
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC).

A LA COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA A LA DIRECCIÓN LOCAL SAN LUIS POTOSÍ  
POR PROPORCIONARME INFORMACIÓN SOBRE LAS ESTACIONES  
CLIMATOLÓGICAS Y LA BASE DE DATOS DEL REPDA.

## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a todas las personas de este mundo, para que encuentren valor para cumplir sus sueños y los retos que les presente la vida.

Los grandes proyectos no se logran solos, pero basta la iniciativa de una persona para que se pongan en marcha y depende de cada uno para que se ejecuten.

Para todas las mujeres, niñas, madres, hermanas, tías, primas de mi familia y del mundo, que sea un recordatorio de inspiración, que se atrevan a cumplir sus sueños por más lejanos que parezcan, soñar y vivir haciendo lo que uno ama es el mejor regalo de la vida.

A mis padres, Sergio Velázquez Larios y Graciela Zepeda Alcaraz, los pilares que me han guiado y sostenido en mi vida, los honro.

A mis hermanos, Citlali Lizbet Velázquez Zepeda y Sergio Eduardo Velázquez Zepeda, por apoyar cada sueño que tengo.

A mi novio, Manuel Alejandro Valencia González, por acompañarme en cada momento y brindarme las palabras necesarias para afrontar las dificultades.

A mis sobrinos, Melany, Max, Victoria, Valentina, Iker, Santiel, Itzel, Zaid, por recordarme por quienes busco ser mejor cada día.

Homenaje a mis ancestros, a todas las personas que estuvieron antes de mí y las que tengo a mi lado, les honro y agradezco.

## Agradecimientos

Agradezco a mi asesor, el Dr. Hermann Rocha Escalante, por su guía y orientación en toda la maestría, por recordarme que puedo lograr trabajos excepcionales.

Agradezco a mi co-asesor el Dr. Cardona por el apoyo brindado, sus clases y enseñanzas que fueron de gran impacto en mi adoctrinamiento.

Agradezco a mis sinodales el Dr. Jesús López de la Cruz y Dr. Rodolfo Cisneros por su orientación y apoyo durante este proyecto.

Agradezco a mis compañeros de proyecto Mtga. Araceli Jaimes Arredondo, Mtga. Octavio, Lic. Anzhony, Lic. Héctor y al Mtga. Heriberto.

Agradezco a los compañeros de servicio que me apoyaron: Carlos, Salvador, Cruz, Julian, Daniel, Gerardo y Fernanda.

Agradezco a la Dra. María Elena por su guía, apoyo y orientación durante la realización de los análisis de laboratorio.

Agradezco a mis compañeros de generación porque juntos pudimos aprobar el primer semestre, así como terminar la maestría en tiempo y forma, gracias por hacer este viaje más divertido; especialmente a Sisley, Araceli, Angelitos, Ingrid, por apoyarme en los momentos más complicados y recordarme lo importante que es tener buenas amigas.

Agradezco a mis compañeras de universidad, a Cinthia y Alejandra, por recordarme con su ejemplo y enseñanzas que puedo lograr todo aquello que me proponga.

Agradezco a Jorge Mes por brindarme su apoyo con el modelo.

Agradezco a Sergio Cárdenas y a Eduardo Ramírez por motivarme a seguir adelante.

Agradezco a mis amigos de San Luis Potosí, Andrea, Juan Carlos, Deborah, Salma, Juliet, Valeria, Gaby, por estar ahí y animarme cuando lo necesitaba.

Agradezco a todas las personas que me han apoyado a lo largo de este camino.

# Contenido

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción.....                                                                | 2  |
| El agua subterránea en el mundo .....                                            | 2  |
| Contexto de la situación del agua subterránea en México .....                    | 6  |
| Modelos numéricos en agua subterránea .....                                      | 8  |
| I.    Antecedentes del acuífero de San Luis Potosí, SLP.....                     | 9  |
| I.1 Estudios previos del acuífero del Valle de San Luis Potosí .....             | 11 |
| I.2 Problemática .....                                                           | 16 |
| I.3 Justificación .....                                                          | 19 |
| I.4 Hipótesis.....                                                               | 20 |
| I.5 Objetivos .....                                                              | 20 |
| I.5.1 Objetivo general.....                                                      | 20 |
| I.5.2 Objetivos específicos.....                                                 | 20 |
| I.6 Metodología.....                                                             | 21 |
| II.   Modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea .....       | 22 |
| II.1. Características del acuífero de SLP .....                                  | 22 |
| II.1.1 Entorno geográfico .....                                                  | 22 |
| II.1.1.1 Localización .....                                                      | 22 |
| II.1.1.2 Área de modelación .....                                                | 23 |
| II.1.2 Clima .....                                                               | 24 |
| II.1.3 Fisiografía .....                                                         | 25 |
| II.1.4 Geología .....                                                            | 26 |
| II.1.5 Geología del subsuelo .....                                               | 30 |
| II.1.6 Hidrología superficial .....                                              | 32 |
| II.1.7 Edafología.....                                                           | 34 |
| II.1.8 Uso de suelo y vegetación .....                                           | 37 |
| II.2 Hidrogeoquímica.....                                                        | 40 |
| II.2.1 Muestreo de agua .....                                                    | 40 |
| II.2.2 Metodología.....                                                          | 46 |
| II.2.2.1 Toma de muestras de agua subterránea .....                              | 46 |
| II.2.2.2 Medición de los parámetros fisicoquímicos en campo .....                | 49 |
| II.2.2.3 Análisis de laboratorio .....                                           | 55 |
| II.2.3 Resultados de los análisis químicos de campo y laboratorio.....           | 57 |
| II.2.3.1 Validación de resultados (porcentaje de error, balance de cargas) ..... | 62 |
| II.2.3.2 Diagramas de Piper y familias de agua por ion dominante .....           | 63 |
| II.2.4 Calidad del agua subterránea en San Luis Potosí.....                      | 72 |
| II.3 Hidrología superficial .....                                                | 74 |
| II.3.1 Tratamiento previo de los datos meteorológicos.....                       | 74 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| II.3.1.1 Estaciones .....                                                           | 74  |
| II.3.1.2 Análisis de homogeneidad e independencia .....                             | 77  |
| II.3.1.3 Datos faltantes .....                                                      | 79  |
| II.3.2 Estimación de la precipitación media anual y temperatura media anual .....   | 81  |
| II.3.3 Ecurrimiento .....                                                           | 89  |
| II.3.4 Evapotranspiración real .....                                                | 97  |
| II.3.4.1 Método de Turc .....                                                       | 97  |
| II.3.4.2 Método de Coutagne .....                                                   | 97  |
| II.3.5 Infiltración .....                                                           | 100 |
| II.3.6 Balance superficial .....                                                    | 102 |
| II.4. Hidrogeología.....                                                            | 103 |
| II.4.1 Medición de los niveles estáticos .....                                      | 103 |
| II.4.2 Sistemas de flujo de agua subterránea .....                                  | 108 |
| II.4.3 Interacción entre el acuífero somero y profundo.....                         | 112 |
| II.4.4 Extracción de agua mediante pozos de bombeo .....                            | 113 |
| II.4.5 Recarga de agua subterránea .....                                            | 116 |
| II.4.6 Entradas y Salidas de flujo subterráneo.....                                 | 122 |
| II.4.7 Modelo hidrogeológico .....                                                  | 124 |
| II.5. Balance hídrico superficial - subterráneo .....                               | 126 |
| II.6. Modelo conceptual .....                                                       | 127 |
| III. Implementación del modelo numérico del flujo de agua subterránea .....         | 128 |
| III.1. Diseño del modelo numérico .....                                             | 130 |
| III.1.1 Dominio de modelación .....                                                 | 130 |
| III.1.2 Discretización espacial .....                                               | 130 |
| III.1.3 Discretización temporal .....                                               | 133 |
| III.1.4 Unidades hidrogeológicas.....                                               | 133 |
| III.1.5 Condiciones de frontera.....                                                | 135 |
| III.1.6 Entradas y salidas de agua subterránea .....                                | 136 |
| III.1.7 Pozos de observación.....                                                   | 137 |
| III.1.8 Piezometría inicial .....                                                   | 138 |
| III.2. Calibración del modelo numérico .....                                        | 139 |
| III.2.1 Cargas hidráulicas .....                                                    | 139 |
| III.2.2 Balance hídrico.....                                                        | 141 |
| III.2.3 Modelo calibrado .....                                                      | 142 |
| III.2.4 Validación y análisis de sensibilidad .....                                 | 143 |
| IV. Evaluación ante escenarios futuros de aprovechamiento de agua subterránea ..... | 145 |
| IV.1. Modelación de escenarios futuros .....                                        | 145 |
| IV.1.1 Escenario 1: Condiciones de extracción constante .....                       | 145 |

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV.1.2 Escenario 2: Esquema de aprovechamiento en aumento tendencial ..... | 145 |
| IV.2. Resultados de los escenarios futuros .....                           | 146 |
| IV.2.1 Escenario 1. Resultado.....                                         | 146 |
| IV.2.2 Escenario 2. Resultado.....                                         | 148 |
| V. Propuestas de estrategias de gestión sostenible.....                    | 150 |
| V.1. Mejora la calidad de la información .....                             | 150 |
| V.2 Aprovechamiento sostenible .....                                       | 154 |
| V.3 Mejorar la calidad del agua .....                                      | 155 |
| Conclusiones .....                                                         | 156 |
| Limitaciones del modelo .....                                              | 157 |
| Recomendaciones.....                                                       | 158 |
| Referencias.....                                                           | 159 |
| Apéndice digital .....                                                     | 165 |

# Índice de Figuras

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1. VOLÚMENES ESTIMADOS DE AGUA DULCE LÍQUIDA PRESENTES EN LOS DIFERENTES CONTINENTES. FUENTE: UNESCO, 2022.<br>MODIFICADA: VELÁZQUEZ, 2025. .... | 4  |
| FIGURA 2. PROFUNDIDAD MEDIA EQUIVALENTE DEL AGUA. FUENTE: UNESCO, 2022, MODIFICADA: VELÁZQUEZ, 2025.....                                                | 4  |
| FIGURA 3. LAGO URMÍA (1984-2014). FUENTE: NASA,2014 .....                                                                                               | 5  |
| FIGURA 4. DISTRIBUCIÓN DE VOLÚMENES CONCESIONADOS PARA USO CONSUNTIVO. FUENTE: ELABORADO POR EL IMCO CON<br>INFORMACIÓN DEL SINA, 2020. ....            | 6  |
| FIGURA 5. SITUACIÓN DE LOS ACUÍFEROS EN MÉXICO (2018). FUENTE: ELABORADO POR EL IMCO CON INFORMACIÓN DE SEMARNAT,<br>2018. ....                         | 7  |
| FIGURA 6. POBLACIÓN TOTAL DE SAN LUIS POTOSÍ (1900-2020) FUENTE: INEGI (2020) .....                                                                     | 16 |
| FIGURA 7. COMPARACIÓN DEL CRECIMIENTO ENTRE POBLACIÓN Y LA EXTRACCIÓN EN LOS POZOS (CARRILLO-RIVERA ET AL. 2002A,<br>PDUSLP, 2000). ....                | 17 |
| FIGURA 8. EXTRACCIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA EN SAN LUIS POTOSÍ (1994-2024). FUENTE: REPDA (2024). ....                                                     | 18 |
| FIGURA 9. MAPA DE LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....                                                                                              | 22 |
| FIGURA 10. MAPA DEL ÁREA DE MODELACIÓN .....                                                                                                            | 23 |
| FIGURA 11. MAPA DEL CLIMA .....                                                                                                                         | 24 |
| FIGURA 12. MAPA DE FISIOGRAFÍA. ....                                                                                                                    | 25 |
| FIGURA 13 MAPA DE GEOLOGÍA.....                                                                                                                         | 26 |
| FIGURA 14. MAPA DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....                                                                                                       | 31 |
| FIGURA 15. CONTEXTO HIDROLÓGICO .....                                                                                                                   | 32 |
| FIGURA 16. MAPA DE ESCORRENTÍAS EN LA REGIÓN DE ESTUDIO.....                                                                                            | 33 |
| FIGURA 17. CANALES DE AGUA SUPERFICIAL EN LA REGIÓN DE ESTUDIO. ....                                                                                    | 33 |
| FIGURA 18. MAPA DE EDAFOLOGÍA. FUENTE: (INIFAP & CONABIO, 1995).....                                                                                    | 34 |
| FIGURA 19. MAPA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN. FUENTE: (INEGI, 2021) .....                                                                               | 37 |
| FIGURA 20. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS. ....                                                                                                   | 41 |
| FIGURA 21. TIPO DE APROVECHAMIENTO VS USO DEL AGUA DE LAS MUESTRAS OBTENIDAS. ....                                                                      | 45 |
| FIGURA 22. DETALLE DE LA JERINGA Y PORTAFILTRO UTILIZADOS EN EL FILTRADO DE LA MUESTRA DE AGUA. ....                                                    | 47 |
| FIGURA 23. FOTOGRAFÍAS DE LA TOMA DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA. ....                                                                                 | 48 |
| FIGURA 24. EJEMPLO DE FORMATO DE CAMPO UTILIZADO. ....                                                                                                  | 50 |
| FIGURA 25. EQUIPO ICP-OES ICAP 700 SERIES, MODELO ICAP DEL LABORATORIO DE GEOQUÍMICA DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA,<br>UASLP.....                           | 55 |
| FIGURA 26. ESPECTROFOTÓMETRO UV-VISIBLE CARY 50 CONC. ....                                                                                              | 56 |
| FIGURA 27. DIAGRAMA DE CAJAS Y BIGOTES PARA EL PORCENTAJE DE ERROR.....                                                                                 | 62 |
| FIGURA 28. DIAGRAMA DE PIPER DE LOS POZOS ANALIZADOS.....                                                                                               | 63 |
| FIGURA 29. DIAGRAMA DE PIPER DE LAS NORIAS ANALIZADAS. ....                                                                                             | 64 |
| FIGURA 30. FAMILIAS DE AGUA EN LOS POZOS.....                                                                                                           | 65 |
| FIGURA 31. FAMILIAS DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO SOMERO .....                                                                                     | 66 |
| FIGURA 32. MAPA DE FAMILIAS DE AGUA POR ION DOMINANTE DE LOS POZOS MUESTREADOS.....                                                                     | 67 |
| FIGURA 33. MAPA DE TEMPERATURAS DEL ACUÍFERO PROFUNDO. ....                                                                                             | 68 |
| FIGURA 34. MAPA DE LITIO. ....                                                                                                                          | 69 |
| FIGURA 35. MAPA DE NITRÓGENO DE NITRATOS 2024. ....                                                                                                     | 70 |
| FIGURA 36. MAPA DE NITRÓGENO DE NITRATOS, HISTÓRICOS. ....                                                                                              | 71 |
| FIGURA 37. DIAGRAMA DEL PROCESO PARA EL BALANCE HIDROLÓGICO SUPERFICIAL .....                                                                           | 74 |
| FIGURA 38. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE LA CONAGUA EN LA REGIÓN DE ESTUDIO. ....                                                    | 75 |
| FIGURA 39. INTERPOLACIÓN IDW -ISOYETAS .....                                                                                                            | 82 |
| FIGURA 40. CARACTERÍSTICAS DE INTERPOLACIÓN -ISOYETAS .....                                                                                             | 82 |
| FIGURA 41. EXTENSIÓN DE LA ZONA INTERPOLADA - ISOYETAS.....                                                                                             | 83 |
| FIGURA 42. EXTRACCIÓN POR MASCARA DEL RASTER - ISOYETAS .....                                                                                           | 83 |
| FIGURA 43. RECLASIFICACIÓN DEL RASTER - ISOYETAS. ....                                                                                                  | 84 |
| FIGURA 44. CONVERTIRLO A POLÍGONO - ISOYETAS .....                                                                                                      | 84 |
| FIGURA 45. CÁLCULO DE ÁREA POR RANGO DE VALORES - ISOYETAS.....                                                                                         | 85 |
| FIGURA 46. COLOCACIÓN DEL RANGO POR CÓDIGO DE RECLASIFICACIÓN - ISOYETAS. ....                                                                          | 86 |
| FIGURA 47. ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN DEL AÑO 2015. ....                                                                                                 | 88 |
| FIGURA 48. ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN DEL AÑO 2000. ....                                                                                                 | 88 |
| FIGURA 49. CÁLCULO DE RASTER .....                                                                                                                      | 90 |
| FIGURA 50. RASTER A POLÍGONO.....                                                                                                                       | 91 |
| FIGURA 51. VALORES DE N.....                                                                                                                            | 91 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 52. MAPA DE NÚMERO DE CURVA (NC).....                                                                                                          | 94  |
| FIGURA 53. COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS DE LOS MÉTODOS DE EVAPOTRANSPIRACIÓN (1970-2024). ....                                                       | 98  |
| FIGURA 54. BALANCE SUPERFICIAL (1970-2024) EN LA REGIÓN DE ESTUDIO. ....                                                                              | 102 |
| FIGURA 55. DISTRIBUCIÓN DE NIVELES "COLGADOS" DE AGUA SUBTERRÁNEA CON RESPECTO AL NIVEL REGIONAL DE UN ACUÍFERO LIBRE.<br>FUENTE: CONAGUA, 2015. .... | 103 |
| FIGURA 56. DISEÑO DE Sonda PARA MEDIR NIVELES. ....                                                                                                   | 105 |
| FIGURA 57. MEDICIÓN DE NIVEL, CON Sonda DE NIVEL PARA POZO CONVENCIONAL.....                                                                          | 106 |
| FIGURA 58. MEDICIÓN DE NIVEL, CON Sonda DE NIVEL CREADA. ....                                                                                         | 106 |
| FIGURA 59. MEDICIÓN DE NIVELES, PIEZOMETRÍA ACTUALIZADA .....                                                                                         | 107 |
| FIGURA 60. MAPA DE PIEZOMETRÍA AÑOS 2004 Y 2006, ACUÍFERO SOMERO (FUENTE: KRIENEN, 2018; MODIFICADOS: VELAZQUEZ,<br>2026) . ....                      | 108 |
| FIGURA 61. MAPA DE ACTUALIZACIÓN DE EQUIPOTENCIALES DEL ACUÍFERO SOMERO DE LOS AÑOS 2024 Y 2025. ....                                                 | 109 |
| FIGURA 62. MAPA DE PIEZOMETRÍA, AÑOS 2005 Y 2007, ACUÍFERO PROFUNDO. ....                                                                             | 110 |
| FIGURA 63. MAPA DE EQUIPOTENCIALES ACTUALIZADOS DEL ACUÍFERO PROFUNDO AÑO 2024 Y 2025. ....                                                           | 111 |
| FIGURA 64. ESQUEMA DE LAS CAPAS EN LA CUENCA DE SLP (FUENTE: HEIMING, 2016; MODIFICADA: VELÁZQUEZ, 2025) .....                                        | 112 |
| FIGURA 65. VOLUMEN ACUMULADO DE CONCESIONES. FUENTE: REPDA, 2024.....                                                                                 | 114 |
| FIGURA 66. MAPA DE CONCESIONES. FUENTE: REPDA, 2024. ....                                                                                             | 114 |
| FIGURA 67. EXTRACCIÓN POR BOMBEO REPDA (2024) - ZONAS DE TEMPERATURA. ....                                                                            | 115 |
| FIGURA 68. MAPA DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN PROMEDIO (1970-2024) .....                                                                             | 117 |
| FIGURA 69. MAPA DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PROMEDIO (1970-2024).....                                                                                       | 118 |
| FIGURA 70. MAPA DE INFILTRACIÓN PROMEDIO (1970-2024).....                                                                                             | 119 |
| FIGURA 71. BALANCE HIDROLÓGICO SUBTERRÁNEO. ....                                                                                                      | 125 |
| FIGURA 72. BALANCE HÍDRICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO.....                                                                                             | 126 |
| FIGURA 73. MODELO CONCEPTUAL DE LA CUENCA DE SAN LUIS POTOSÍ. (FUENTE: KRIENEN, 2018; MODIFICADO: VELÁZQUEZ, 2025)<br>.....                           | 127 |
| FIGURA 74. MAPA COMPARATIVO DE DOMINIOS RESPECTO A LOS MODELOS PREVIOS. ....                                                                          | 129 |
| FIGURA 75. PLANTA DE LA DISCRETIZACIÓN ESPACIAL. ELABORADA MEDIANTE FEFLOW.....                                                                       | 130 |
| FIGURA 76. CORTE TRANSVERSAL, MOSTRANDO LAS CAPAS DEL MODELO Y SUS ELEVACIONES. ELABORADO MEDIANTE FEFLOW. ....                                       | 131 |
| FIGURA 77. IDENTIFICACIÓN DE LAS CAPAS Y SUS ELEVACIONES. ELABORADO MEDIANTE FEFLOW.....                                                              | 131 |
| FIGURA 78. NOMBRAMIENTO DE CADA SUPERFICIE Y CAPA GENERADA. ELABORADO EN FEFLOW. ....                                                                 | 132 |
| FIGURA 79. SECCIÓN TIPO DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (FUENTE: HEIMING,2016; MODIFICADO: VELÁZQUEZ, 2026).....                                          | 133 |
| FIGURA 80. CONDUCTIVIDADES HIDRÁULICAS EN X (Kxx), VISTA EN 3D. ELABORADO EN FEFLOW. ....                                                             | 134 |
| FIGURA 81. RECARGA EN LA SUPERFICIE. ELABORADO EN FEFLOW. ....                                                                                        | 135 |
| FIGURA 82. FLUJO VERTICAL ASCENDENTE. ELABORADO EN FEFLOW. ....                                                                                       | 135 |
| FIGURA 83. CONDICIÓN DE BORDE DE NEUMAN .....                                                                                                         | 136 |
| FIGURA 84. UBICACIÓN DE LOS POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....                                                                            | 137 |
| FIGURA 85. POZOS DE OBSERVACIÓN, AÑO 2005.....                                                                                                        | 137 |
| FIGURA 86 CARGAS HIDRÁULICAS INICIALES DEL MODELO (Año 2005).....                                                                                     | 138 |
| FIGURA 87. CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2005, DÍA 4,196. ....                                                                                              | 140 |
| FIGURA 88. CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2007, DÍA 4,926. ....                                                                                              | 140 |
| FIGURA 89. CALIBRACIÓN AÑO 2024, DÍA 11,207.....                                                                                                      | 141 |
| FIGURA 90. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO, AÑO 2025, DÍA 11,428.....                                                                                  | 143 |
| FIGURA 91. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR .....                                                         | 144 |
| FIGURA 92. VOLUMEN DE EXTRACCIONES ACUMULADO DEL REPDA (PERIODO: 2017 AL 2024).....                                                                   | 145 |
| FIGURA 93. EQUIPOTENCIALES ESCENARIO 1, AÑO 2040 Y 2060.....                                                                                          | 146 |
| FIGURA 94. ABATIMIENTOS ESCENARIO 1, RESPECTO AL 2024, AÑOS 2040 Y 2060 .....                                                                         | 147 |
| FIGURA 95. EQUIPOTENCIALES ESCENARIO NO. 2 AÑOS 2040 Y 2060. ....                                                                                     | 148 |
| FIGURA 96. ABATIMIENTO EN EL ESCENARIO NO. 2, RESPECTO AL 2024, AÑOS 2040 Y 2060.....                                                                 | 149 |
| FIGURA 97. COMPARATIVA ENTRE LAS MEDICIONES DE NIVELES. ....                                                                                          | 151 |
| FIGURA 98. MAPA DE RED DE MONITOREO DEL MUESTREO 2024 - 2025. ....                                                                                    | 152 |

# Índice de Tablas

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS CLIMAS PRESENTES EN LA REGIÓN DE ESTUDIO. FUENTE: INEGI, 2002. ....                                                          | 24  |
| TABLA 2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL. ....                                                                                                                          | 30  |
| TABLA 3. EDAFOLOGÍA (PORCENTAJE DE ÁREA) ....                                                                                                                | 34  |
| TABLA 4. USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (PORCENTAJE) ....                                                                                                         | 37  |
| TABLA 5. SITIOS DONDE SE RECOLECTARON LAS MUESTRAS DE AGUA.....                                                                                              | 42  |
| TABLA 6. MATERIALES UTILIZADOS PARA LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS EN CAMPO Y SU PRESERVACIÓN. ....                                                             | 46  |
| TABLA 7. RESUMEN DE RESULTADO DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS TOMADOS EN CAMPO. ....                                                                        | 51  |
| TABLA 8. RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO, QUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA.....                                                                               | 58  |
| TABLA 9. FAMILIAS DE AGUA POR ION DOMINANTE EN POZOS.....                                                                                                    | 65  |
| TABLA 10. FAMILIAS DE AGUA POR IÓN DOMINANTE EN NORIAS ....                                                                                                  | 66  |
| TABLA 11. INFORMACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS DE CONAGUA ANALIZADAS. ....                                                                           | 76  |
| TABLA 12. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE HOMOGENEIDAD E INDEPENDENCIA. ....                                                                                    | 78  |
| TABLA 13. PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE ISOYETAS DE PRECIPITACIÓN (1970-2024). ....                                                             | 87  |
| TABLA 14. CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE LOS TIPOS DE SUELOS SEGÚN SU PERMEABILIDAD. FUENTE: DOMÍNGUEZ MORA ET AL., 2008.<br>MODIFICADA: VELÁZQUEZ, 2025. .... | 92  |
| TABLA 15. NÚMERO DE CURVA SEGÚN LA COBERTURA DEL SUELO. FUENTE: DOMÍNGUEZ MORA ET AL., 2008. MODIFICADA: VELÁZQUEZ,<br>2025. ....                            | 93  |
| TABLA 16. RESULTADOS DE LA PRECIPITACIÓN EFECTIVA (Pe), EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO (Ce) Y LA ESCORRENTÍA (E), PERIODO<br>1970-2024. ....                | 95  |
| TABLA 17. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN, MÉTODO DE TURC, PERIODO 1970-2024.....                                                                           | 99  |
| TABLA 18. CÁLCULO DE LA INFILTRACIÓN PARA EL PERIODO DE 1970 AL 2024. ....                                                                                   | 101 |
| TABLA 19. TÉCNICAS DE MEDICIÓN DEL NIVEL DE AGUA SUBTERRÁNEA. FUENTE: CONAGUA, 2015. ....                                                                    | 104 |
| TABLA 20. VOLÚMENES CONCESIONADOS 1994-2024. FUENTE: REPDA (2024). ....                                                                                      | 113 |
| TABLA 21. CAUDAL DE EXTRACCIÓN POR TIPO DE USO URBANO. ....                                                                                                  | 120 |
| TABLA 22. CAUDAL DE EXTRACCIÓN PARA CADA USO AGRÍCOLA ....                                                                                                   | 121 |
| TABLA 23. BALANCE HIDROLÓGICO SUBTERRÁNEO. ....                                                                                                              | 124 |
| TABLA 24. COMPARATIVA ENTRE MODELOS PREVIOS. ....                                                                                                            | 128 |
| TABLA 25. PROPIEDADES INICIALES DEL MODELO. ....                                                                                                             | 134 |
| TABLA 26. BALANCE HÍDRICO EN MODELO TRANSITORIO, 2025.....                                                                                                   | 141 |
| TABLA 27. PROPIEDADES DE LOS MEDIOS GEOLÓGICOS CALIBRADOS. ....                                                                                              | 142 |
| TABLA 28. BALANCE ESCENARIO 1. ....                                                                                                                          | 147 |
| TABLA 29. BALANCE ESCENARIO 2. ....                                                                                                                          | 149 |
| TABLA 30. RED DE MONITOREO DE POZOS, MUESTREO 2024-2025. ....                                                                                                | 153 |

## Resumen

El agua subterránea tiene una gran relevancia como fuente de abastecimiento en el país, sobre todo en las zonas áridas del norte, siendo un ejemplo el estado de San Luis Potosí, especialmente la zona conurbada de la capital potosina. Presenta una gran problemática hídrica de abastecimiento, saneamiento y calidad del agua; el acuífero somero se encuentra contaminado por la acción antropogénica y el acuífero profundo por la contaminación natural de la interacción agua-roca.

Los modelos numéricos permiten representar las condiciones del acuífero de la mejor manera siendo las ecuaciones de flujo de aguas subterráneas, lo que permite tener un panorama más real de las condiciones del sitio de estudio y así conocer las zonas de mejor aprovechamiento en cuanto a calidad y cantidad.

La región de estudio consta de los municipios de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro, Soledad de Graciano Sánchez, Armadillo de los Infantes, Villa Hidalgo, Mexquitic de Carmona, Villa de Arriaga, Villa de Reyes, Zaragoza, Ahualulco y Villa de Arista. Considera la interrelación de la cuenca superficial con los flujos de agua subterránea, por ello se tomó como límite en la parte este y oeste por el parteaguas de la cuenca, en la parte norte y sur se le hizo un incremento en la cuenca de 10 km para lograr esa área.

Este trabajo permitió evaluar el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea ante diversos escenarios futuros mediante un modelo numérico del acuífero de San Luis Potosí, mediante el programa FEFLOW 7.0, basándose en el modelo previo de (Krienen, 2018).

La precipitación media anual para el periodo de 1970-2024 se realizó con el método de isoyetas, resultando un valor de 403 mm, el escurrimiento corresponde a 313 mm, la infiltración a 9 mm y la evapotranspiración 79 mm. Se realizó el muestreo de calidad entre agua superficial y subterránea de 126 sitios para la interpretación hidrogeoquímica para identificar los flujos subterráneos. Así mismo se realizó la actualización de 50 niveles estáticos y dinámicos del acuífero somero y profundo, todo aunado a la alimentación del modelo conceptual y del modelo.

Para implementación del modelo numérico en el programa se consideró un área de modelación de 2,571.91 km<sup>2</sup>, con 643,860 prismas triangulares de 0.048 km<sup>2</sup> en promedio. Se calibró con los datos de 2005, 2007 y 2024, se validó con los datos de 2025. Los escenarios futuros a 2040 y 2060 muestran un incremento en las extracciones, zonas constantes sin abatimientos, sin embargo, se debe resaltar que no presenta resultados concluyentes por la falta de datos para la calibración del modelo en los años presentes, así mismo se puede inferir que el poco entendimiento del flujo regional, así como las extracciones son variables clave.

El modelo presenta el panorama completo del modelo conceptual; se consideraron la mayor parte de las características físicas de la región de estudio. Se propuso una red de monitoreo de niveles para darle continuidad a la generación de información de calidad.

# Introducción

## El agua subterránea en el mundo

El agua, elemento esencial para la vida, que se ha dado por sentado como recurso infinito. Se ha asumido su disponibilidad ilimitada, como si nos perteneciera, y esto nos ha llevado a las crisis hídricas más graves de la historia. La alteración del ciclo natural del agua exige que se cambie radicalmente la percepción: hoy, el agua debe ser comprendida y gestionada como un recurso finito, siendo su prioridad absoluta la preservación de la vida (Grupo Universitario del Agua, 2025).

A pesar de la abundancia de agua en el planeta, cerca de dos mil millones de personas a nivel mundial carecen de acceso a agua potable segura; tres mil seiscientos millones no disponen de servicios de saneamiento apropiados y alrededor de dos mil trescientos millones no cuentan con instalaciones adecuadas para el lavado de manos. Las desigualdades en el acceso al agua y al saneamiento, junto con el aumento de la población, el uso excesivo del recurso hídrico, la creciente variabilidad de las lluvias y la contaminación, convergen en numerosos territorios, convirtiendo al agua en uno de los principales desafíos para el crecimiento económico, la reducción de la pobreza y el desarrollo sostenible (Grupo Banco Mundial, 2024).

El agua que se encuentra de forma natural bajo la superficie terrestre se llama agua subsuperficial, esté en la zona saturada o no saturada (sin incluir el agua en tuberías). El agua que está en la zona saturada, bajo el nivel freático, se denomina agua subterránea (Price, 2007).

¿Por qué es importante el agua subterránea? Una de las razones es que, en muchas regiones es la única fuente de abastecimiento de agua, asimismo representa una porción importante de los recursos potenciales de agua que existen en el planeta (Price, 2007).

Se estima que la cantidad total de agua que existe en la Tierra es un poco más de 1,400 millones de kilómetros cúbicos (km<sup>3</sup>). De este volumen, cerca del 95 % es agua de mar, un 2 % del total se encuentra en forma sólida en los glaciares y casquetes polares. Virtualmente toda el agua restante es agua subterránea, entre 7 y 60 millones de km<sup>3</sup> aproximadamente. El agua en ríos y lagos, en la atmósfera y en la zona no saturada, comprende en conjunto sólo 1/50 de 1 % del agua total susceptible como recurso para abastecimiento (Price, 2007).

Las aguas subterráneas representan aproximadamente el 99 % del agua dulce líquida de la Tierra. Estas aguas están distribuidas por todo el planeta, aunque de forma desproporcional. Tienen potencial de proporcionar enormes beneficios sociales, económicos y medioambientales a las sociedades, incluida la adaptación al cambio climático (UNESCO, 2022).

Escondidos bajo la superficie se encuentran depósitos de agua subterránea (acuíferos) en espacios abiertos y en oquedades de las rocas y materiales geológicos del subsuelo. Los acuíferos son la fuente de abastecimiento de agua potable para la mayor parte de la población rural mundial y constituyen un recurso vital especialmente en regiones áridas e islas, donde suelen ser el único recurso asequible de agua potable. Son también indispensables para mantener la humedad del suelo, el nivel de agua de los lagos, el flujo base de los ríos y los humedales. El agua subterránea

extraída de un acuífero por medio de los pozos y manantiales es la mayor fuente de abastecimiento para las aguas minerales embotelladas (Moore et al., 2005).

Los sistemas de flujo de agua subterránea proporcionan la mitad del volumen de agua extraída para uso doméstico por la población mundial y alrededor del 25 % del agua extraída para irrigación, sirviendo al 38 % de las tierras de regadío del mundo. Pese a su importancia, este recurso natural es a menudo poco estudiado y, en consecuencia, infravalorado, mal gestionado e incluso abusado. En el contexto actual de la creciente escasez de agua en muchas partes del planeta, se debe hacer algo respecto al enorme potencial de las aguas subterráneas y la necesidad de gestionarlas cuidadosamente (UNESCO, 2022).

La demanda de agua en el planeta ha aumentado por un factor de seis en los últimos 100 años. La Organización para la Cooperación Económica y el Desarrollo (OCDE) en 2017 concluyó que la demanda aumentará un 55 % en el mundo entre 2000 y 2050. Hay que recordar que aunque normalmente el tema se ha centrado principalmente en las necesidades humanas, el agua es necesaria para el funcionamiento de los ecosistemas; sin ella estos se degradan, pierden su biodiversidad y con ello se afecta su funcionalidad y equilibrio (IMCO, 2023).

Uno de los retos que presenta el agua subterránea sucede cuando la descarga supera la recarga. Ahora sabemos que la variabilidad del clima y el cambio climático pueden influir; sin embargo, la mayoría de los casos de agotamiento de agua subterránea a largo plazo son consecuencia de la extracción intensiva. El ritmo de agotamiento del almacenamiento global de aguas subterráneas es alarmante: para principios del presente siglo, las estimaciones se sitúan en su mayoría entre 100 y 200 km<sup>3</sup>/año (aproximadamente entre el 15 y el 25 % de las extracciones totales) (UNESCO, 2022).

La dependencia de las aguas subterráneas de innumerables ciudades se ha incrementado; se estima que casi el 50 % de la población urbana mundial se abastece actualmente de esta fuente de agua (UNESCO, 2022).

El impacto de un saneamiento inadecuado en las aguas subterráneas se observa en las áreas urbanas donde la cobertura del alcantarillado principal es baja y la mayoría de los residuos fecales domésticos se vierten en letrinas de pozos. Los organismos de agua deben hacer hincapié en la protección de sus fuentes, mediante la restricción de la agricultura y la construcción de viviendas en sus zonas de captación de aguas subterráneas, con el fin de proteger la salud pública y disminuir el costo del abastecimiento de agua (UNESCO, 2022).

Las aguas subterráneas deben ser controladas a lo largo del tiempo tanto en cantidad como en calidad, con el fin de entender el comportamiento y el estado de los acuíferos para así identificar posibles cambios como el aprovechamiento intensivo, la disminución de la recarga y la contaminación. Otro punto importante es que la recarga de las aguas subterráneas suele estimarse en lugar de medirse. Además, los acuíferos altamente vulnerables que presentan servicios socioambientales deben ser objeto de un continuo monitoreo (UNESCO, 2022).

Las variaciones de los volúmenes de agua dulce a lo largo del tiempo, como las causadas por la variación climática estacional, el cambio climático y el aprovechamiento intensivo, no tienen, durante el tiempo de vida de un ser humano, ningún efecto apreciable en los volúmenes mostrados

en las Figuras 1 y 2. Sin embargo, dentro del mismo marco temporal, tienen impactos drásticos a escala local o regional. Algunos ejemplos son: a) la reducción de lagos como el Lago Chad, el Mar de Aral, el Lago Urmia, el Gran Lago Salado y el Lago Poopó (Wurtsbaugh et al., 2017); b) la desaparición de números manantiales en todo el mundo; la disminución de los caudales en ríos como el Río Amarillo, el Ganges, el Río Grande, el Congo y el Murray-Darling (Shi et al., 2019); y c) el descenso constante de los niveles de agua subterránea en sistemas acuíferos intensamente explotados, como la cuenca del Ganges-Brahmaputra, la llanura del norte de China y el valle central de California (Shamsudduha y Taylor, 2020); (UNESCO, 2022).

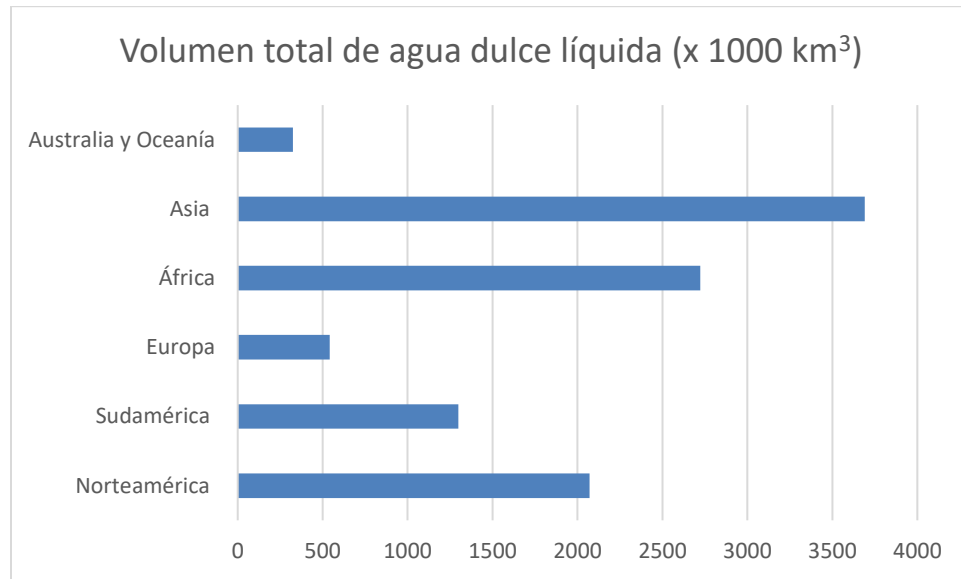


Figura 1. Volúmenes estimados de agua dulce líquida presentes en los diferentes continentes. Fuente: UNESCO, 2022. Modificada: Velázquez, 2025.

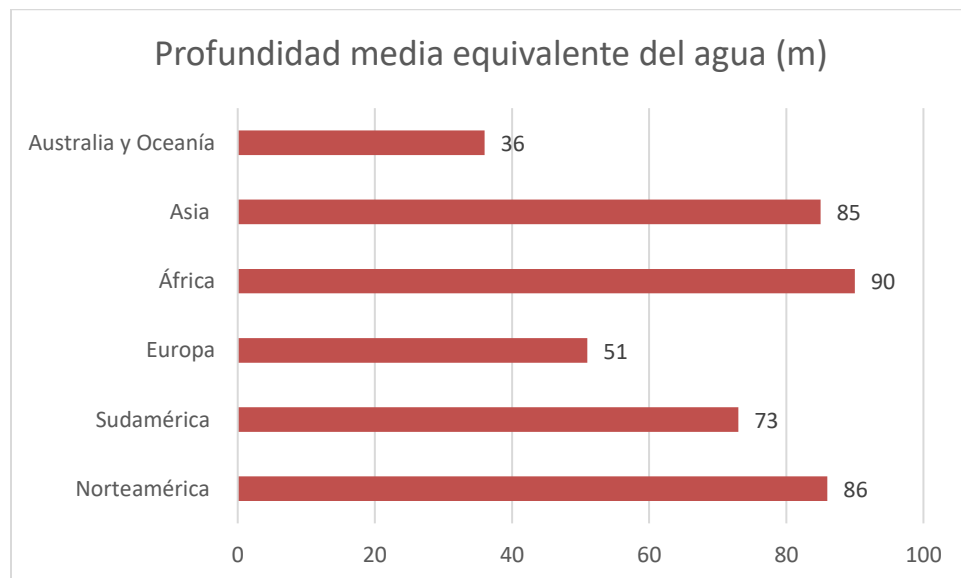


Figura 2. Profundidad media equivalente del agua. Fuente: UNESCO, 2022, Modificada: Velázquez, 2025

En la Figura 3, se observan los efectos de diversos factores que afectan todo el medio ambiente, creando consecuencias significativas para todo tipo de vida. El lago de Urmía en Irán es solo uno de muchos ejemplos mundiales.



Fotos a vista de satélite del lago Urmía. A la izquierda, en 1984; a la derecha, en 2014. © NASA

*Figura 3. Lago Urmía (1984-2014). Fuente: NASA, 2014*

## Contexto de la situación del agua subterránea en México

Entre 1950 y 2022 la población mundial incrementó de 2.6 millones a 8 millones de personas, y se estima que para 2050 llegue a 10 mil millones. Actualmente, México es el décimo país más poblado del mundo con 130.1 millones de habitantes. El crecimiento demográfico y económico junto con el cambio en la forma de consumo, ha incrementado el uso global de agua en un 1 % anual (IMCO, 2023).

Durante los últimos 70 años, la población en México se ha cuadruplicado; la mayoría vive en zonas urbanas (79 % de la población) y el resto en zonas rurales (21 % de la población). Se debe considerar la distribución de la población y su economía por región para definir su asignación por tipo de uso, ya sea para el abastecimiento público, el sector agrícola, la industria o la generación de energía eléctrica (IMCO, 2023).

Los usos del agua se clasifican en dos grandes grupos, el consuntivo, que se refiere al consumo de agua por parte de los diferentes sectores, y el no consuntivo, que involucra el uso de la energía motriz del agua para producir electricidad mediante hidroeléctricas, como se aprecia en la Figura 4. La autoridad responsable de la administración del agua en México es la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA), que publica datos sobre el volumen concesionado por tipos de uso, fuente, entidad federativa y región, entre otras clasificaciones. Aun cuando estos datos son oficiales, el volumen autorizado en una concesión no representa el volumen real de uso, debido al uso sin título de concesión, lo que dificulta la obtención de datos más precisos sobre el volumen real de uso (IMCO, 2023).

En México los volúmenes de agua consumida son reportados a través del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), quien al no tener un control puntual sobre los títulos de concesión no puede identificar el consumo real, únicamente estimarlo (IMCO, 2023).

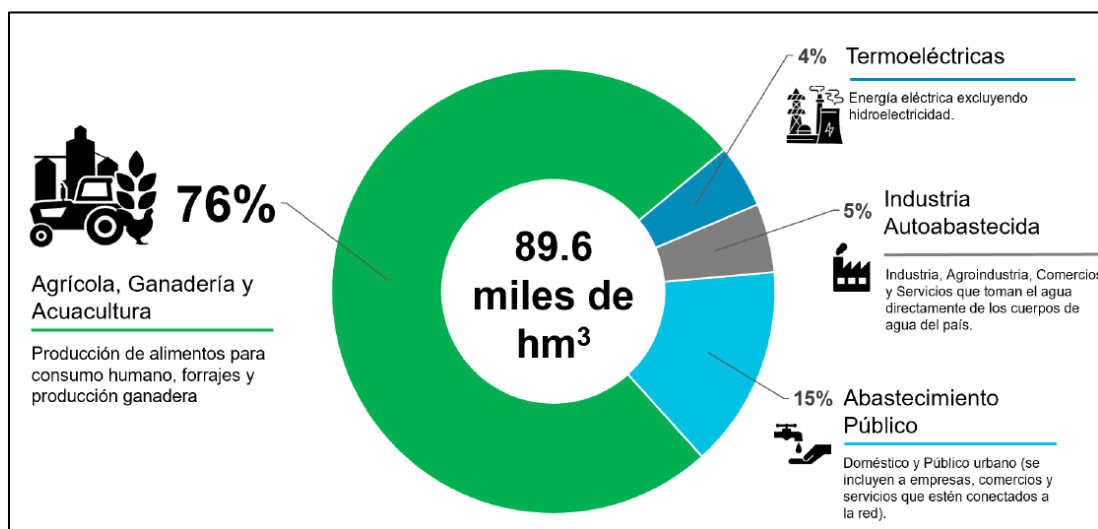


Figura 4. Distribución de volúmenes concesionados para uso consuntivo. Fuente: Elaborado por el IMCO con información del SINA, 2020.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado, corresponde al 39.2 % del volumen total concesionado (34839 hm<sup>3</sup> por año en 2018). El 5 de diciembre de 2001 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación (DOF) los nombres de la división administrativa de los acuíferos del país. A partir de ese momento se inició un proceso de delimitación y estudio de los acuíferos para dar a conocer de manera oficial su disponibilidad media anual, siguiendo la *NOM-011-CONAGUA-2000* (CONAGUA, 2019).

CONAGUA define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados (es decir, tienen un aprovechamiento intensivo) con la relación extracción/recarga; si esta es mayor de 1.1 se considera así (CONAGUA, 2021).

En 2018, 18 % de los acuíferos subterráneos estaban catalogados como sobreexplotados, como se observa en la Figura 5. Esto afecta el abastecimiento público, actividades agropecuarias e industriales, elevando los costos de extracción del líquido y ocasionando hundimientos del terreno. También el 5 % de los acuíferos tuvo problemas de salinización del suelo, lo cual incrementa la concentración de sales y minerales de las aguas subterráneas y se deterioran los parámetros de calidad. Aunado a ello, el 3 % de los acuíferos presentan intrusión marina (IMCO, 2023).

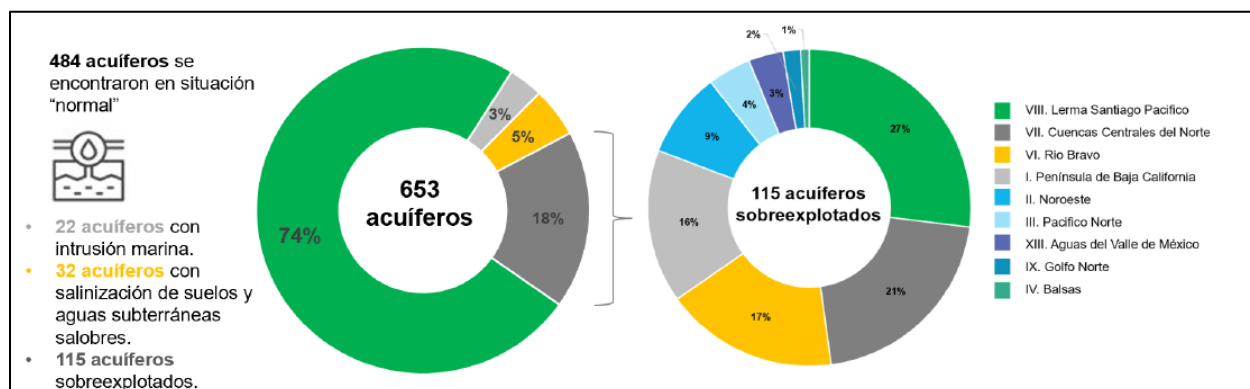


Figura 5. Situación de los acuíferos en México (2018). Fuente: Elaborado por el IMCO con información de SEMARNAT, 2018.

IMCO (2023) propone una división de acuíferos en base a criterios geofísicos y así evaluar y actualizar la delimitación de los acuíferos.

## **Modelos numéricos en agua subterránea**

Anderson et al. (2015) como se citó en Mex Meneses (2023) menciona que un modelo es una representación simplificada del complejo mundo natural. Siendo un modelo numérico de agua subterránea la representación matemática de los procesos hidrogeológicos, se requiere realizar simplificaciones para plantear la ecuación fundamental de flujo. Debido a su versatilidad, los modelos de diferencias y elementos finitos son los que se utilizan con mayor frecuencia para resolver problemas de aguas.

Actualmente los conocimientos en hidrogeología, los métodos y herramientas disponibles son adecuados para abordar la mayoría de los problemas de gestión de aguas subterráneas. El desafío se encuentra en la escasez de datos confiables para las evaluaciones de las aguas subterráneas en áreas específicas y los análisis de escenarios. En vista de que todos los acuíferos y sus condiciones de contorno son únicos, es indispensable disponer de evaluaciones de las aguas subterráneas sobre el terreno para poder aplicar políticas y gestionar los recursos hídricos subterráneos con conocimiento de causa (UNESCO, 2022).

La gestión de las aguas subterráneas, en particular los volúmenes y la calidad de la recarga y la abstracción, es de suma importancia para el correcto funcionamiento del sistema. Para una buena gestión del sistema, es esencial conocer y ser capaz de predecir las trayectorias y la velocidad del flujo de agua subterránea a través del acuífero. La modelación numérica de las aguas subterráneas se considera una herramienta para predecir el flujo de aguas subterráneas y el transporte de contaminantes, para simular condiciones que no pueden ser reproducidas a través de experimentos o cuyos resultados deben conocerse a priori. Los resultados de la modelación numérica pueden traducirse entonces en recomendaciones en apoyo de una toma de decisiones racional (Jovanovic et al., 2017).

## **I. Antecedentes del acuífero de San Luis Potosí, SLP**

La crónica del aprovechamiento del agua subterránea en San Luis Potosí es similar a la del resto de zonas áridas y semiáridas de México. Los primeros habitantes de la entonces región conocida como Tangamanga se abastecían del agua de pequeños manantiales estacionales, lo que condicionaba a un estilo de vida nómada. En marzo de 1592 se descubrió la presencia de mineral de oro y plata en el cerro de San Pedro del Potosí, localizado hacia la porción oriental de la planicie; la escasez de agua en ese lugar impidió los asentamientos humanos y benefició la extracción de los metales. A poca distancia del cerro de San Pedro del Potosí se encontraba el puesto de San Luis, ocupado en ese entonces por indígenas guachichiles y tlaxcaltecas. Los españoles en busca de un mayor beneficio minero comenzaron a establecerse en ese lugar, y el 3 de noviembre de 1592 fundaron el pueblo de San Luis Potosí, posteriormente, el 30 de mayo de 1656, se le confiere el título de ciudad y se incluyen las minas de San Pedro del Potosí (Price, 2007).

La cúspide de la minería propició el desarrollo de la ciudad y con esto la demanda de agua, se busca un abastecimiento constante en una región de escasa precipitación. Al localizarse la ciudad en las partes más bajas de la planicie, fue posible importar agua de los manantiales en las montañas por medio de acueductos, mismos que rápidamente fueron insuficientes para cubrir las necesidades cada vez mayores. La solución más factible y económica fue aplicar la excavación manual para alumbrar agua que se encuentra a profundidades someras ( $<5$  m), obra que actualmente se denomina noria. El tipo de material geológico del subsuelo en la zona de la planicie facilitó la tarea de cavar y construir una noria, además de que presentó condiciones para la presencia de agua subterránea en cantidad y calidad aptas para cubrir las necesidades de la población. Desde fines del siglo XVI hasta la primera mitad del siglo XX, se complementó el abastecimiento con la construcción de bordos y pequeñas presas para captar el escurrimiento superficial generado por la precipitación (Price, 2007).

Por otro lado, la topografía de la ciudad y su posición dentro de la cuenca presentaban ciertos inconvenientes para su saneamiento, impidiendo la salida natural de sus aguas residuales, cuya filtración continua al subsuelo producía la contaminación de las aguas subterráneas someras; lo que afectó su utilización. En 1849-1850, la región fue azotada por una epidemia de cólera posiblemente asociada con la presencia de condiciones insalubres del agua utilizada para consumo de la población. En forma paralela, el aumento de la demanda obligó a la búsqueda de fuentes alternas de agua, por lo que, aprovechando la disponibilidad de tecnologías de perforación utilizadas en la industria petrolera, durante la década de 1940 comenzaron a realizarse exploraciones a mayor profundidad. Los resultados obtenidos fueron alentadores, ya que los primeros pozos profundos ( $\approx 150$  m) perforados en la planicie, aunque con profundidad al nivel del agua del orden de 80 a 100 m, produjeron caudales razonables con calidad adecuada para consumo humano (Price, 2007).

El desarrollo y crecimiento de la ciudad capital continuó, al igual que sus problemas de abastecimiento y saneamiento; al inicio de la década de 1960 ya se sabía que la totalidad del agua subterránea somera presentaba los efectos de la contaminación relacionada con residuos sólidos y líquidos generados por la ciudad, por lo que se reconocía que no era adecuada para consumo humano directo. Adicionalmente, en este tiempo se descubrió que en algunas regiones de la

planicie los pozos profundos eran muy productivos, con la característica de que alumbraban agua subterránea con relativa alta temperatura (30 a 35°C), mayor a la media anual ambiental de la región. Sin embargo, un problema relacionado con la utilización del agua termal se descubrió a principios de la década de 1970: se comenzó a asociar la aparición de fluorosis en infantes con la ingesta de agua subterránea termal utilizada para abastecimiento, ya que contienen concentraciones de fluoruro ( $\approx 4 \text{ mg l}^{-1}$ ) mayores a las recomendadas para consumo humano (Price, 2007).

A partir del contexto anterior, se puede afirmar que existen dos principales limitantes para el suministro agua asequible y de calidad para consumo humano: 1) efectos antropogénicos, y 2) efectos naturales de interacción agua-roca (Price, 2007).

El primer factor está asociado al manejo inadecuado del agua residual generada por la población y la industria, las cuales son desalojadas fuera de la ciudad mediante canales sin revestimiento y es posteriormente utilizada para riego. Como consecuencia, la presencia de contaminantes en el agua subterránea del acuífero somero ha sido identificada de manera consistentemente en evaluaciones realizadas desde principios de la década de 1960. Se han detectado elevadas concentraciones de componentes inorgánicos como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Fe}_{\text{total}}$  que indican la entrada de aguas residuales, por otra parte, se corrobora con la identificación de coliformes totales y fecales (Price, 2007).

Evidentemente, la lente de material fino que delimita el acuífero somero regula el paso del agua que satura a este último, permitiendo un flujo que está condicionado por las propiedades hidrogeológicas del acuífero superior, las del lente y las de la parte involucrada del acuífero profundo. En condiciones naturales previas al aprovechamiento de agua subterránea profunda, la cantidad de flujo de agua que pasaba del acuífero somero al profundo era por dos vías: una a través de la lente de material fino y la otra lateral, donde el agua se derrama en la región donde termina el lente. Con la perforación de pozos profundos se creó una vía adicional, de 1960 a 1980 muchos eran construidos con ademe ranurado y esta agua entra hacia el acuífero profundo. Muchos de esos pozos actualmente están fuera de operación, pero no han sido sellados adecuadamente, por lo que el ingreso de agua contaminada del acuífero somero hacia el profundo es continuo (Price, 2007).

Los efectos naturales de interacción agua-material geológico ocasionan elevadas concentraciones de fluoruro ( $\text{F}^-$ ) disuelto en el agua subterránea termal (hasta 3.8 mg/l), mayores al límite permisible establecido por la *NOM-127-SSA1-2021 “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”*, normativa que regula la calidad del agua para uso y consumo humano en el país. Diferentes estudios han identificado que la fuente de  $\text{F}^-$  está presente en las rocas volcánicas fracturadas, por lo que durante el movimiento del agua subterránea a través de las fracturas interacciona con su matriz vítrea y el  $\text{F}^-$  pasa rápidamente al agua. Por otro lado, el agua termal cuya temperatura a la descarga es mayor de 35°C, es de muy buena calidad, tiene bajas salinidad y mínimo contenido de elementos traza cuya ingesta puede ocasionar daños a la salud, con excepción del  $\text{F}^-$  (Price, 2007).

## **I.1 Estudios previos del acuífero del Valle de San Luis Potosí**

Considerando solo los estudios más recientes para el acuífero de San Luis Potosí, se describen a continuación aquellos que se publicaron a partir del año 2015; separados por el tipo de tema hidrogeoquímica, modelación y gestión.

### **Hidrogeoquímica**

**Almazán Tovar (2015)** evaluó la calidad del agua para sus diferentes usos, con el Índice de calidad del agua para consumo humano (ICA) y el Índice de contaminación (ICON) y los mostró espacialmente. Evaluó el índice de vulnerabilidad acuífera (DRASTIC) y su representación espacial, determinó las condiciones que propiciaban las afectaciones en ciertas zonas contaminadas. Encontró que en el acuífero colgado se obtuvieron características fuera de los límites de permisibles como lo son microorganismos coliformes totales y fecales, Mn, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, pH, Na, SDT, SO<sub>4</sub>, SAAM. Mientras que en el acuífero profundo fueron el flúor y el pH. El ICA para el acuífero colgado y profundo muestra una deficiente y de buena calidad, respectivamente. En el ICON para el acuífero colgado y profundo, indica contaminación y una baja o nula contaminación, respectivamente. El acuífero se ve influido por las actividades antropogénicas, lo que lo hace vulnerable en la zona urbana.

**Cardona et al. (2018)** analizaron el origen del flúor en las aguas subterráneas de la cuenca de San Luis Potosí, evaluando su control natural frente al incremento en la extracción y revisando las medidas de atenuación propuestas previamente. A partir del muestreo y análisis de agua y rocas volcánicas, demostraron que las altas concentraciones de flúor tienen un origen principalmente geogénico, asociado a la movilización de minerales presentes en rocas félsicas. El estudio concluye que los mecanismos naturales de flujo controlan la distribución del flúor en el acuífero y que las medidas preventivas deben considerarse en la construcción y operación de pozos, ya que su remoción posterior resulta costosa y ambientalmente desfavorable.

**Jarquín Yáñez (2019)** indica que el flúor se absorbe principalmente por vía digestiva, sobre todo en el intestino delgado, y que su absorción depende del pH del medio. El flúor presente en el agua potable se absorbe casi en su totalidad y, una vez en el organismo, se distribuye por los tejidos, con afinidad por huesos y dientes, eliminándose principalmente por vía renal. El límite permisible en agua de consumo es de 1.5 mg/L; concentraciones superiores pueden causar fluorosis dental y esquelética, así como otros efectos adversos. El estudio evaluó dos comunidades con niveles elevados de flúor en el agua (Ojo Caliente y La Reforma) y analizó la densidad mineral ósea, factores genéticos y nutricionales. Se encontró una prevalencia del 100% de fluorosis dental, identificándose al polimorfismo del gen *COL1A2* como un factor de riesgo para formas más severas.

**Morán Ramírez et al. (2020)** evaluaron la calidad del sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí, para lo cual se utilizó un índice pondera parámetros que evalúan la calidad del agua. Tomó el estudio de 47 muestras para el acuífero colgado y en el acuífero profundo 50 muestras que cubrieron el área de estudio en lo correspondiente a la zona urbana, agrícola e industrial. Utilizó el ICA, el cual se adapta y se modifica al modelo propuesto. El cual se obtiene con la evaluación numérica del ICA, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de peso específico en la relación con su concentración (Brown et al., 1970), resultando a partir de la media geométrica.

Afirma que la calidad del acuífero colgado de acuerdo con el índice de calidad ICA muestra que la calidad va de contaminada a excesivamente contaminada en tanto que el acuífero profundo es de buena calidad. Por otra parte, la calidad del acuífero colgado es debida al dinamismo que tiene este y que se ve afectado por el cambio de uso de suelo. El acuífero medio profundo no tiene estas afectaciones con el uso de suelo; su calidad depende de la interacción con las rocas del acuífero.

**Almazán Tovar (2021)** evaluó el modelo de agua subterránea y el modelo de agua superficial, relacionando sus efectos con la percepción remota, con eficiencia y optimización de recursos. Conformando al final una interpretación integral del sistema hidrológico. Empleó el método DRASTIC para determinar el riesgo de contaminarse el sistema acuífero, la calidad del agua por índices ICA e ICON, modelación de agua subterránea, modelación hidrológica e hidráulica del agua superficial, aplicando el método de interferometría. Con respecto a la vulnerabilidad acuífera por el método DRASTIC, para el acuífero somero presentó vulnerabilidad muy baja en la zona lacustre del valle, la vulnerabilidad media se encuentra en los límites de la cuenca, y los valores de vulnerabilidad más altos se encuentran en la zona de montaña en las zonas de recarga. El modelo de agua subterránea en su análisis regional se observa como puntos de salida del modelo la región norte del VSLP y un punto de menor elevación topográfica subterránea a la altura de Santa María del Río.

**Camargo Castro (2021)** señala que la calidad del agua subterránea está determinada por procesos hidrogeoquímicos naturales y antrópicos. En el acuífero somero predominan la disolución y el intercambio iónico asociados al uso de aguas residuales en la agricultura, lo que ha incrementado la salinidad y el sodio. Se reporta que las concentraciones de arsénico y flúor superan los límites permisibles, con una tendencia creciente en años recientes. En el acuífero profundo, estos contaminantes se asocian principalmente a un origen geogénico, influido por la sobreexplotación de pozos y el riego agrícola, mientras que la distribución del flúor sugiere un origen natural vinculado a los estratos geológicos del acuífero.

## Modelación

**Heiming (2016)** desarrolló un modelo numérico de aguas subterráneas en estado estacionario con ayuda del software *FEFLOW 7.0* por DHI, que muestra y representa los principales procesos y coherencias del sistema acuífero de SLP. Evaluó la componente de flujo vertical en el acuífero del sistema de SLP, así como la importancia del sistema de fallas en el flujo de agua subterránea en la cuenca de SLP y los mecanismos de recarga en el acuífero somero y la sensibilidad a los cambios en la recarga. A partir de datos básicos de la cuenca, determinó el área de estudio y sus unidades hidroestratigráficas, analizó los sistemas de flujo de agua subterránea, realizó diferentes métodos de interpolación y ecuaciones de balance hídrico. Implementó el modelo numérico con las condiciones iniciales y de frontera, su calibración, análisis de sensibilidad y validación. Finalmente menciona que el modelo destaca que el acuífero somero simulado descarga completamente en el acuífero profundo y que esta descarga (fugas y filtraciones) representa, en consecuencia, un importante componente de flujo vertical en el sistema acuífero de SLP. Se realiza un análisis de sensibilidad con los parámetros de recarga urbana, conductividad hidráulica de la capa de fuga y conductividad hidráulica vertical del sistema de fallas. El acuífero somero es altamente sensible a los cambios en la recarga urbana y en la conductividad hidráulica de la capa de fuga. Por otro lado, el análisis muestra que el modelo numérico es insensible a los cambios en la conductividad hidráulica del sistema de fallas. En consecuencia, esta tesis no permite realizar una predicción razonable para este parámetro. El resultado del modelado señala una fuerte conexión entre ambos sistemas acuíferos en términos de disponibilidad y calidad del agua subterránea. Además, el modelo indica que el componente de infiltración podría ser un factor que delimita el cono de depresión en el freático del acuífero profundo. Sin embargo, una fuerte conexión con la disponibilidad de agua subterránea también implica una conexión con la calidad del agua subterránea: dado que el acuífero superficial descarga en el acuífero profundo, existe la posibilidad de que los contaminantes presentes en el acuífero superficial lleguen al acuífero profundo a largo plazo. Por consiguiente, las medidas de protección de acuífero superficial son importantes y necesarias para proteger el recurso hídrico subterráneo del acuífero profundo.

**Krienen (2018)** desarrolló un modelo numérico de los sistemas de flujo del acuífero de San Luis Potosí con la meta intermedia de la investigación de los sistemas de fallas por métodos geofísicos. Realizó la determinación del sistema estructural respecto al sistema de fallas, desarrollo del modelo geológico en 3D, cálculo del balance hídrico, desarrollo del modelo hidrogeológico, desarrollo del modelo numérico de flujo de agua subterránea implementando los sistemas de fallas y la simulación de los escenarios futuros. Menciona que la extensión de la capa de arena compacta, implementada a partir del modelo geológico 3D en el modelo numérico, se amplió para cumplir con las cargas hidráulicas observadas en el borde de esta capa. La conectividad hidráulica entre los dos acuíferos debe investigarse más a fondo, ya que el modelo numérico de flujo calcula que la cantidad de percolación y filtración del acuífero superficial al profundo es significativamente mayor que la esperada a partir de los valores de la literatura. Además, desempeña un papel clave en los sistemas de flujo, ya que, según los escenarios simulados para el futuro, este flujo descendente de aguas subterráneas superficiales contaminadas podría poner en peligro el recurso hídrico subterráneo profundo, que se utiliza para el suministro de agua potable.

## Gestión

**Amuzurrutia-Valenzuela et al. (2015)** desarrollaron una metodología para identificar zonas con alta susceptibilidad al crecimiento urbano en la zona metropolitana de San Luis Potosí durante el periodo 1990–2009, mediante un modelo de regresión logística y el uso de información geoespacial. Los mapas generados permiten reconocer patrones espaciales de urbanización y constituyen una herramienta útil para la planeación territorial, al señalar áreas con mayor probabilidad de urbanización futura

**Carrillo Rivera & Cardona (2016)** muestran la posibilidad de definir controles de calidad de aguas subterráneas en pozos cuando se definen los sistemas de flujo (es decir, locales, intermedios y regionales). Utilizaron el método de sistemas de flujo de aguas subterráneas con sus siglas en inglés (GFSM). La aplicación del GFSM puede proporcionar directrices adecuadas para controlar la calidad del agua subterránea obtenida en los pozos de extracción. El uso de técnicas hidráulicas estándares para el análisis de acuíferos, junto con el monitoreo de calidad del agua, podría contribuir a una estrategia satisfactoria de extracción de agua subterránea para una planificación hídrica eficiente y una mejor gestión de las aguas subterráneas. Los flujos locales requieren su identificación y protección para la gestión adecuada de las fuentes de agua en cualquier región.

**Rangel Sánchez (2020)** aplicó un modelo de gestión óptima para maximizar el beneficio social de la extracción de agua del acuífero de San Luis Potosí, utilizando optimización dinámica y estimaciones econométricas de la demanda y los costos. Los resultados muestran que el nivel óptimo y más estable de la reserva corresponde al nivel mínimo del acuífero, con precios que aumentan conforme disminuye la disponibilidad del recurso. El estudio resalta la falta de información oficial y la necesidad de políticas más adecuadas en tarifas y concesión de derechos de agua para evitar la sobreexplotación.

**CONAGUA (2020)** publicó el estudio de disponibilidad de aguas subterráneas como sustento legal para la gestión del recurso, la autorización de nuevos aprovechamientos y la atención de la sobreexplotación de acuíferos. La disponibilidad se calculó conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015, considerando la recarga, la descarga natural comprometida y el volumen de extracción. Los resultados indican una disponibilidad negativa de  $-59.22 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo que evidencia un déficit hídrico y confirma que no existe volumen disponible para nuevas concesiones, ya que la extracción actual se realiza a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

**Hernández Constantino (2020)** analizó los cambios actuales y futuros en el volumen de almacenamiento del sistema acuífero del VSLP mediante un balance hidrológico. El estudio señala que, aunque el acuífero somero presenta recarga principalmente por precipitación, esta es de baja calidad, además de recibir aportes por retornos de riego y fugas en la red de distribución. En el acuífero profundo se estimó una extracción anual de  $152 \text{ Mm}^3$  y una recarga lateral de  $64 \text{ Mm}^3$ , lo que genera un déficit de  $87 \text{ Mm}^3/\text{año}$ . Las proyecciones indican una situación crítica de disponibilidad, comprometiendo el abastecimiento de agua a largo plazo y evidenciando la necesidad de estudios más detallados de cada acuífero de manera independiente.

**López Álvarez (2021)** analiza la situación del agua subterránea en el acuífero de San Luis Potosí a partir de una revisión documental sobre los problemas de disponibilidad y calidad del recurso que afectan tanto a la población del Valle de San Luis Potosí como al medio ambiente. El autor cuestiona la narrativa que atribuye la escasez de agua a causas exclusivamente naturales y señala que esta responde, en mayor medida, a un modelo de gestión político-jurídico que prioriza el abastecimiento a sectores económicos específicos. Asimismo, enfatiza la necesidad de replantear la planificación del recurso hídrico, colocando a la naturaleza como eje central de la toma de decisiones y evidenciando el caso de San Luis Potosí como un ejemplo de la relación desequilibrada entre las actividades humanas y el entorno natural.

**Aguirre García (2022)** plantea un conjunto de acciones precautorias orientadas a la sostenibilidad del acuífero de San Luis Potosí, con el objetivo de fortalecer la efectivización de los derechos humanos y visibilizar el conocimiento de las comunidades afectadas. El estudio adopta una metodología transdisciplinaria basada en la ciencia posnormal y la economía ecológica, incorporando enfoques multi-epistémicos y principios filosóficos de la perspectiva latinoamericana de los derechos humanos. Como resultado, se proponen doce recomendaciones de acción preventiva frente a los riesgos de agotamiento y contaminación del acuífero, los cuales comprometen derechos fundamentales como el acceso al agua, la salud y un medio ambiente sano. La investigación aporta una estrategia política y práctica para la gestión del riesgo ambiental en contextos de alta incertidumbre, orientada a la construcción de una sociedad más justa.

El **Grupo Universitario del Agua (2025)** plantea una estrategia en la que la UASLP reafirma su compromiso con el derecho humano al agua, asumiendo un papel activo como generadora de conocimiento y agente de cambio social. El enfoque se centra en la ZMSLP, especialmente en las microcuencas de la Sierra de Álvarez y la Sierra de San Miguelito, donde la sobreexplotación de acuíferos, la pérdida de agua por escurrimiento y la erosión del suelo limitan la recarga natural. Como respuesta, se proponen estrategias basadas en la naturaleza bajo el concepto de microcuenca. Las acciones para la UASLP se organizan en corto, mediano y largo plazo, priorizando el diagnóstico, la evaluación de impactos y el monitoreo permanente de la infiltración y recarga de los acuíferos.

## I.2 Problemática

El crecimiento de la actividad industrial ha requerido la construcción de vivienda y el consecuente proceso acelerado de urbanización y la necesidad de procurar servicios, dentro de los cuales, el más importante es el abastecimiento de agua, tanto potable para los usos domésticos, como para la actividad industrial y de servicios (Grupo Universitario del Agua, 2025).

El acuífero de San Luis Potosí abarca los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez y Cerro de San Pedro, teniendo una población respectivamente de 911,908 habitantes, 332,072 habitantes y 5,050 habitantes; siendo un total de 1,249,030 habitantes (INEGI, 2024b).

En la Figura 6, se presentan los censos de población realizados de 1900 a 2020, los cuales muestran la evolución demográfica del estado de San Luis Potosí. Se observa que entre 1900 y 1910 la población se mantuvo sin cambios significativos, mientras que a partir de 1930 hasta 2020 se registra un crecimiento constante y sostenido. Este comportamiento refleja una tendencia de incremento poblacional continuo a lo largo del siglo XX y principios del XXI (INEGI, 2024a).

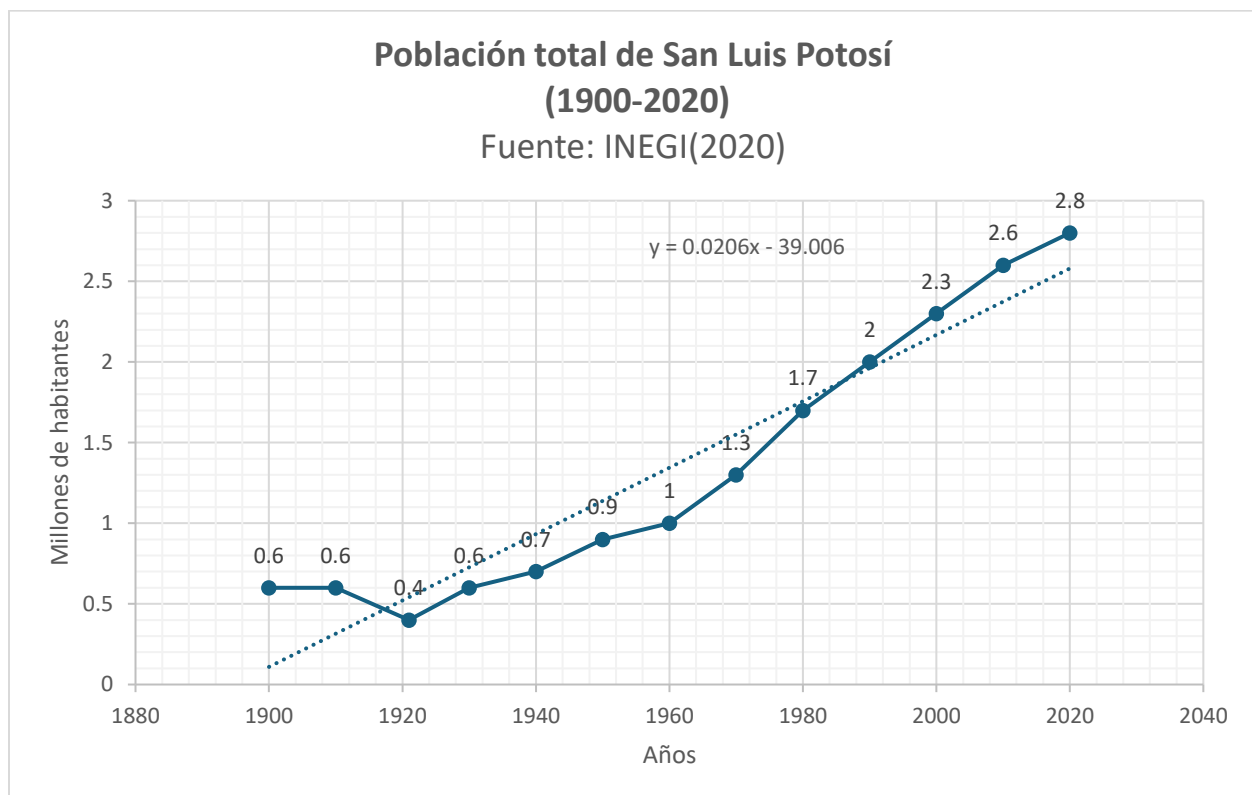


Figura 6. Población total de San Luis Potosí (1900-2020) Fuente: INEGI (2020)

INTERAPAS (2013) menciona que el sistema de abastecimiento de agua subterránea constaba de 126 pozos que producían 3,000 l/s, para atender el 84 % de la población, mientras que el restante se abastecía a través de las presas San José, El Peaje y El Potosí, con un caudal de 510 l/s, potabilizada en las plantas Los Filtros (480 l/s) e Himalaya (30 l/s).

De acuerdo con INEGI (2017), en el acuífero de SLP existía para el año 2016 un total de 127 pozos profundos extrayendo agua de manera continua. Sin embargo, información de INTERAPAS (2019) indica que, de las 144 fuentes de abastecimiento, 137 son pozos profundos, 6 son galerías y 1 es una presa que suministraba agua (IMPLAN, 2018).

Para el año su informe anual (INTERAPAS, 2024) menciona que cuenta con una batería de 140 pozos que abastecen un total de 89.46 hm<sup>3</sup>/año.

Hergt (2009) presenta una comparativa entre la evolución del crecimiento poblacional y la extracción de agua, como se muestra en la Figura 7; se observa que el aumento considerable en las extracciones a partir de 1990 y un incremento poblacional continuo.

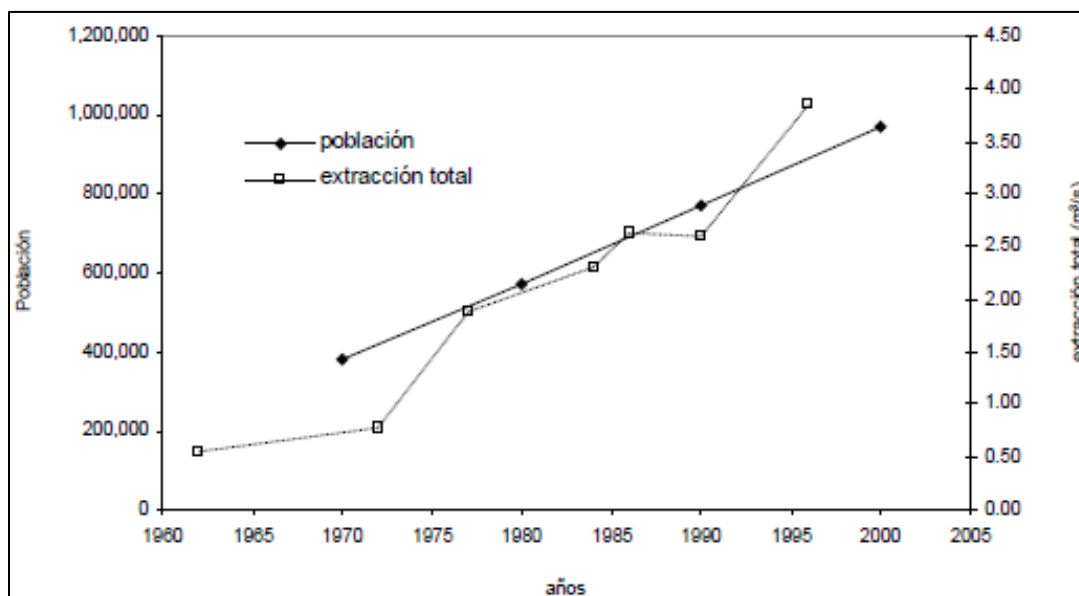


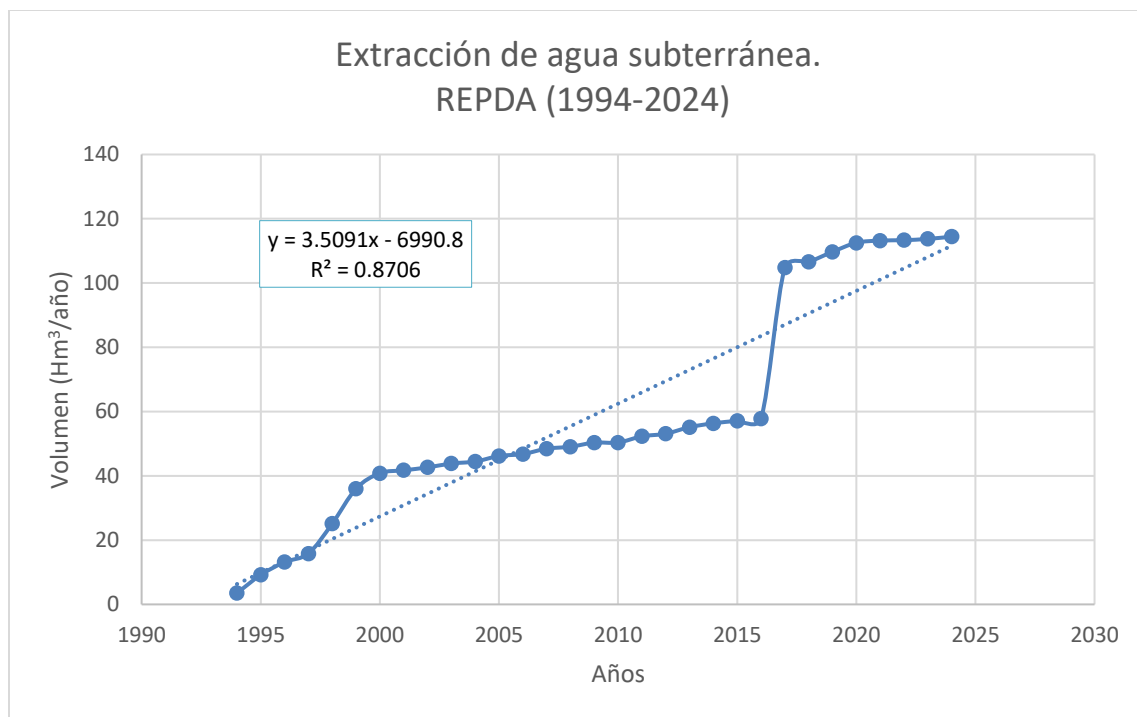
Figura 7. Comparación del crecimiento entre población y la extracción en los pozos (Carrillo-Rivera et al. 2002a, PDUSLP, 2000).

A pesar del incremento de extracciones, el censo de INEGI del 2020, muestra que las viviendas de San Luis Potosí, el 69.6 % disponen de agua entubada dentro de la vivienda, 67.3 % tienen drenaje conectado a la red pública, 98.5 % cuentan con energía eléctrica (INEGI, 2024a).

Cardona (1990) y Carrillo et al. (1999) detectaron valores de descensos de nivel que varían de 0.5 m/año para los años de 1970-1980 y para el año 1984 de 2.6 m/año, atribuyéndolo a que la extracción excede la recarga. CONAGUA (2002) informa que para el periodo de 1995 a 1998 se presentó un abatimiento anual de 0.5 a 4 m en el nivel estático, menciona que la zona más afectada es la suroccidental con 3 a 4 m/año en contraste con la zona norte con abatimientos entre 0.75 y 1.25 m/año. En las últimas tres décadas se destaca un abatimiento total del nivel estático de 15 a 35 m (Hergt, 2009).

El acuífero del Valle de San Luis Potosí se encuentra con un aprovechamiento intensivo a una proporción de dos a uno, considerando que anualmente se extraen 150 hm<sup>3</sup> de agua subterránea, considerando que se vuelven a filtrar 75 hm<sup>3</sup>. Aunado a esto, el nivel del agua del acuífero descende de entre 1 y 4 m al año; mientras que los nuevos pozos se construyen a una profundidad de 700 m, con altos costos (INTERAPAS, 2013).

Como muestra la Figura 8, el incremento de la extracción de agua subterránea no ha sido constante durante todo el tiempo, sino que ha mostrado saltos de extracción considerables que han tenido consecuencias significativas en el municipio.



*Figura 8. Extracción de agua subterránea en San Luis Potosí (1994-2024). Fuente: REPDA (2024).*

Se interpreta que el agua que se consume en el municipio es en su totalidad de agua subterránea, considerando el censo 2020, aún se tiene desabasto para la población y con el creciente incremento y demanda de la población se espera que este aumente.

### **I.3 Justificación**

El acceso al agua es un tema de seguridad nacional, política ambiental, social y económica. Su asequibilidad condiciona el crecimiento y desarrollo del país; asimismo, su calidad es factor decisivo para la salud y bienestar de la población (IMCO, 2023).

Para el acuífero la disponibilidad media anual (DMA) según (CONAGUA, 2020) es igual al volumen de recarga total media anual de  $78.1 \text{ hm}^3/\text{año}$  menos  $0.00 \text{ hm}^3/\text{año}$  de descarga natural comprometida, menos el volumen de extracción de aguas subterráneas de  $137.32304 \text{ hm}^3/\text{año}$ ; lo que resulta en  $\text{DMA} = -59.223040 \text{ hm}^3/\text{año}$ . Esto apunta a que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; se tiene un déficit indicando que se están extrayendo más a costa del almacenamiento no renovable del acuífero.

Debido al aprovechamiento intensivo del acuífero, el 33 % de los pozos presentan concentraciones de fluoruro que rebasan el límite máximo permitido por la norma (INTERAPAS, 2013).

López Álvarez (2012) evaluó el impacto del cambio de uso de suelo y sus efectos en la disponibilidad del recurso hídrico, aplicando modelación numérica al sistema acuífero. En su estudio empleó el programa de *Visual MODFLOW* y destacó que le permitió analizar la dinámica del sistema acuífero. Asimismo, considero distintas tasas de bombeo respecto al uso de suelo; con esto se simuló en diversos escenarios. La modelación numérica de flujos subterráneos ha demostrado ser una herramienta eficiente para evaluar los impactos generados por la extracción intensiva del recurso, asociada a los cambios en el uso de suelo.

Tomando en cuenta el preámbulo anterior, se desconoce mucho sobre los sistemas de flujo de agua subterránea de la región y la información que se tiene se encuentra aislada, lo que dificulta su interpretación, por ende, es importante la realización de un modelo numérico más completo, ya que es una herramienta eficiente de evaluación.

## **I.4 Hipótesis**

La implementación de un modelo numérico de aguas subterráneas permitirá evaluar escenarios futuros y su respuesta en búsqueda de un manejo sostenible del acuífero de San Luis Potosí.

## **I.5 Objetivos**

### **I.5.1 Objetivo general**

Evaluar el funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea ante diversos escenarios futuros mediante un modelo numérico del acuífero de San Luis Potosí.

### **I.5.2 Objetivos específicos**

- Establecer el modelo conceptual con información hidrogeoquímica, hidrogeológica e hidrológica del sitio de estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea del acuífero.
- Validar un modelo numérico de los sistemas de flujo de agua subterránea del acuífero.
- Desarrollar escenarios futuros en el acuífero con base en diversos esquemas de aprovechamiento que contemplarán acciones de manejo sostenible del agua y/o condiciones meteorológicas.
- Evaluar los resultados de los escenarios futuros para definir propuestas de alternativas de aprovechamiento sostenible del acuífero.

## **I.6 Metodología**

La metodología que se desarrolló para el cumplimiento de los objetivos de este tema de investigación es la siguiente, se presenta en doce puntos:

1. Analizar estudios de modelos de agua subterránea nacionales y del mundo.
2. Analizar estudios relevantes previos de investigaciones hidrológicas e hidrogeológicas similares en la región de estudio.
3. Realizar balances hídricos históricos considerando el análisis del ciclo hidrológico en la región, las variables de: precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimientos, infiltraciones y flujo subterráneo.
4. Analizar los registros históricos de mediciones del nivel freático para identificar las direcciones del flujo subterráneo, así como realizar las mediciones en campo de los mismos.
5. Analizar los estudios de composición química del agua en la región de estudio y realizar muestreos en campo.
6. Crear una base de datos espacialmente referenciada para la implementación del modelo numérico de aguas subterráneas, contemplando: características geológicas e hidrológicas del acuífero, ubicación de los pozos, elevaciones de niveles freáticos, caudales de extracción, balances hídricos superficiales y subterráneos.
7. Elaborar el modelo conceptual mediante la definición de las unidades hidroestratigráficas y el flujo de agua subterránea.
8. Implementar el modelo numérico en 3 dimensiones correspondiente al acuífero de San Luis Potosí mediante el uso del programa FEFLOW.
9. Validar el modelo numérico en un periodo y condiciones hidráulicas establecidas.
10. Realizar un análisis de sensibilidad de diversos parámetros hidráulicos en el modelo de agua subterránea.
11. Realizar la simulación de escenarios futuros mediante diferentes propuestas de esquemas de extracción del agua subterránea.
12. Con base en los resultados de los escenarios futuros definir propuestas de alternativas de aprovechamiento sostenible.

## II. Modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea

### II.1. Características del acuífero de SLP

#### II.1.1 Entorno geográfico

##### II.1.1.1 Localización

En la Figura 9, se describe la zona de estudio, la cual representa el acuífero administrativo que se localiza en la parte suroeste del estado de San Luis Potosí, en los municipios de San Luis Potosí, Zaragoza, Armadillo de los infantes, Cerro de San Pedro, Soledad de Graciano Sánchez, Ahualulco, Mexquitic de Cardona, Villa Hidalgo y Villa de Reyes; y la cuenca superficial se representa con la línea azul y comprende los estados de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Villa de Arriaga, Mexquitic de Carmona, Ahualulco, Cerro de San Pedro, Villa de Arista, Villa Hidalgo, Armadillo de los Infantes y Zaragoza.

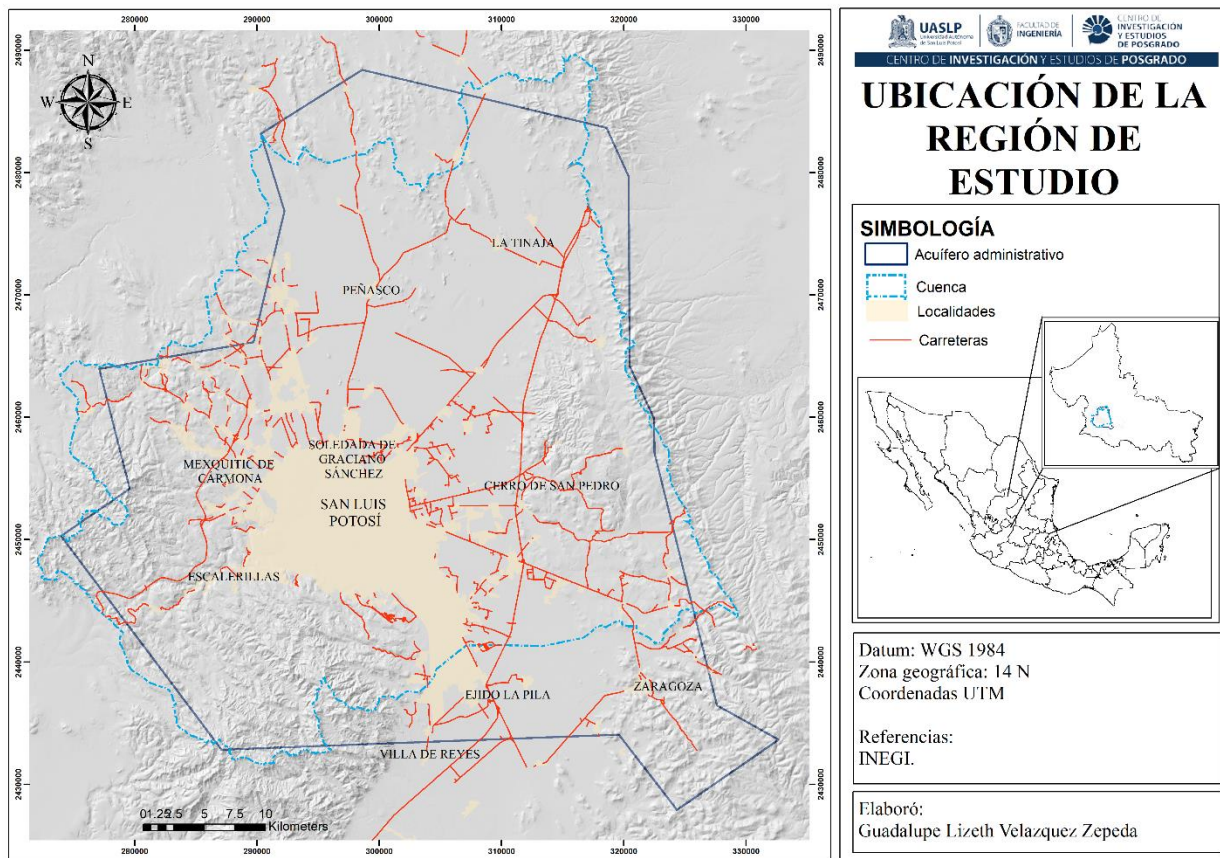


Figura 9. Mapa de localización de la zona de estudio.

### II.1.1.2 Área de modelación

El dominio del modelo se muestra en la Figura 10, con color morado se delimita en la parte este y oeste por el parteaguas de la cuenca que tiene un área de 1,844.89 km<sup>2</sup>, un parteaguas de 253.31 km, en la parte norte y sur se le hizo un incremento a la cuenca de 10 km para lograr esa área de modelación correspondiente a 2,571.91 km<sup>2</sup>.

Abarca los municipios de Villa de Reyes, Zaragoza, San Luis Potosí, Cerro de San Pedro, Soledad de Graciano Sánchez, Armadillo de los Infantes, Villa Hidalgo, Mexquitic de Carmona, Villa de Arriaga, Ahualulco y Villa de Arista.

Considerando el poder agregar las condiciones de frontera adecuadas en el modelo numérico, se tomó la cuenca hidrológica como unidad de estudio de aguas superficiales y subterráneas.

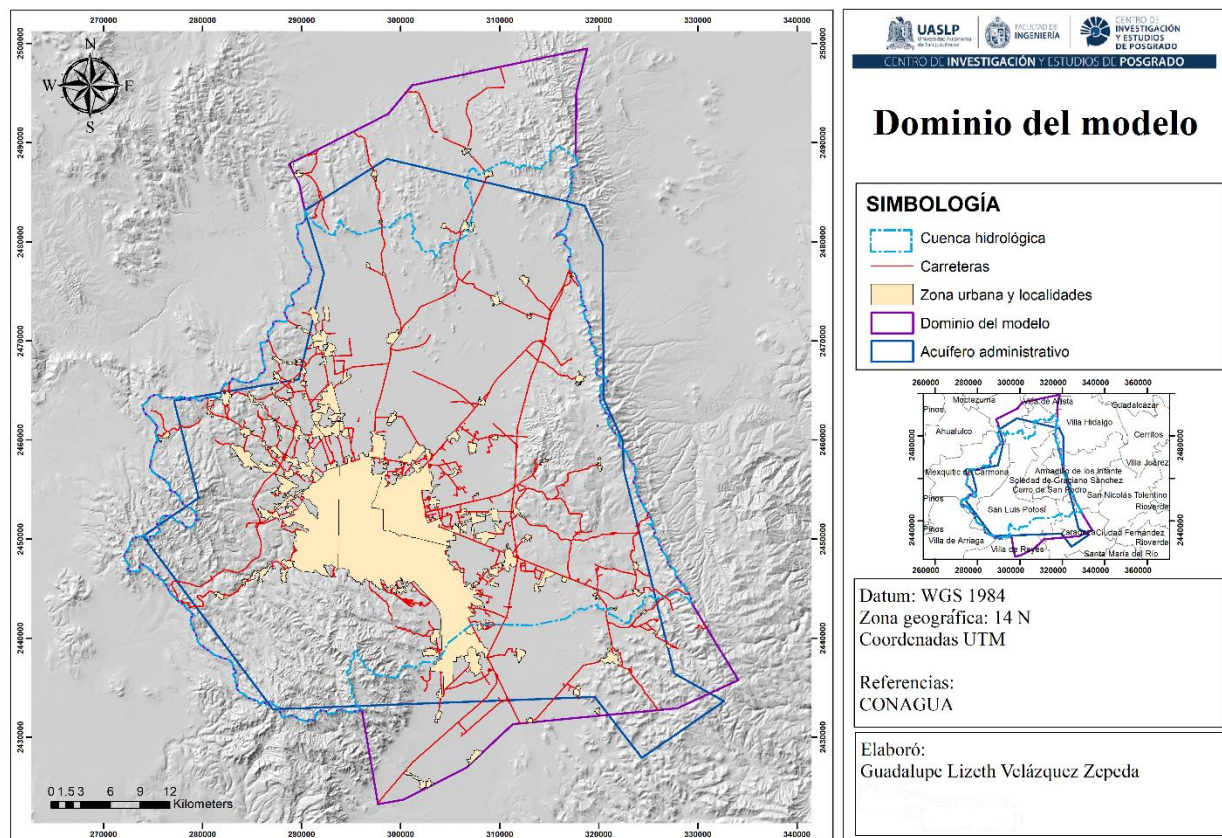


Figura 10. Mapa del área de modelación

## II.1.2 Clima

Respecto al clima de la zona de estudio según la clasificación de Köppen modificada por García (2001) son: semiárido templado (BS<sub>1</sub>kw), árido semicálido (BS<sub>0</sub>hw) y árido templado (BS<sub>0</sub>kw), como se muestra en la Figura 11y Tabla 1.

Tabla 1. Características de los climas presentes en la región de estudio. Fuente: INEGI, 2002.

| Tipo de clima                                                | Temperatura media anual (°C) |      | Precipitación total anual (mm) |       |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------|------|--------------------------------|-------|
| Semiárido templado (BS <sub>1</sub> kw)                      | 16.1                         | 17.6 | 350.5                          | 577.7 |
| Árido semicálido (BS <sub>0</sub> hw), con lluvias en verano | 18.7                         | 21.8 | 328                            | 422   |
| Árido templado (BS <sub>0</sub> kw)                          | 16.3                         | 17.8 | 319.9                          |       |

Se puede observar que los climas de la región de estudio presentan gran similitud en cuanto a temperaturas y precipitación.

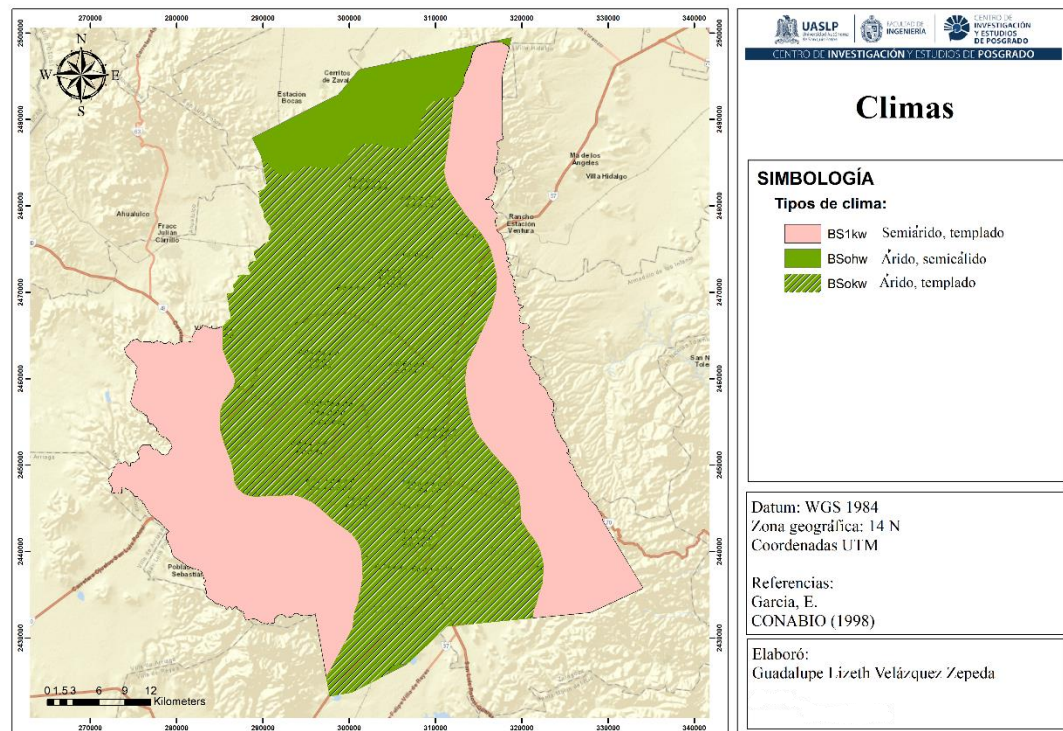


Figura 11. Mapa del clima

### II.1.3 Fisiografía

La zona analizada se ubica en la porción central del país, que comprende una amplia región de la Provincia Fisiográfica de la Mesa del Centro (MC) que limita al: i) norte y oriente con la Sierra Madre Oriental (SMOr), compuesta principalmente por sedimentos plegados del Mesozoico; ii) occidente con la Sierra Madre Occidental (SMO), que consiste de un campo volcánico compuesto predominantemente por rocas félsicas, calci-alcalinas formado durante el Terciario Medio; iii) sur con la cadena volcánica activa del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) (Ortega-Gutierrez et al., 1992 citado en Cardona Benavides, 2007).

La zona de interés se localiza en la porción oriental de la MC, región que presenta afloramientos de rocas volcánicas muy similares a aquellas de la SMO. En esta es posible distinguir dos grandes paquetes de unidades geológicas que afloran en esta región y alrededores inmediatos: i) “complejo basal” o basamento (Mesozoico) y ii) “cubierta” (Cenozoico) (Aranda-Gómez, 1989, citado en Cardona Benavides, 2007).

Las provincias que corresponden a la zona de estudio se encuentran en la parte norte “Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecas”, oriente con “Sierras y Llanuras Occidentales”, en el occidente con “Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes” y en la región centro-sur con “Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato”, como se muestra en la Figura 12.

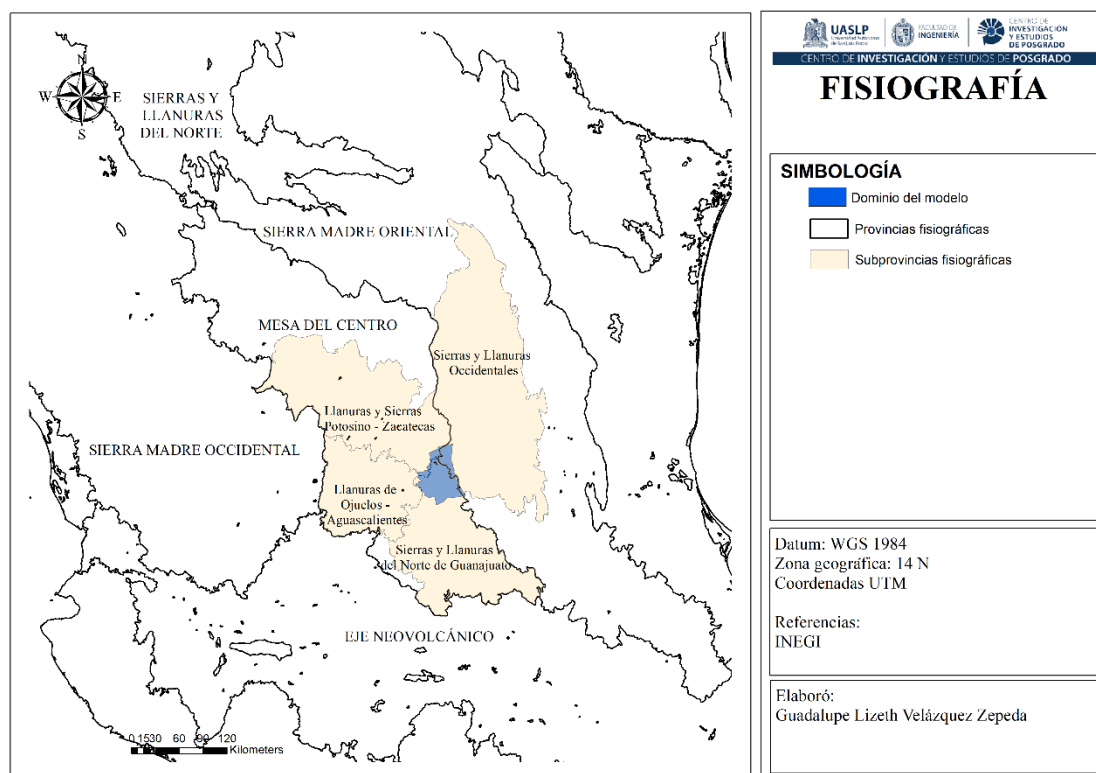


Figura 12. Mapa de fisiografía.

## II.1.4 Geología

La estructura geológica corresponde a una fosa tectónica, limitada por fallas escalonadas de gran ángulo; en el interior de la fosa se depositan sedimentos aluviales, lacustres y materiales piroclásticos, teniendo como piso rocoso a los derrames volcánicos y/o las ignimbritas del Cenozoico, como la Latita Portezuelo y la Ignimbrita Cantera. Las mismas rocas volcánicas afloran en la Sierra de San Miguelito, que constituye el borde occidental de la cuenca, en tanto que, al oriente, en la Sierra de Álvarez se expone una secuencia sedimentaria cretácica en la que predominan las calizas arcillosas de carácter impermeable (Barboza Gudiño et al., 2025).

En la cuenca de San Luis Potosí afloran rocas sedimentarias del Cretácico, rocas volcánicas del Terciario y sedimentos granulares del Cuaternario. Su distribución espacial se muestra en el mapa geológico de la Figura 13.

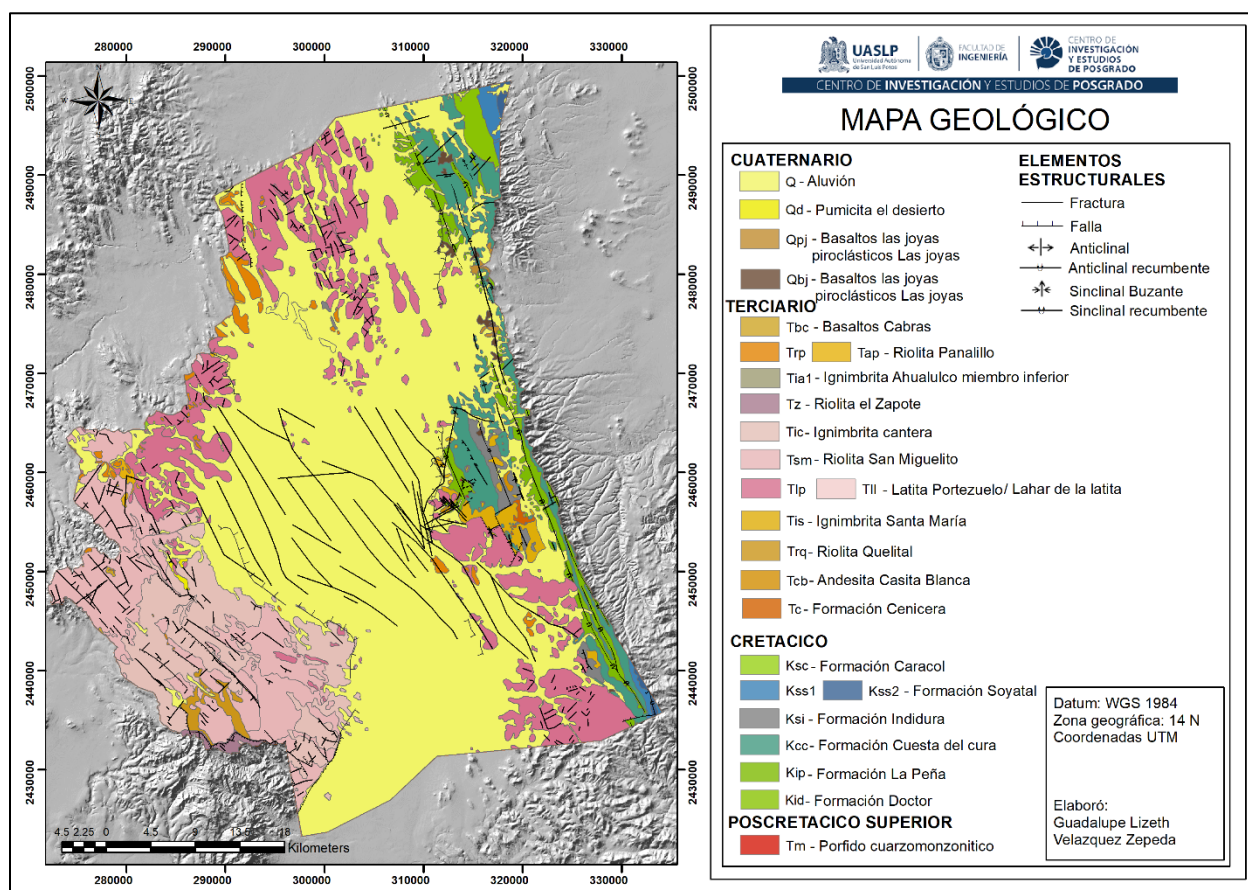


Figura 13 Mapa de geología

## Mesozoico (Cretácico Medio-Superior)

A partir de la información descrita por Cardona (2007) se tiene que en la porción NE de la zona analizada (Sierra de San Pedro), aflora una secuencia sedimentaria del Cretácico (Aptiano a Turoniano), intensamente plegada constituyendo una serie de anticlinales y sinclinales con eje de rumbo general N20°W. Entre las formaciones que afloran en esta región se tiene: i) La Peña (Kip), ii) Cuesta del cura (Kcc), iii) El Doctor (Kid) e iv) Indidura (Ksi). Consisten en calizas arcillosas en ocasiones carbonosas de grano fino a medio de color gris claro a oscuro. Se encuentran en estratos medianos a delgados de 5 a 20 cm y en ocasiones de 20 a 40 cm de espesor, con abundantes

bandas y lentes de pedernal negro y en algunas ocasiones presentan interestratificación arcillosa. Sobreyacen con un contacto concordante y transicional a la Formación La Peña. Subyacen discordantemente a los sedimentos clásticos continentales del Paleoceno-Eoceno (Formación Cenicera) y a varias de las unidades de rocas ígneas del Cenozoico.

En lo referente a los cuerpos intrusivos, se presenta el Pórfido Cuarzomonzonítico asociado a la mineralización de sulfatos de Pb-Ag y Au en la Sierra de San Pedro, donde aparece como diques o pequeños apófisis. El intrusivo consiste en una roca de color gris verdoso a café rojizo, de textura holocristalina, porfirítica, con fenocristales de 0.002-0.01 m de ortoclasa, plagioclasa y cuarzo. La matriz se encuentra alterada en su mayoría por óxidos de hierro calcita y sericita. La presencia de pseudomorfos de cuarzo, sugiere que los intrusivos son de poca profundidad. Con base en la composición química de una muestra de roca intrusiva, se puede clasificar como un pórfido cuarzo-monzonítico. Su edad absoluta no ha sido determinada, sin embargo, se conoce que es posterior al Cretácico ya que se encuentra intrusionando a sedimentos calcáreos de este periodo.

### **Cenozoico (Terciario)**

**Unidad: Volcanismo heterogéneo: Terciario (Paleoceno-Eoceno Medio), Andesita Casita Blanca (Tcb) y Formación Cenicera (Tc).**

La evidencia de actividad volcánica en la región del CVSLP se inicia durante el Eoceno (44 Ma) y está representada por derrames de tipo andesítico que afloran en zonas aisladas dentro del área analizada.

Durante las primeras fases de formación del CVSLP, el volcanismo fue de composición diversa (desde intermedio hasta básico) y de la que solo quedan algunos vestigios aislados, representados por la Andesita Casita Blanca ( $44.1 \pm 2.2$  Ma, Labarthe et al., 1982). Las características que presenta sugieren que constituyó estructuras de tipo central, con derrames de lava de espesor delgado. La Andesita Casita Blanca aflora a manera de ventanas aisladas a una escala no cartografiable al oriente de la cuenca de SLP, en las inmediaciones de la SSP. Se trata de una andesita de color gris verdoso, de textura porfirítica, con escasos fenocristales de 1 a 2 mm de biotita y plagioclasa, en una matriz afanítica compuesta de plagioclasas y biotita.

En esta área se le estima un espesor de 80 a 160 m. Su espesor en la sección tipo localizada en las inmediaciones de la rancharía de Casita Blanca, fuera del área de estudio, es de 64 a 120 m. (Labarthe et al., 1982). Su edad determinada por el método de K/Ar es de  $44.1 \pm 2.2$  millones de años (Ma), lo que la coloca en el Eoceno Medio. Por lo tanto, es la roca volcánica más antigua de la secuencia volcánica. Yace discordantemente sobre los sedimentos marinos del Mesozoico; subyaciendo de manera también discordante a las diferentes unidades volcánicas del Terciario. La formación Cenicera se identifica con buenas exposiciones sobre el arroyo del mismo nombre (fuera del área de estudio). Incluye una secuencia de horizontes brechosos, conglomeráticos y areniscas poco consolidadas, limos y arcillas que presentan una marcada variación litológica lateral de conglomerados a zonas arcillosas, que han sido identificados en algunos de los pozos profundos de SLP.

## **Unidad: Domos riolíticos y algunas ignimbritas; Terciario (Oligoceno medio-tardío)**

### **Riolita San Miguelito (Tsm), Latita Portezuelo (Tlp), e Ignimbrita Santa Maria (Tis)**

Esta unidad aflora ampliamente en las SSM y San Pedro y está constituida por las formaciones Ignimbrita Santa María, Latita Portezuelo, Riolita San Miguelito, principalmente.

Consiste en domos y derrames lávicos, generalmente son de color gris claro a café grisáceo, presentando diferentes tipos de textura y matriz vítrea, en ocasiones desvitrificada y bandeada, constituida por microlitos de plagioclasa. Los fenocristales que presentan como minerales esenciales son cuarzo y sanidino y plagioclasa de idiomorfos a hipidiomorfos acompañados por minerales secundarios de óxidos de hierro como magnetita y hematita. Algunos derrames lávicos presentan una matriz totalmente desvitrificada, por lo que es común la presencia de estructuras esferulíticas y perlíticas que le dan un aspecto moteado. Las tobas están compuestas por fragmentos piroclásticos contenidos en una matriz ceniza o vítrea. El espesor de esta unidad es del orden de los 600 a los 1300 m aproximadamente. Sobreyacen discordantemente al basalto (formaciones marinas del Mesozoico) a la Formación Cenicera y a la Andesita Casita Blanca; subyaciendo discordantemente a la unidad Ignimbrita del Oligoceno Tardío.

## **Unidad: Grupo ignimbrítico;**

### **Terciario (Oligoceno tardío); Riolita Panalillo (Tap y Trp) e Ignimbrita Cantera (Tic)**

Aflora en la SSM y en menor proporción en la SSP. Consiste en ignimbritas (ignimbrita Cantera, riolita Panalillo), con algunas intercalaciones de toba y lava riolítica. Ocasionalmente se observan derrames de basalto intercalado (Nieto-Samaniego et al., 1996).

Consiste en una ignimbrita de color rosa a café rosado con texturas de merocristalina a holocristalina, porfirítica, fluidal y eutaxítica, con fenocristales de cuarzo y sanidino (hipidiomorfos a idiomorfos) y algunas plagioclasas en una matriz parcial a totalmente desvitrificada con esferolitas rellenas de cuarzo. Las tobas son de color blanco, crema a ligeramente rojizas depositadas por aire y flujos de ceniza sin soldar bien estratificados y gradados, con fenocristales de cuarzo, sanidino y plagioclasas, con algunos fragmentos líticos en una matriz de grano extremadamente fino.

Su espesor promedio es del orden de los 200 a los 900 m. Sobreyacen discordantemente al basamento, formación Cenicera y en ocasiones a la andesita Casita Blanca, así como a la Unidad Domos Riolíticos; subyacen de la misma forma a los depósitos de relleno continentales del Terciario como gravas, arenas y tobas (Flores et al., 1990) así como a los depósitos de material aluvial del Cuaternario.

## **Cenozoico (Cuaternario)**

### **Sedimentos Cuaternarios (Q)**

Generalmente estos sedimentos afloran en la planicie y pie de monte de las sierras. En este trabajo al material transportado y depositado que aflora en las diversas depresiones existentes en la región se le aplica el término de aluvión (Q). Existen desde conglomerados, con clastos de menor tamaño

(gravas, arenas, limos y arcillas) pobremente cementados en una matriz arenosa y calcárea. El espesor varía entre los 60 y 350 m. Sobreyacen discordantemente a las rocas del Terciario y Mesozoico de la región, así como a sedimentos más antiguos en la fosa tectónica.

### II.1.5 Geología del subsuelo

La columna hidroestratigráfica detallada de la geología define dos tipos de acuíferos de acuerdo con (Barboza Gudiño et al., 2025):

- Granular. Formado por el aluvión del Cuaternario (conglomerados, suelos residuales y material aluvial constituido de gravas, arenas, limos y arcillas) y los depósitos de relleno clasto-continuales del Cenozoico (material de relleno mal clasificado de granulometría gruesa a fina constituido por gravas, arenas, limos y arcillas).
- Fracturado. Constituido por lavas riolíticas e ignimbritas del oligoceno; de acuerdo con el grado de fracturamiento (secundario) que poseen, es la permeabilidad que presentan. El paquete volcánico del Cenozoico tiene un espesor aproximado de 1000 m (formaciones de riolita panalillo, ignimbrita cantera, riolita San Miguelito y latita Portezuelo).

En la Tabla 2, se delimita lo que se define como la geología estructural, clasificándolo temporalmente, así como determinando el tipo de acuífero y las unidades hidrogeológicas correspondientes, que se representa en la Figura 14.

Tabla 2. Geología estructural.

| Cuenca de San Luis Potosí |                                   |                     |       |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------|
| Tiempo                    | Formación                         | Tipo                | HU*   |
| Cuaternario               | Aluvión                           | acuífero poroso     | Qal   |
|                           | Capa de arena compacta            | acuitardo           | cS    |
|                           | Basalto las Joyas                 |                     | Ccl   |
|                           | Piedra Pómez el Desierto          |                     | Tv    |
| Terciario                 | Basalto las cabras                |                     | Tv    |
|                           | Granular indiferenciado           | acuífero poroso     | TGU   |
|                           | Piedra Pómez el Desierto          | acuífero fracturado | Tv    |
|                           | Riolita Panalillo                 |                     |       |
|                           | Ignimbrita Ahualulco              |                     |       |
|                           | Riolita Zapote                    |                     |       |
|                           | Ignimbrita Cantera                |                     | Tv/Td |
|                           | Riolita San Miguelito             |                     |       |
|                           | Latita Portezuelo                 |                     | Tv    |
|                           | Ignimbrita Santa María            |                     |       |
|                           | Riolita Quelital                  |                     |       |
|                           | Formación Casita Blanca           |                     | Ccl   |
|                           | Formación Cenicera                |                     |       |
|                           | Formación Soyatal                 |                     |       |
| Cretácico                 | Formación Caracol                 | acuitardo           | Ccl   |
|                           | Formación Indidura                |                     |       |
|                           | Formación Cuesta del cura         |                     |       |
|                           | Formación La Peña                 |                     |       |
|                           | Formación Doctor                  |                     |       |
|                           | Porfirio cuarzitico - monzonitico |                     | Tv    |

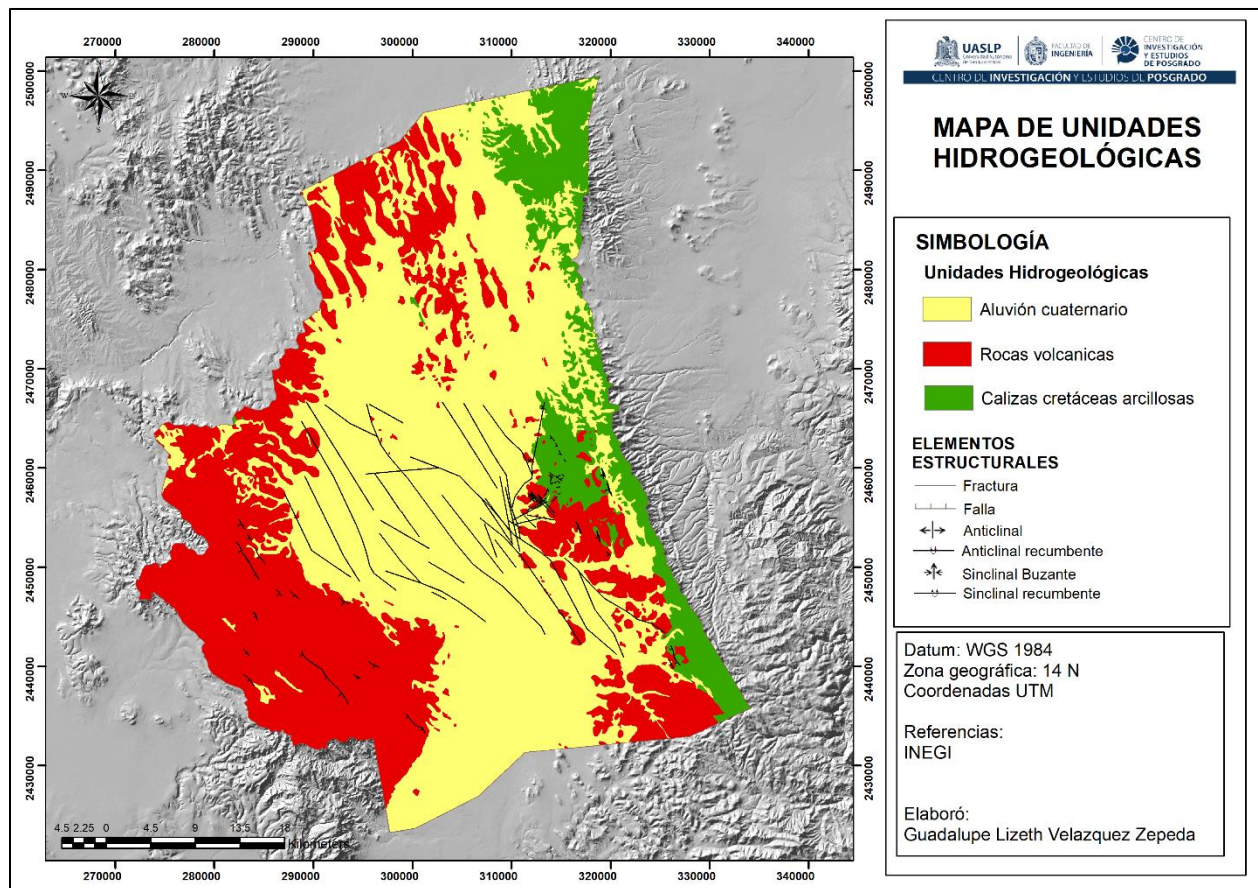


Figura 14. Mapa de Unidades Hidrogeológicas.

### II.1.6 Hidrología superficial

Definiendo el contexto hidrológico de la zona de estudio que se tiene, como se observa en la Figura 15, las regiones hidrológico-administrativas (RHA) son agrupaciones geográficas definidas por tipo de criterios hidrológicos que siguen la división política municipal para tener una administración e integración de la información socioeconómica. En México existen 13 RHA, integradas por 37 regiones hidrológicas (RH), son áreas territoriales definidas en función de sus características orográficas e hidrológicas, por ende, sus límites son diferentes a la división política (IMCO, 2023).

La zona de estudio pertenece a las regiones hidrológicas-administrativas VII Cuencas Centrales del Norte y IX Golfo Norte, así como a las regiones hidrológicas no. 37 el Salado y no. 26 el Panuco. Hablando de delimitaciones de agua subterránea, el país se encuentra dividido en 653 acuíferos administrativos, la zona de estudio pertenece al acuífero de San Luis Potosí (2411), en el estado de San Luis Potosí.

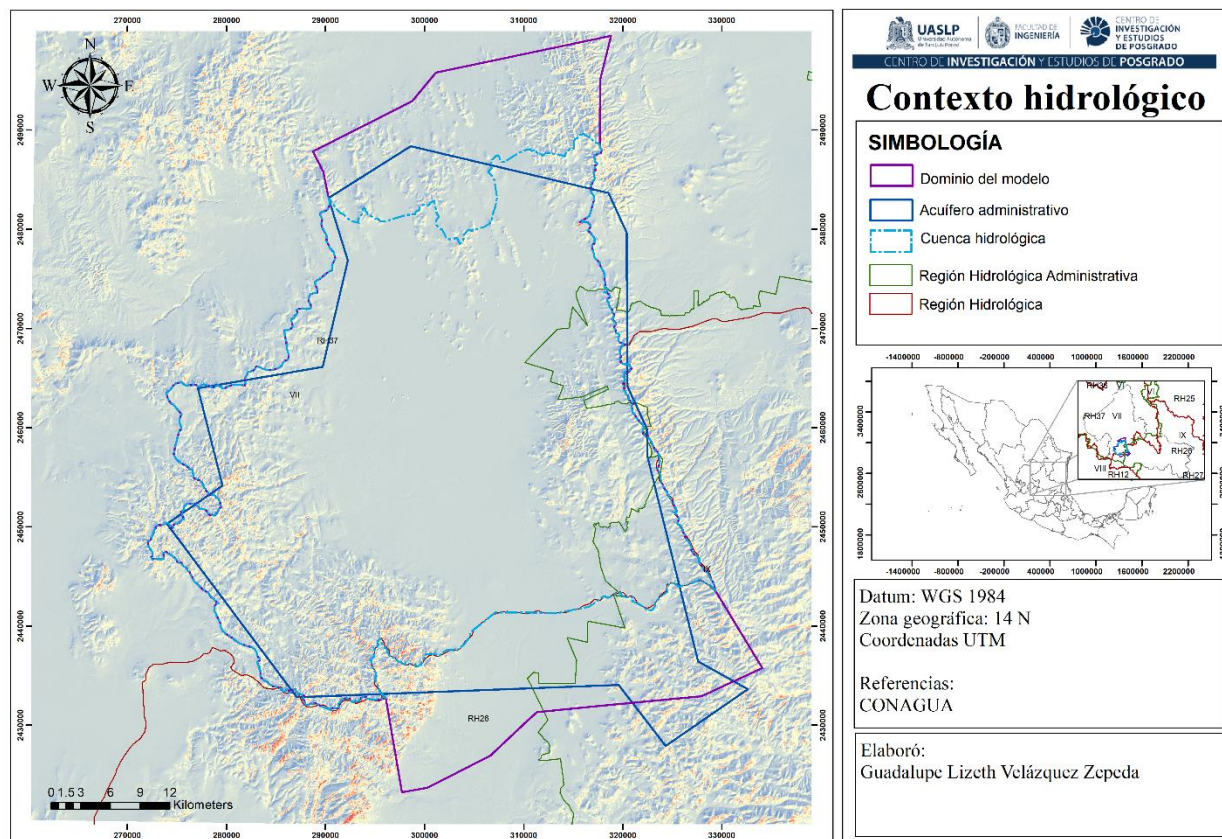


Figura 15. Contexto hidrológico

Constituye una cuenca endorreica cuya red de drenaje es formada en su totalidad por escorrentías de régimen intermitente con patrón de drenaje tipo paralelo y rectangular en las sierras al occidente y de tipo dendrítico al oriente. La densidad de drenaje disminuye en forma notable en el valle, como se muestra en la Figura 16.

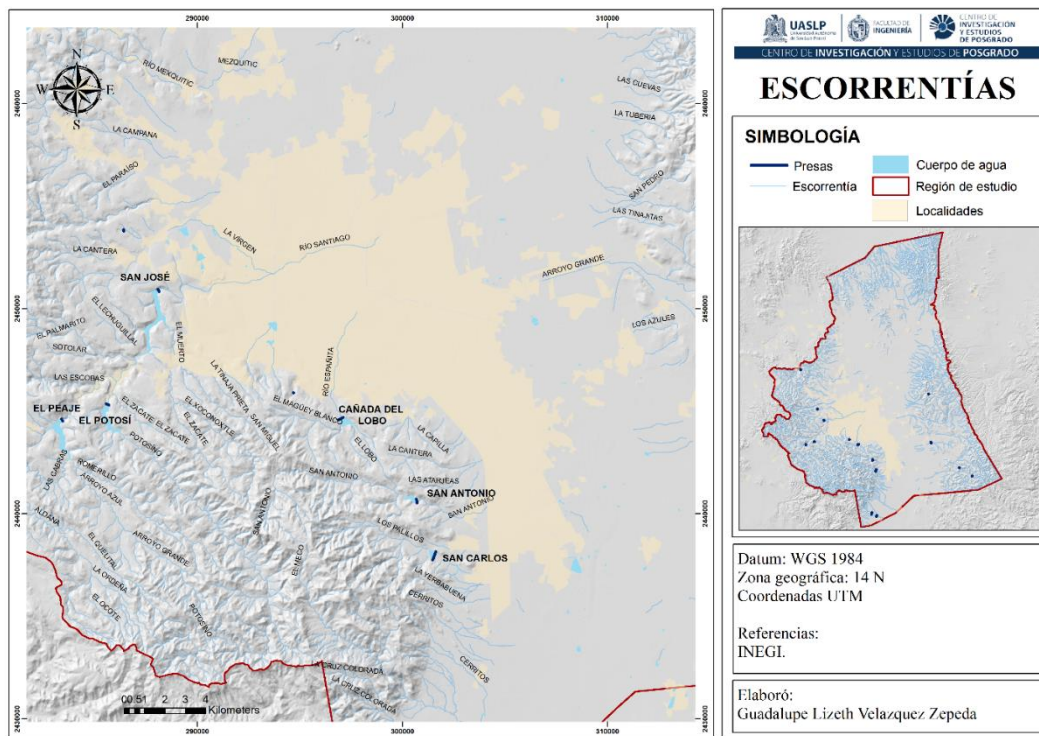


Figura 16. Mapa de escorrentías en la región de estudio.

Como se muestra en la Figura 17, se encuentra que el cauce del río Santiago ha sido convertido en un canal llevándolo a un área fuera de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí, lo que conlleva zonas de inundación en las planicies cercanas a Peñasco, La Tinaja, entre otras localidades.

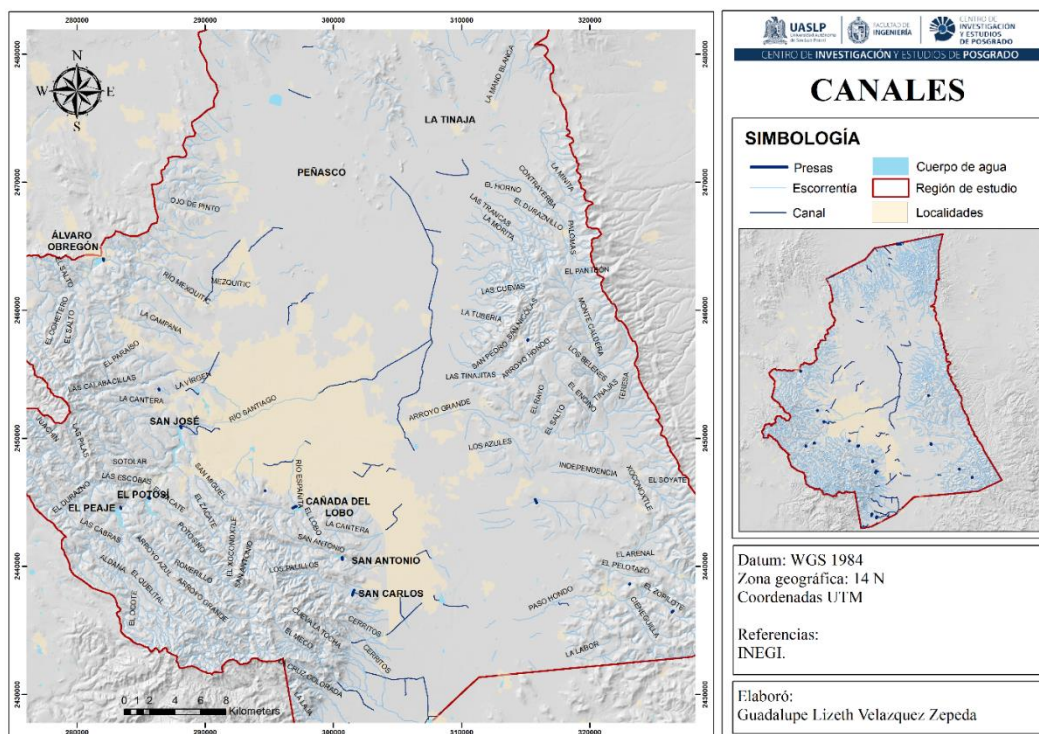


Figura 17. Canales de agua superficial en la región de estudio.

## II.1.7 Edafología

En la Figura 18, se presenta el mapa de edafología que define los tipos de suelo existentes en el dominio del modelo. En la Tabla 3, se muestran los porcentajes de área correspondientes a cada tipo de suelo; se observa que el mayor porcentaje corresponde al Xerosol Háplico, seguido del Litosol, el Feozem Háplico y el Regosol Calcárico.

Tabla 3. Edafología (Porcentaje de área)

| Descripción       | Área (Km <sup>2</sup> ) | Porcentaje (%) |
|-------------------|-------------------------|----------------|
| FEOZEM CALCÁRICO  | 144.78                  | 5.63           |
| FEOZEM HÁPLICO    | 489.73                  | 19.04          |
| LITOSOL           | 501.23                  | 19.49          |
| LUVISOL CRÓMICO   | 79.38                   | 3.09           |
| PLANOSOL MÓLICO   | 165.72                  | 6.44           |
| POBLADO           | 27.24                   | 1.06           |
| REGOSOL CALCÁRICO | 454.61                  | 17.68          |
| RENDZINA          | 0.24                    | 0.01           |
| VERTISOL PÉLICO   | 54.82                   | 2.13           |
| XEROSOL HÁPLICO   | 654.19                  | 25.44          |
| <b>Total</b>      | <b>2,571.94</b>         | <b>100.00</b>  |

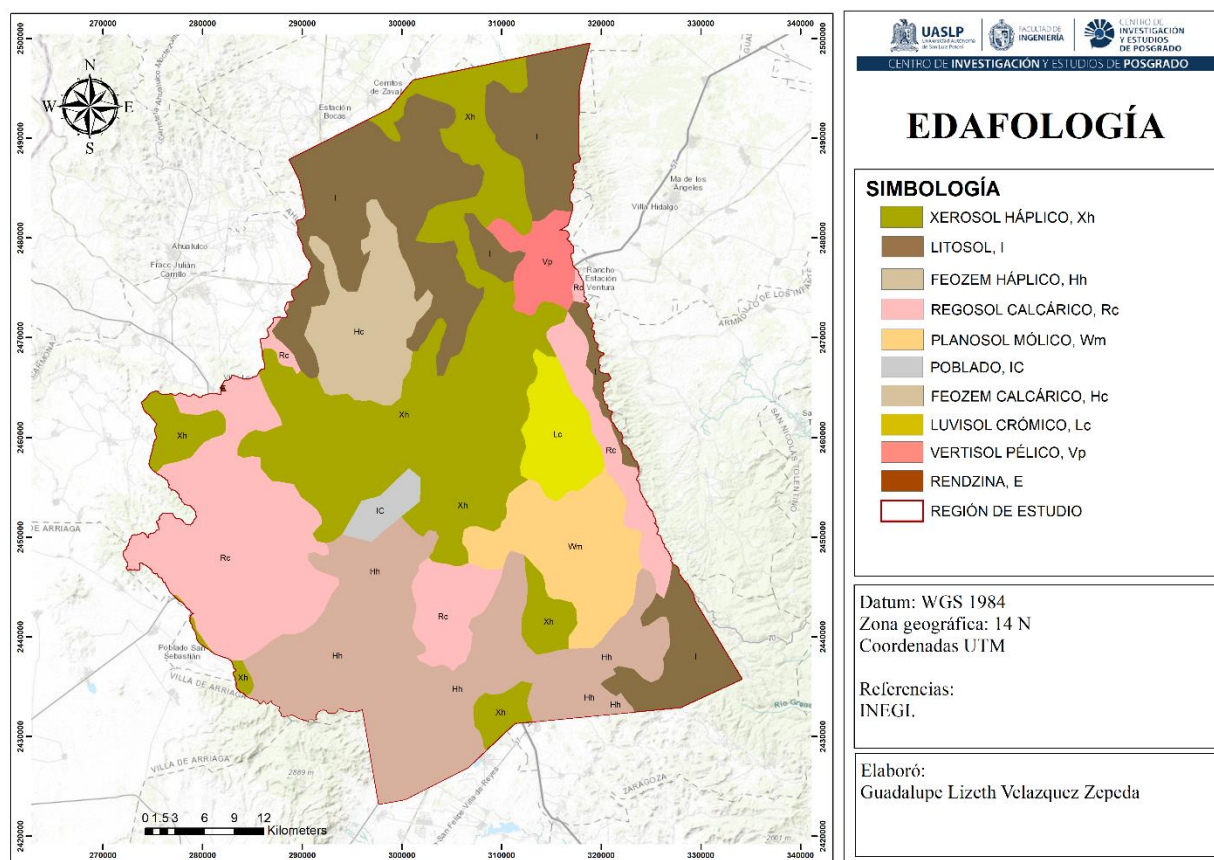


Figura 18. Mapa de Edafología. Fuente: (INIFAP & CONABIO, 1995)

**Xerosol Háplico (Xh):** Es un suelo seco que se encuentra en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte del país; vegetación de matorral y pastizal. Generalmente tienen una capa superficial de color claro debido al bajo contenido de materia orgánica. En la siguiente capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien muy semejante a la primera capa. A cierta profundidad presentan manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. Son de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en laderas o si están directamente sobre caliche o tepetate a escasa profundidad. El término háplico se refiere a que son suelos que no presentan características de otras subunidades existentes (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad, corresponde a un suelo tipo B con buena permeabilidad, con arenas finas y limos.

**Litosol (I):** También denominado suelo de piedra, es de los más abundantes de México. Se encuentran en todos los climas y diversos tipos de vegetación. Se caracterizan por su profundidad menor de 10 cm, debajo se encuentra roca, tepetate o caliche endurecido. Su fertilidad natural y la susceptibilidad a la erosión son muy variables (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad, corresponde a un suelo tipo B con buena permeabilidad, con arenas finas y limos.

**Feozem Háplico (Hh):** Es tierra parda, son suelos que se pueden presentar en casi cualquier tipo de relieve y clima, a excepción de regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto suelo más abundante de México. Tienen una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes; de profundidad muy variable. Cuando son profundos, se encuentran generalmente en planicies. Los Feozem poco profundos, que se encuentran en laderas o pendientes, presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, tienen rendimientos más bajos y se erosionan con más facilidad. El háplico no presenta otras características (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad corresponde a un suelo tipo C, con una permeabilidad media, con propiedades de arenas muy finas, limos y bastante arcilla.

**Regosol Calcárico (Rc):** Suelos situados en muy diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Presentan poco desarrollo y por ende capas muy diferentes entre sí. Generalmente son claros o pobres en materia orgánica, muy parecidos a la roca que les da origen. Asociado con Litosoles y con afloramientos de roca o tepetate. Frecuentemente son superficiales, de fertilidad variable y su productividad está condicionada a la profundidad y pedregosidad. Entran en esta categoría los suelos arenosos costeros. El calcárico es un suelo rico en cal y nutrientes para las plantas (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad, corresponde a un suelo tipo B con buena permeabilidad, con arenas finas y limos.

**Planosol Mólico (Wm):** Suelos generalmente desarrollados en relieves planos que en alguna parte del año se inundan en su superficie, medianamente profundos entre los 50 y 100 cm, y se encuentran principalmente en los climas templados y semiáridos, con pastizal o matorral. Se caracterizan por presentar debajo de la capa superficial, una capa infértil y relativamente delgada de un material claro que generalmente es menos arcilloso que las capas tanto que lo cubren como las capas que la subyacen. Debajo de esta capa se presenta un subsuelo muy arcilloso, o bien roca o tepetate, todos impermeables. Son muy susceptibles a la erosión, sobre todo en la superficie. Los suelos tipo mólico presentan una capa superficial suave, oscura, fértil y rica en materia orgánica

(INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad corresponde a un suelo tipo D, con una permeabilidad baja, con propiedades de arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo).

**Luviosol Crómico (Lc):** Son suelos con acumulación de arcilla, se encuentran en zonas templadas o tropicales lluviosas, o en algunas ocasiones en climas más secos; generalmente de bosque o selva y con un enriquecimiento de arcilla en el subsuelo. Suelen ser rojos o amarillentos, aunque también presentan tonos pardos, que no llegan a ser oscuros; tienen alta susceptibilidad a la erosión. El crómico se refiere a suelos color pardo o rojizo, en algunas ocasiones amarillento; de fertilidad moderada y con altos nutrientes (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad corresponde a un suelo tipo D, con una permeabilidad baja, con propiedades de arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo).

**Verisol Pélico (Xh):** Significa suelo que se revuelve; son suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con estaciones marcadas. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Su estructura es masiva y presenta un alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento (facetas), y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. Su color más común es el negro o gris oscuro en la zona centro a oriente de México y de color café rojizo hacia el norte del país. Tienen baja susceptibilidad a la erosión y alto riesgo de salinización. El pélico se refiere a una subunidad exclusiva de los vertisoles, que indica un color negro o gris oscuro (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad corresponde a un suelo tipo D, con una permeabilidad baja, con propiedades de arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo).

**Rendzina (E):** suelos superficiales que producen ruido con el arado por la cantidad de piedras que tienen. Estos suelen estar en climas semiáridos, tropicales o templados; tienen una capa superficial abundante en materia orgánica y muy fértil que descansa sobre roca caliza o materiales ricos en cal. Generalmente son suelos arcillosos y poco profundos (menos de 25 cm), pero llegan a soportar vegetación de selva alta perennifolia. Son moderadamente susceptibles a la erosión (INEGI, 2004). Según la clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad, corresponde a un suelo tipo B con buena permeabilidad, con arenas finas y limos.

Los suelos predominantes son suelos de buena permeabilidad con arenas finas y limos. El otro tipo de suelo de mayor área tiene permeabilidad media, con propiedades de arenas muy finas, limos y bastante arcilla. Entonces podemos decir que nos encontramos con suelos áridos y de buena a media permeabilidad.

## II.1.8 Uso de suelo y vegetación

En la Tabla 4, se muestran los diferentes tipos de uso de suelo y vegetación de la zona de estudio; se observa cómo varían siendo los predominantes los matorrales, vegetación secundaria y agricultura. En la Figura 19, se puede observar que no existen grandes cuerpos de agua.

Tabla 4. Uso de suelo y vegetación (Porcentaje)

| Uso de suelo y vegetación | Área (km <sup>2</sup> ) | Porcentaje (%) |
|---------------------------|-------------------------|----------------|
| Matorral                  | 671.56                  | 26.11          |
| Vegetación secundaria     | 637.00                  | 24.77          |
| Agricultura               | 573.92                  | 22.31          |
| Pastizal                  | 339.54                  | 13.20          |
| Asentamientos humanos     | 233.54                  | 9.08           |
| Bosque                    | 92.62                   | 3.60           |
| Mezquital                 | 9.07                    | 0.35           |
| Sin vegetación            | 7.50                    | 0.29           |
| Cuerpo de agua            | 7.16                    | 0.28           |
| <b>Total</b>              | <b>2,571.91</b>         | <b>100.00</b>  |

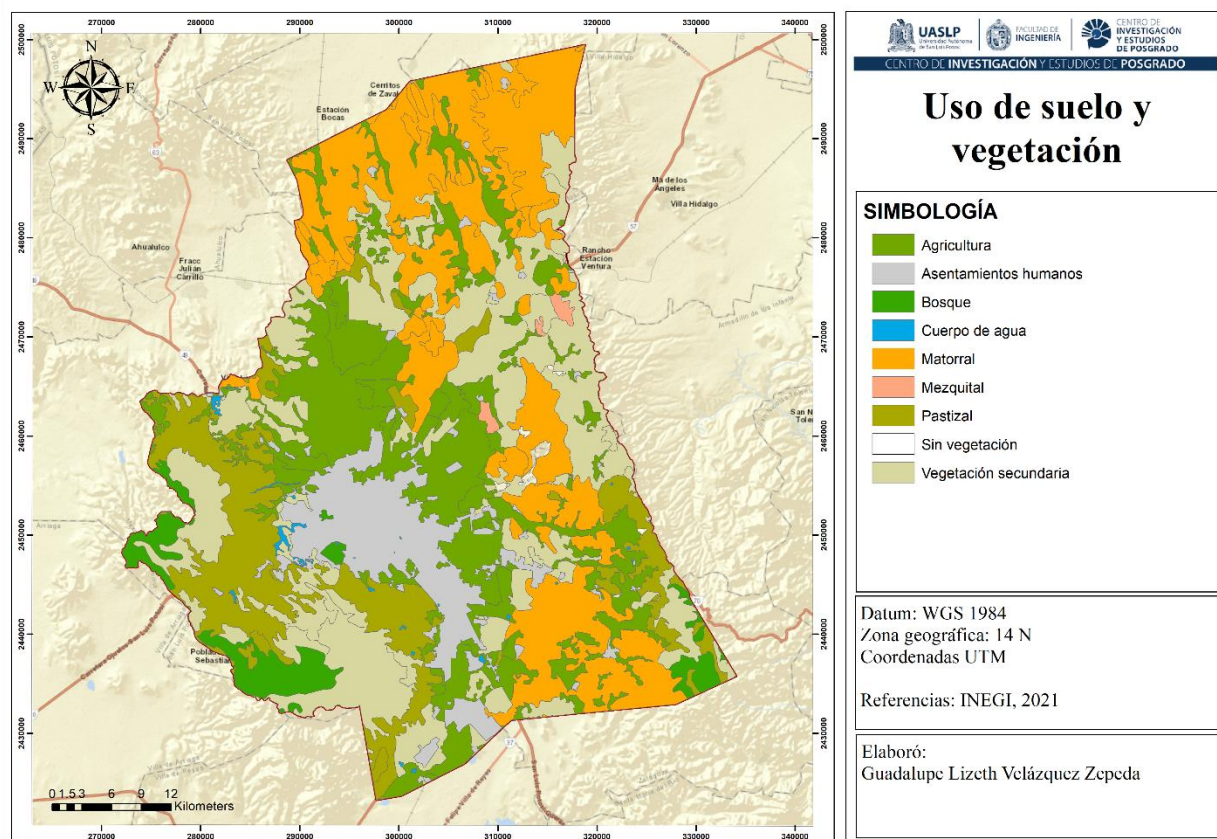


Figura 19. Mapa de uso de suelo y vegetación. Fuente: (INEGI, 2021)

Debido a la vasta clasificación que se tiene sobre el uso de suelo y vegetación, se recurrió a homogeneizar la información. A continuación, se describen de manera más detallada estos respecto a la información de INEGI (2017):

**Agricultura:** áreas de producción de cultivos, obtenidos para su utilización por el ser humano; existen diversos tipos de agricultura, pero en la región de estudio se presentan la agricultura de riego y la de temporal.

**Agricultura de riego:** Se utiliza agua complementaria para el desarrollo de los cultivos durante el ciclo agrícola, por lo que se denomina dependiendo de la manera de cómo se realiza la aplicación del agua, por ejemplo: la aspersión, goteo, agua rodada, etc.

**Agricultura de temporal:** es el tipo de agricultura del ciclo vegetativo donde los cultivos dependen del agua de lluvia, por lo que la cosecha está en función de la cantidad de precipitación y la capacidad del suelo.

Estos a su vez se subclasifican respecto a su temporalidad:

- Anual: su ciclo vegetativo no es mayor a un año.
- Semipermanente: el periodo de su ciclo vegetativo dura entre 2 y 10 años.
- Permanente: su ciclo vegetativo es mayor a diez años.

**Asentamientos humanos:** aglomerado demográfico, considerando dentro del mismo la naturaleza y las obras materiales que lo componen.

**Bosque de Encino:** comunidades arbóreas, subarbóreas u ocasionalmente arbustivas integradas por múltiples especies del género *Quercus* (encinos, robles) se localizan desde los 300 hasta los 2,800 m. Se vincula con los bosques de pino, formando una serie de bosques mixtos.

**Bosque de Coníferas:** comunidades arbóreas, subarbóreas u ocasionalmente arbustivas de origen septentrional (Holártico), en regiones templadas y semifrías con variables grados de humedad; con mínima variación de especies de coníferas y con pocos bejucos o sin ellos. Depende del clima y del suelo de una región para su desarrollo.

**Cuerpo de agua:** extensión con cubierta de agua.

**Matorral Xerófilo:** comunidades arbustivas, ocasionalmente subarbóreas, presentan ramificaciones desde la base del tallo, por la superficie del suelo y con altura variable, casi siempre inferior a 4 m. Se ubican principalmente en las zonas áridas y semiáridas de México.

**Pastizal:** comunidades herbáceas en las que prevalecen las especies de gramíneas o graminoides, están determinadas por las condiciones naturales de clima y suelo.

**Sin vegetación aparente:** son aquellas áreas en donde no es visible ninguna comunidad vegetal. Sé cómo los eriales, depósitos litorales, bancos de ríos y las áreas donde algún factor ecológico no permite o limita el desarrollo de la cubierta vegetal, por ejemplo, la falta de suelo, el elevado nivel de salinidad y/o climas extremos.

**Vegetación secundaria:** cuando el tipo de vegetación primaria es eliminado o alterado, debido a factores humanos o naturales, surge esta nueva comunidad vegetal significativamente diferente a la original con estructura y composición florística heterogénea.

Actualmente y a causa de la actividad antropogénica, la definición y delimitación de vegetación secundaria se han vuelto más complejas, ahora las zonas afectadas ocupan grandes superficies y variados ambientes, y a veces la presión es tanta que cohiben el desarrollo de la misma provocando una vegetación inducida.

Debido a su heterogeneidad, con base en las formas de vida presentes y su altura, se consideran tres fases:

- Vegetación secundaria herbácea
- Vegetación secundaria arbustiva
- Vegetación secundaria arbórea

## **II.2 Hidrogeoquímica**

Para entender los procesos que sufre el agua en los sistemas de flujo subterráneo de San Luis Potosí, es importante comprender las características hidrogeoquímicas del agua puesto que se encuentran relacionadas con el comportamiento del flujo y la calidad del agua. Para ello se realizaron campañas de muestreo de agua en la zona en los meses de mayo, junio, septiembre, octubre y diciembre del año 2024 por parte del proyecto “Caracterización de la composición química del agua subterránea en la región de San Luis Potosí: intersecciones entre el derecho humano al agua y riesgo en la salud” antes mencionado.

### **II.2.1 Muestreo de agua**

La selección de puntos de muestreo de agua subterránea en el acuífero de San Luis Potosí en el estado de San Luis Potosí, se realizó en primera instancia con base en la información histórica obtenida del estudio realizado por Cardona (2007) donde se presentan resultados de calidad de agua subterránea, así como la información disponible de la página del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2024).

Se identificaron los sitios de interés por áreas de población, agrícolas e industriales, se definió una distribución visual de los sitios de interés. Se utilizaron criterios para la selección de los sitios en los que se realizó la toma de muestras de agua subterránea, entre las que se mencionan:

- Que se trata de un aprovechamiento activo, con equipo de bombeo (en el caso de pozo) en condiciones adecuadas de funcionamiento
- Preferentemente se consideraron pozos de aprovechamiento público urbano y agrícola, ya que de acuerdo con la experiencia de campo son los que tienen las mejores condiciones en cuanto a mantenimiento y acceso, además de que en general operan diariamente y tienen regularmente un encargado.
- Tomando en cuenta la heterogeneidad de los medios geológicos que conforman el acuífero, se distribuyeron espacialmente.
- Que las autoridades municipales, ejidales o propietarios de los pozos seleccionados, permitan el acceso para la toma de la muestra de agua y medición de parámetros hidrogeoquímicos.

Debido a la falta de información sobre la propiedad de los pozos o si se encontraban activos o no, se optó por la visita en campo de estos y corroborar en el momento el permiso para obtener la muestra de agua, en este caso se llevaba una carta con la solicitud del acceso para fines académicos, en caso de obtener el permiso se tomaba la muestra de agua o se agendaba para otra fecha.

En el caso del organismo de INTERAPAS se concretó en una reunión que se tuvo el permiso para la visita de los pozos de agua a su cargo, así como la disposición para compartir su información.

En el caso de la zona industrial se contó con el permiso de la Comisión Estatal del Agua (CEA) para visitar seis pozos que están a su jurisdicción.

Se siguieron las rutas trazadas por las coordenadas definidas en primera instancia por el estudio de Cardona (2007) y después se cubrieron las áreas faltantes con las ubicaciones del REPDA.

De la información de Cardona (2007) se tenían 147 puntos, del REPDA se descargó la información de 1544 registros, ya en campo se fue encontrando que varios de los pozos del REPDA no contaban con la ubicación real o se encontraban en completo abandono.

Con base en lo anterior se seleccionaron 126 muestras de agua, su localización y características se muestran en la Figura 20 y de manera más desglosada en la Tabla 5.

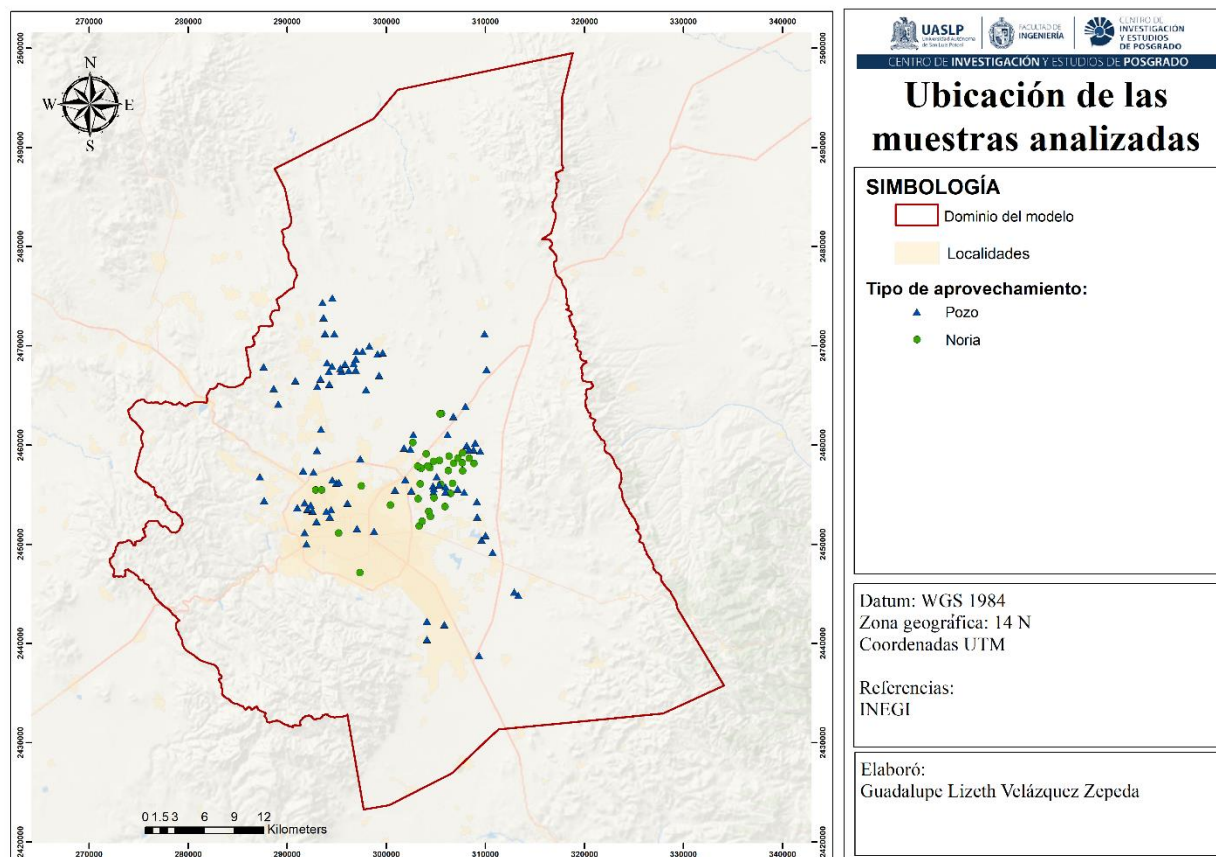


Figura 20. Ubicación de las muestras analizadas.

Tabla 5. Sitios donde se recolectaron las muestras de agua.

| Id  | X         | Y          | Localización                         | Tipo de captación | Uso      | Fecha de muestreo |
|-----|-----------|------------|--------------------------------------|-------------------|----------|-------------------|
| E1  | 291947.00 | 2450042.00 | Zona Universitaria                   | Pozo              | PÚBLICO  | 11/05/2024        |
| E2  | 310747.00 | 2449170.00 | Jassos                               | Pozo              | PÚBLICO  | 11/05/2024        |
| E3  | 309633.00 | 2450449.00 | La Florida                           | Pozo              | PÚBLICO  | 11/05/2024        |
| E4  | 310032.00 | 2450896.00 | Granjas la Florida                   | Pozo              | PÚBLICO  | 11/05/2024        |
| E5  | 309196.00 | 2452761.00 | El Portezuelo                        | Pozo              | PÚBLICO  | 11/05/2024        |
| E6  | 309167.00 | 2454282.00 | La Zorra                             | Pozo              | PÚBLICO  | 11/05/2024        |
| E7  | 304305.00 | 2453310.00 | Cerro de San Pedro                   | Noria             | AGRÍCOLA | 11/05/2024        |
| M1  | 297359.00 | 2447147.00 | Secundaria sentimientos de la Nación | Noria             | PÚBLICO  | 19/06/2024        |
| M35 | 299144.56 | 2469184.29 | Peñasco                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M36 | 299652.54 | 2469311.81 | Peñasco                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M37 | 298312.85 | 2469959.65 | Peñasco                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M38 | 297612.01 | 2469444.37 | Peñasco                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M39 | 297011.80 | 2469429.08 | Peñasco                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M40 | 296938.44 | 2468668.29 | Peñasco                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M41 | 296920.00 | 2467564.00 | Las Moras                            | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M42 | 296739.11 | 2468224.39 | Las Moras                            | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M43 | 296228.73 | 2467500.10 | Las Moras                            | Pozo              | AGRÍCOLA | 03/09/2024        |
| M44 | 295848.11 | 2468178.95 | Las Moras                            | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M45 | 294772.83 | 2471211.70 | Los Rodríguez                        | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M46 | 294559.18 | 2474833.97 | Los Rodríguez                        | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M47 | 293578.29 | 2474363.14 | Ojo de Pinto                         | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M48 | 293831.92 | 2471251.40 | Ojo de Pinto                         | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M49 | 294031.11 | 2468289.13 | Las Moras                            | Pozo              | PÚBLICO  | 04/09/2024        |
| M50 | 293378.06 | 2466675.58 | Las Moras                            | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M51 | 294534.36 | 2467935.05 | Las Moras                            | Pozo              | AGRÍCOLA | 04/09/2024        |
| M52 | 293669.14 | 2472839.56 | Ojo de Pinto                         | Pozo              | PÚBLICO  | 05/09/2024        |
| M53 | 294203.23 | 2467418.06 | Las Moras                            | Pozo              | PÚBLICO  | 05/09/2024        |
| M54 | 295477.83 | 2467422.66 | Las Moras                            | Pozo              | PÚBLICO  | 05/09/2024        |
| M55 | 295392.57 | 2467747.23 | Las Moras                            | Pozo              | PÚBLICO  | 05/09/2024        |
| M56 | 293036.80 | 2465904.31 | La Estanzuela                        | Pozo              | PÚBLICO  | 05/09/2024        |
| M57 | 294262.31 | 2466130.93 | La Cabra                             | Pozo              | PÚBLICO  | 05/09/2024        |
| M58 | 297395.81 | 2458618.38 | Milpillas                            | Pozo              | PÚBLICO  | 06/09/2024        |
| M59 | 306188.91 | 2461052.39 | Soledad                              | Pozo              | AGRÍCOLA | 06/09/2024        |
| M60 | 308128.19 | 2459964.82 | Facultad de Agronomía                | Pozo              | PÚBLICO  | 06/09/2024        |
| M61 | 308828.20 | 2459536.65 | Facultad de Agronomía                | Pozo              | PÚBLICO  | 06/09/2024        |
| M62 | 308354.03 | 2459544.45 | Facultad de Agronomía                | Pozo              | PÚBLICO  | 06/09/2024        |
| M63 | 310127.21 | 2467611.85 | San Elías                            | Pozo              | PÚBLICO  | 06/09/2024        |

| Id   | X         | Y          | Localización             | Tipo de captación | Uso      | Fecha de muestreo |
|------|-----------|------------|--------------------------|-------------------|----------|-------------------|
| M64  | 293420.71 | 2461601.83 | Maravillas               | Pozo              | PÚBLICO  | 07/09/2024        |
| M65  | 302553.83 | 2455395.91 | Fracción Rivera          | Pozo              | PÚBLICO  | 07/09/2024        |
| M66  | 305107.83 | 2456814.70 | Palma de la Cruz         | Pozo              | AGRÍCOLA | 07/09/2024        |
| M67  | 305508.00 | 2456040.00 | Rancho El Diamante       | Noria             | AGRÍCOLA | 07/09/2024        |
| M68  | 305394.79 | 2456014.59 | Rancho El Diamante       | Pozo              | AGRÍCOLA | 07/09/2024        |
| M69  | 306705.71 | 2456132.51 | Palma de la Cruz         | Noria             | AGRÍCOLA | 07/09/2024        |
| M70  | 307885.68 | 2455251.00 | Unidad Agrícola Soledad  | Pozo              | AGRÍCOLA | 07/09/2024        |
| M71  | 290827.05 | 2466497.49 | Los Rojas                | Pozo              | PÚBLICO  | 08/09/2024        |
| M72  | 287626.17 | 2467901.09 | Fracción de Ojo de Pinto | Pozo              | PÚBLICO  | 08/09/2024        |
| M73  | 288659.93 | 2465694.43 | Los Vásquez              | Pozo              | PÚBLICO  | 08/09/2024        |
| M74  | 297965.91 | 2465588.53 | Maravillas               | Pozo              | PÚBLICO  | 08/09/2024        |
| M75  | 301798.43 | 2459703.45 | Soledad                  | Pozo              | AGRÍCOLA | 08/09/2024        |
| M76  | 305953.20 | 2453787.90 | Soledad                  | Noria             | AGRÍCOLA | 08/09/2024        |
| M77  | 309158.25 | 2454278.75 | Soledad                  | Pozo              | PÚBLICO  | 08/09/2024        |
| M78  | 309006.72 | 2460217.42 | El Huizache              | Pozo              | PÚBLICO  | 09/09/2024        |
| M79  | 309498.09 | 2459385.89 | INIFAP                   | Pozo              | AGRÍCOLA | 09/09/2024        |
| M80  | 307999.11 | 2463895.38 | Cándido Navarro          | Pozo              | PÚBLICO  | 09/09/2024        |
| M81  | 293017.99 | 2459445.73 | Maravillas               | Pozo              | PÚBLICO  | 10/09/2024        |
| M82  | 309943.28 | 2471215.70 | La Tinaja                | Pozo              | PÚBLICO  | 10/09/2024        |
| M83  | 289100.82 | 2464119.38 | Matancillas              | Pozo              | PÚBLICO  | 11/09/2024        |
| M84  | 302697.16 | 2460256.08 | Rinconada                | Noria             | AGRÍCOLA | 11/09/2024        |
| M85  | 302453.90 | 2459589.44 | Rinconada                | Pozo              | AGRÍCOLA | 11/09/2024        |
| M86  | 305595.80 | 2463170.29 | Cándido Navarro          | Noria             | AGRÍCOLA | 11/09/2024        |
| M87  | 305448.80 | 2463145.81 | Cándido Navarro          | Noria             | AGRÍCOLA | 11/09/2024        |
| M88  | 306773.16 | 2462884.70 | Cándido Navarro          | Pozo              | AGRÍCOLA | 11/09/2024        |
| M89  | 302756.49 | 2461067.37 | Rinconada                | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M90  | 306500.09 | 2455115.69 | Valle de la Palma        | Noria             | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M91  | 306007.05 | 2455767.76 | Soledad                  | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M92  | 306009.26 | 2455280.85 | Rancho Las Cuatas        | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M93  | 304720.60 | 2455886.10 | Soledad                  | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M94  | 304807.08 | 2455603.21 | Rancho La Esmeralda      | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M95  | 304772.19 | 2455243.95 | Soledad                  | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M96  | 301924.61 | 2456499.66 | Granja La Blanquita      | Pozo              | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M97  | 303435.87 | 2456077.90 | Fraccionamiento Rivera   | Noria             | AGRÍCOLA | 12/09/2024        |
| M98  | 303544.95 | 2457661.39 | Ejido El Zapote          | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M99  | 304410.51 | 2457693.22 | Rancho Loredó            | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M100 | 304187.79 | 2457888.86 | Soledad                  | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M101 | 304783.03 | 2458351.44 | Soledad                  | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M102 | 305392.92 | 2458444.08 | Soledad                  | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M103 | 306359.01 | 2458865.25 | Soledad                  | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M104 | 306807.01 | 2458166.26 | Soledad                  | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |

| Id   | X          | Y          | Localización                        | Tipo de captación | Uso      | Fecha de muestreo |
|------|------------|------------|-------------------------------------|-------------------|----------|-------------------|
| M105 | 307254.46  | 2458678.62 | Palma de la Cruz                    | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M106 | 306283.37  | 2457431.88 | Palma de la Cruz                    | Noria             | PÚBLICO  | 13/09/2024        |
| M107 | 303169.02  | 2457866.76 | Soledad                             | Noria             | AGRÍCOLA | 13/09/2024        |
| M108 | 299285.03  | 2467021.47 | Tanque Uresti                       | Pozo              | PÚBLICO  | 15/09/2024        |
| M109 | 295212.36  | 2451131.67 | Ejido El Zapote                     | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M110 | 304040.02  | 2459090.53 | Soledad                             | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M111 | 307715.52  | 2459200.84 | Palma de la Cruz                    | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M112 | 308397.04  | 2458673.01 | Soledad                             | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M113 | 308871.10  | 2458141.59 | Palma de la Cruz                    | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M114 | 307684.26  | 2458220.21 | Soledad                             | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M115 | 307721.68  | 2457401.25 | Soledad                             | Noria             | AGRÍCOLA | 17/09/2024        |
| M116 | 307218.66  | 2455560.15 | Priv. Las Haciendas                 | Pozo              | PÚBLICO  | 18/09/2024        |
| M117 | 303330.54  | 2451827.77 | 9 de mayo                           | Noria             | AGRÍCOLA | 18/09/2024        |
| M118 | 303634.49  | 2452320.50 | Rancho Los Medina                   | Noria             | AGRÍCOLA | 18/09/2024        |
| M119 | 304480.07  | 2452811.61 | Col. Terra y Libertad               | Noria             | AGRÍCOLA | 18/09/2024        |
| M120 | 304816.75  | 2454676.22 | Fracc. Rivera (Pilgrims)            | Noria             | AGRÍCOLA | 18/09/2024        |
| M121 | 303229.53  | 2454585.41 | Rancho Gerardo Gallego              | Noria             | AGRÍCOLA | 18/09/2024        |
| M122 | 300438.00  | 2453947.00 | El Morro                            | Noria             | PÚBLICO  | 25/09/2024        |
| M123 | 294975.00  | 2456175.00 | Huerta de Ángel                     | Pozo              | PÚBLICO  | 22/09/2024        |
| M125 | 287252.00  | 2456805.00 | Pozo Blanco                         | Pozo              | PÚBLICO  | 28/09/2024        |
| M126 | 287675.00  | 2454414.00 | Villa Magna                         | Pozo              | PÚBLICO  | 28/09/2024        |
| M127 | 292653.00  | 2957293.00 | La angostura                        | Pozo              | PÚBLICO  | 28/09/2024        |
| M128 | 291631.00  | 2557400.00 | Monte oscuro, monte de Carmona      | Pozo              | PÚBLICO  | 28/09/2024        |
| M129 | 292896.00  | 2455469.00 | Sauzalito                           | Noria             | AGRÍCOLA | 30/09/2024        |
| M130 | 297483.00  | 2455873.00 | Sauzalito                           | Noria             | PÚBLICO  | 30/09/2024        |
| M131 | 293483.00  | 2455472.00 | Sauzalito                           | Noria             | PÚBLICO  | 30/09/2024        |
| M133 | 294566.00  | 2456483.00 | Ponciano Arriaga                    | Pozo              | PÚBLICO  | 30/09/2024        |
| M134 | 297058.00  | 2451159.00 | Av. México                          | Pozo              | PÚBLICO  | 01/10/2024        |
| M135 | 295220.00  | 2456229.00 | Col. Imperio Azteca                 | Pozo              | PÚBLICO  | 30/09/2024        |
| M136 | 294320.00  | 2452739.00 | Los Reyes                           | Pozo              | PÚBLICO  | 01/10/2024        |
| M137 | 293746.00  | 2453315.00 | Jacarandas                          | Pozo              | PÚBLICO  | 01/10/2024        |
| M138 | 294434.00  | 2453479.00 | Aviación                            | Pozo              | PÚBLICO  | 01/10/2024        |
| M139 | 2912569.00 | 2453372.00 | Tecnológico                         | Pozo              | PÚBLICO  | 01/10/2024        |
| M140 | 298792.53  | 2451310.80 | Hogares FF CC                       | Pozo              | PÚBLICO  |                   |
| M141 | 300899.00  | 2455460.00 | Foviste                             | Pozo              | PÚBLICO  | 02/10/2024        |
| M142 | 292971.00  | 2452289.00 | Industrial Aviación Valle Campestre | Pozo              | PÚBLICO  | 02/10/2024        |
| M143 | 291774.00  | 2451179.00 | Parque Morales                      | Pozo              | PÚBLICO  | 02/10/2024        |
| M144 | 292043.00  | 2453540.00 | Villas de Jacarandas                | Pozo              | PÚBLICO  | 02/10/2024        |
| M145 | 291035.00  | 2453694.00 | Jardines de Jacarandas              | Pozo              | PÚBLICO  | 02/10/2024        |

| Id   | X         | Y          | Localización                 | Tipo de captación | Uso       | Fecha de muestreo |
|------|-----------|------------|------------------------------|-------------------|-----------|-------------------|
| M146 | 291781.00 | 2454162.00 | Mezquital #1 Revolución #406 | Pozo              | PÚBLICO   | 02/10/2024        |
| M147 | 292384.00 | 2453950.00 | Lomas del Mezquital          | Pozo              | PÚBLICO   | 02/10/2024        |
| M148 | 296090.00 | 2454154.00 | Parque Tangamanga II         | Pozo              | PÚBLICO   | 02/10/2024        |
| M149 | 313343.00 | 2444851.00 | Ciudad Satélite, Jassos      | Pozo              | INDUTRIAL | 04/12/2024        |
| M150 | 312934.00 | 2445172.00 | Ciudad Satélite              | Pozo              | INDUTRIAL | 04/12/2024        |
| M151 | 304129.00 | 2442247.00 | Pozos                        | Pozo              | INDUTRIAL | 04/12/2024        |
| M152 | 304108.00 | 2440409.00 | Arroyos                      | Pozo              | INDUTRIAL | 04/12/2024        |
| M153 | 305861.00 | 2441900.00 | Eje 132                      | Pozo              | INDUTRIAL | 04/12/2024        |
| M154 | 309383.00 | 2438783.00 | La Pila                      | Pozo              | INDUTRIAL | 05/12/2024        |

De estas 36 fueron norias y 90 pozos profundos, de las cuales 56 eran de uso público urbano, 32 de uso agrícola y 6 de uso industrial en pozos; para las norias fueron 30 para uso agrícola y 2 para uso público urbano, como se muestra en la Figura 21.

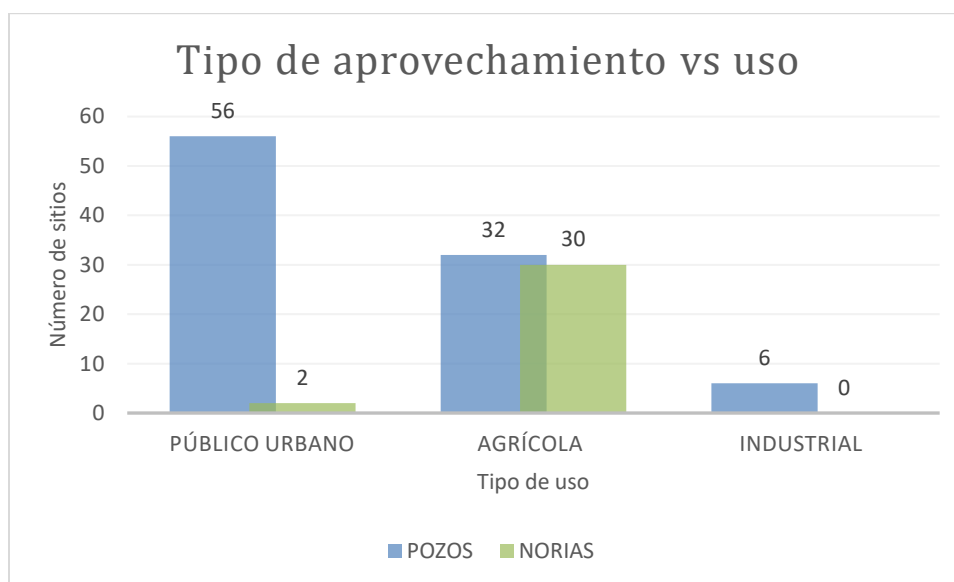


Figura 21. Tipo de aprovechamiento vs uso del agua de las muestras obtenidas.

Se llevó a cabo la recolecta de la muestra como su preservación de acuerdo con los Términos de Referencia establecidos y además a la NOM-014-SSA1-1993 referente a los “Procedimientos sanitarios para el muestreo de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados” (DOF, 1993).

## II.2.2 Metodología

### II.2.2.1 Toma de muestras de agua subterránea

Durante el tiempo que lleva la recolección de muestras de agua subterránea y la realización de los análisis de laboratorio respectivos, en ocasiones se pueden presentar modificaciones en las concentraciones originales; por ello es indispensable aplicar técnicas de conservación de la muestra de agua.

Se requirió de la utilización de diversos tipos de materiales, de tal forma que los diversos frascos y los tipos de preservación fueron diseñados para realizar los diversos tipos de análisis físicos, químicos e isotópicos requeridos en los Términos de Referencia del estudio a las muestras de agua.

En la Tabla 6, se presenta una descripción de los análisis definidos en los Términos de Referencia, capacidad y tipo de envase utilizado para el almacenamiento de la muestra, así como las técnicas de preservación utilizadas.

*Tabla 6. Materiales utilizados para los análisis fisicoquímicos en campo y su preservación.*

| Muestra para análisis de laboratorio                                                                                                                                                                                                                                  | Tipo de envase               | Cantidad | Capacidad | Conservador                                   | Filtración |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------|-----------|-----------------------------------------------|------------|
| Cationes mayores y menores (sodio, potasio, calcio, magnesio), metales, no metales, metaloides y halógenos traza (plomo, cromo, cadmio, mercurio, hierro, boro, arsénico, zinc, aluminio, bario, cobre, manganeso, litio, bromo, iodo, uranio, selenio, entre otros). | Polietileno de alta densidad | 1        | 60 ml     | Refrigeración, HNO <sub>3</sub>               | sí         |
| Nitratos (N-NO <sub>3</sub> ) y nitritos (N-NO <sub>2</sub> )                                                                                                                                                                                                         | Polietileno de alta densidad | 1        | 60 ml     | Refrigeración, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | sí         |
| Isótopos ambientales de la molécula de agua (d <sup>18</sup> O, d <sup>2</sup> H)                                                                                                                                                                                     | vial                         | 1        | 2 ml      | Refrigeración                                 | sí         |
| Aniones (alcalinidad total, bicarbonato, carbonato, cloruro, sulfato, fluoruro) y dureza total                                                                                                                                                                        | Polietileno de alta densidad | 1        | 500 ml    | Refrigeración                                 | no         |

La preservación de la muestra que se tomó para cationes mayores, metales, algunos no metales y metaloides traza incluyó filtrado, con una membrana de acetato de celulosa con aberturas de diámetro nominal de 0.45 µm (micras o micrones) mediante una jeringa de 60 ml de capacidad adaptada al filtro señalado. Se muestra una Figura 22, que presenta el proceso de filtrado de la muestra de agua utilizando la jeringa, portafiltro y filtro. Al filtrar es posible remover la mayoría de las bacterias, partículas suspendidas, hidróxidos de hierro y manganeso coloidales. Adicionalmente, a esta muestra se le agregó ácido nítrico (ultrapuro) para disminuir el pH a menos de 2 unidades y mantener en solución los solutos de interés hasta el momento de análisis en laboratorio. También se le adicionó ácido sulfúrico (ultrapuro) a la botella definida para la medición de nitratos y nitritos.



*Figura 22. Detalle de la jeringa y portafiltro utilizados en el filtrado de la muestra de agua.*

En la totalidad de los casos, la muestra de agua se tomó en alguna válvula del tren de descarga principal o en alguna tubería secundaria, tratando de que fuera en un sitio lo más cercano posible al pozo o zona de descarga, sin embargo, en algunas ocasiones se tuvo que recurrir a la toma de la muestra en jarra de 5 l para su transporte a un sitio más viable para su filtrado y embazado. Además, se cuidó de que el sistema de cloración estuviera apagado al momento de tomar la muestra.

Para evitar la contaminación por el medio de embazado, se utilizaron frascos nuevos de polietileno de alta densidad, con tapa y contratapa lavados con agua destilada. Además, se tomó la precaución de enjuagar con agua del aprovechamiento al menos 3 veces cada uno de los frascos, antes de tomar la muestra. Se evitó la permanencia de burbujas en el líquido para limitar cambios en las concentraciones originales de la muestra.

Se muestran los principales materiales utilizados: a) frascos de polietileno de diferentes capacidades y el vial de vidrio de 2 ml, b) jeringas, portafiltro, filtro, c) ácidos para la preservación de las muestras, como se aprecia en la Figura 23.



Figura 23. Fotografías de la toma de muestras de agua subterránea.

### **II.2.2.2 Medición de los parámetros fisicoquímicos en campo**

La medición de los parámetros de campo es parte fundamental del proceso de toma de muestra de agua, entre los parámetros medidos se encuentran: a) temperatura, b) conductividad eléctrica (CE), c) pH, d) potencial óxido-reducción (ORP), e) oxígeno disuelto y f) alcalinidad total. Estas condiciones permiten establecer las condiciones originales del agua subterránea en el momento de su extracción, el registro en campo es fundamental, por lo que se tuvo especial cuidado en su medición.

Para la medición de los parámetros de campo se utilizó una sonda multiparamétrica (QUATRO Professional Plus) marca YSI. Con este equipo se realizaron mediciones de los parámetros de campo, a excepción de la alcalinidad de campo que se determinó por medio del método potenciométrico utilizando un equipo portátil.

- Celda de aislamiento, actividad de los iones hidrógeno (pH), conductividad eléctrica y temperatura, registro del potencial redox (ORP), registro del oxígeno disuelto, registro de la alcalinidad total de campo.

Durante el registro de los parámetros hidrogeoquímicos de campo, fue necesario evitar y/o limitar los cambios de los parámetros al exponerse a la atmósfera, por lo que se realizaron diferentes alternativas. En la mayoría de los sitios fue posible utilizar una celda de aislamiento, dispositivo que limita la interacción de agua subterránea extraída por el pozo con la atmósfera, evitando que el agua disuelva oxígeno adicional al que contiene y que se libere  $\text{CO}_2$  previamente a la medición de los parámetros. Este aparato se conecta por medio de mangueras de diámetro pequeño a válvulas ubicadas en la descarga del pozo. De este modo, el agua extraída fluye en forma continua, lo que permite que, por medio de la introducción de los electrodos respectivos en la celda de aislamiento, se lleven a cabo las mediciones señaladas previamente. Así mismo genera una mayor estabilización de las lecturas, sobre todo en las mediciones de pH y ORP. En los sitios donde no se pudo colocar la celda de aislamiento, se recurrió a obtener la muestra en una jarra y tomar los parámetros en un tiempo más corto.

- Registro de la alcalinidad total de campo

Se recopiló la información de campo en formatos respectivos donde se describió el tipo de aprovechamiento, los parámetros de campo y la descripción general del sitio. En la Figura 24, se presenta el ejemplo de la hoja de campo en la que se recopiló información relativa al muestreo.

Los resultados de los cálculos realizados para la determinación de la alcalinidad total y las concentraciones de las especies de  $\text{HCO}_3$  y  $\text{CO}_3$  se presentan en la Tabla 7.

"FORMATO DE TOMA DE MUESTRAS DE AGUA SUBTERRÁNEA"

## DATOS GENERALES

|                             |                                |                   |            |                         |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------|------------|-------------------------|
| Clave del Aprovechamiento   | M-36                           | Número de muestra | 2          |                         |
| Coordenadas UTM Datum WGS84 | X= 299851                      |                   | Y= 2480315 |                         |
| Elevación (msnm)            | 1829                           | Zona UTM          | 14N        |                         |
| Municipio                   | San Luis Potosí                |                   |            |                         |
| Localidad                   | Peñasco                        |                   |            |                         |
| Fecha                       | 03-sep-24                      |                   |            |                         |
| Litología Predominante      | Aluvión                        |                   |            |                         |
| Estructura asociada         | Latita Portezuelo, sin fallas. |                   |            |                         |
| Lugar de Toma de Muestra    | Llave en Brocal de pozo        | Descarga natural  | Canal      | Estanque/Lago/Manantial |

|                                |  |                |  |                          |  |                    |  |                                 |  |        |
|--------------------------------|--|----------------|--|--------------------------|--|--------------------|--|---------------------------------|--|--------|
| Uso del Agua                   |  | Público-Urbano |  | Agrícola                 |  | Forestal           |  | Doméstico                       |  |        |
|                                |  | Agropecuario   |  | Abrevadero               |  | Industrial         |  | Servicios                       |  |        |
| NE:                            |  |                |  | Régimen:                 |  | hora/día           |  |                                 |  |        |
| ND:                            |  |                |  | Q:                       |  | lps                |  |                                 |  |        |
| Tipo de bomba:                 |  |                |  | Sondeo:                  |  |                    |  | Longitud de columna de succión: |  | m      |
| Diam. De columna de succión:   |  | 4 pig          |  | Diametro de descarga:    |  | 4 pig              |  | Ademe:                          |  | 16 pig |
| Profundidad total (m):         |  |                |  |                          |  | Altura del Brocal: |  |                                 |  |        |
| CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS |  |                |  |                          |  |                    |  |                                 |  |        |
| Color                          |  | Incolora       |  | Olor                     |  | No                 |  |                                 |  |        |
| Apariencia                     |  | Cristalina     |  | Sedimentación            |  | No                 |  |                                 |  |        |
| Turbidez                       |  | No             |  | Desprendimiento de gases |  | No                 |  |                                 |  |        |

## PARÁMETROS MEDIDOS EN CAMPO

| Hora de Inicio      | 10:29 | 10:31 | 10:33 | 10:35 | 10:37 | 10:39 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tiempo (min.)       | 1     | 3     | 5     | 7     | 9     | 11    |
| T (°C)              | 28.3  | 28.3  | 28.3  | 28.3  | 28.3  | 28.3  |
| O.D. (%)            | 43.10 | 38.10 | 37.50 | 37.30 | 37.10 | 37.00 |
| O.D. (mg/L)         | 3.34  | 2.95  | 2.92  | 2.9   | 2.89  | 2.88  |
| CE (microS/cm)      | 424.7 | 423.9 | 423.6 | 423.8 | 423.6 | 423.5 |
| pH                  | 7.51  | 7.5   | 7.5   | 7.5   | 7.5   | 7.5   |
| ORP (E campo en mV) | 197.3 | 201.7 | 202.9 | 204.6 | 205.4 | 206.4 |

## DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD DE CAMPO

|          |             |                     |    |    |          |    |    |
|----------|-------------|---------------------|----|----|----------|----|----|
| N ácido: | 1.6 ± 0.008 | V muestra (Alcal.): | 50 | ml | Filtrada | SI | NO |
|----------|-------------|---------------------|----|----|----------|----|----|

|                                                        |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>NÚMERO de<br>vueltes | 0   | 10   | 20   | 30   | 40   | 50   | 53   | 56   | 58   | 60   | 62   | 64   | 65   | 66   | 67   | 68   | 69   | 71   |
| pH                                                     | 7.7 | 6.92 | 6.59 | 6.34 | 6.11 | 5.83 | 5.71 | 5.69 | 5.49 | 5.35 | 5.17 | 4.97 | 4.75 | 4.49 | 4.23 | 4.02 | 3.88 | 3.72 |

### INFORMACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA COLECTADA

| MUESTRA PARA         | TIPO DE ENVASE | CANTIDAD | CAPACIDAD | CONSERVADOR          | FILTRADA? | Check     |
|----------------------|----------------|----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| CATIONES Y METALES   | POLIETILENO    | 1        | 60 ML     | REFRIGERACIÓN, HNO3  | SI        | VERDADERO |
| NITRATOS             | POLIETILENO    | 2        | 60 ML     | REFRIGERACIÓN, H2SO4 | SI        | VERDADERO |
| ANIONES              | POLIETILENO    | 1        | 500 ML    | REFRIGERACIÓN        | NO        | VERDADERO |
| ISÓTOPOS AMBIENTALES | VIDRIO         | 1        | 2 ML      | REFRIGERACIÓN        | SI        | VERDADERO |

### OBSERVACIONES

Dentro de los sembrados y corral ganadero de Don Fermín

Alcalinidad realizada en el laboratorio.

Tipo de aprovechamiento: Pozo

## FOTOGRAFIA



*Figura 24. Ejemplo de formato de campo utilizado.*

Tabla 7. Resumen de resultado de los parámetros fisicoquímicos tomados en campo.

| Id  | X      | Y       | Tipo  | Fecha de muestreo | Temp | Oxígeno Disuelto (%) | Oxígeno Disuelto (mg/L) | Conductividad Eléctrica (µS/cm) | pH   | Potencial REDOX ORP (mV) | Alcalinidad total | CO3  | HCO3   | Potencial REDOX ORP (Zobell (mV)) | Eh Zobell (mV) | Eh (mV) | pe   |
|-----|--------|---------|-------|-------------------|------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|------|--------------------------|-------------------|------|--------|-----------------------------------|----------------|---------|------|
|     |        |         |       |                   | (°C) |                      |                         |                                 |      |                          | mg/l CaCO3        | mg/l | mg/l   |                                   |                |         |      |
| E1  | 291947 | 2450042 | Pozo  | 11/05/2024        | 34.7 | 51.8                 | 2.9                     | 504                             | 7.29 | 203.7                    | 139.02            | 0.2  | 168.94 | 215.16                            | 406.66         | 395     | 6.70 |
| E2  | 310747 | 2449170 | Pozo  | 11/05/2024        | 31.7 | 71.7                 | 4.22                    | 347.6                           | 7.93 | 199.6                    | 111.1             | 0.3  | 134.78 | 218.76                            | 413.26         | 394     | 6.68 |
| E3  | 309633 | 2450449 | Pozo  | 11/05/2024        | 30   | 69.8                 | 4.21                    | 338                             | 7.99 | 195.4                    | 116.28            | 0.48 | 140.76 | 220.8                             | 417            | 392     | 6.64 |
| E4  | 310032 | 2450896 | Pozo  | 11/05/2024        | 30.1 | 174.5                | 10.52                   | 534                             | 7.85 | 214.4                    | 141.02            | 0.7  | 170.42 | 220.68                            | 416.78         | 411     | 6.96 |
| E5  | 309196 | 2452761 | Pozo  | 11/05/2024        | 31.4 | 106.8                | 6.26                    | 334.6                           | 7.88 | 195.6                    | 135               | 0.44 | 163.64 | 219.12                            | 413.92         | 390     | 6.62 |
| E6  | 309167 | 2454282 | Pozo  | 11/05/2024        | 32.2 | 74.1                 | 4.31                    | 340.1                           | 7.89 | 171.5                    | 93.3              | 0.3  | 113.12 | 218.16                            | 412.16         | 366     | 6.19 |
| E7  | 304305 | 2453310 | Noria | 11/05/2024        | 20.6 | 50.2                 | 3.5                     | 2063                            | 6.99 | 182.6                    | 354.84            | 0.2  | 432.26 | 232.08                            | 437.68         | 388     | 6.58 |
| M1  | 297359 | 2447147 | Noria | 19/06/2024        | 21.6 | 9.8                  | 0.68                    | 759                             | 6.94 | 156.4                    | 209.16            | 0.3  | 254.44 | 230.88                            | 435.48         | 361     | 6.12 |
| M35 | 299145 | 2469184 | Pozo  | 03/09/2024        | 25.6 | 45.4                 | 3.71                    |                                 | 7.56 | 196.8                    | 148.04            | 0.36 | 179.78 | 226.08                            | 426.68         | 397     | 6.74 |
| M36 | 299653 | 2469312 | Pozo  | 03/09/2024        | 28.3 | 37                   | 2.88                    | 423.5                           | 7.5  | 206.4                    | 133.4             | 0.5  | 161.62 | 222.84                            | 420.74         | 404     | 6.85 |
| M37 | 298313 | 2469960 | Pozo  | 03/09/2024        | 27.4 | 46.2                 | 3.64                    | 458.2                           | 7.76 | 187.1                    | 118.62            | 0.4  | 143.8  | 223.92                            | 422.72         | 386     | 6.54 |
| M38 | 297612 | 2469444 | Pozo  | 03/09/2024        | 29.7 | 41.5                 | 3.15                    | 547                             | 7.42 | 205.5                    | 109.15            | 0.5  | 132    | 221.16                            | 417.66         | 402     | 6.81 |
| M39 | 297012 | 2469429 | Pozo  | 03/09/2024        | 30.4 | 32.9                 | 2.46                    | 490.1                           | 7.57 | 185.1                    | 97                | 0.2  | 117.76 | 220.32                            | 416.12         | 381     | 6.46 |
| M40 | 296938 | 2468668 | Pozo  | 03/09/2024        | 29.5 | 32.3                 | 245                     | 477.6                           | 7.77 | 169.5                    | 102.64            | 0.44 | 124.2  | 221.4                             | 418.1          | 366     | 6.21 |
| M41 | 296920 | 2467564 | Pozo  | 03/09/2024        | 27.9 | 37.8                 | 2.95                    |                                 | 7.08 | 197.9                    | 130.96            | 0.42 | 158.7  | 223.32                            | 421.62         | 396     | 6.72 |
| M42 | 296739 | 2468224 | Pozo  | 03/09/2024        | 28.1 | 52.4                 | 4.08                    | 479.1                           | 7.47 | 204.4                    | 126.64            | 0.24 | 153.9  | 223.08                            | 421.18         | 403     | 6.82 |
| M43 | 296229 | 2467500 | Pozo  | 03/09/2024        | 29   | 28.7                 | 2.21                    | 457.6                           | 7.49 | 200.1                    | 113.1             | 0.3  | 137.32 | 222                               | 419.2          | 397     | 6.73 |
| M44 | 295848 | 2468179 | Pozo  | 04/09/2024        | 29.4 | 36.3                 | 2.77                    | 474.2                           | 7.51 | 181.5                    | 123.58            | 0.4  | 149.9  | 221.52                            | 418.32         | 378     | 6.41 |
| M45 | 294773 | 2471212 | Pozo  | 04/09/2024        | 31.8 | 35.9                 | 2.67                    | 487.2                           | 7.52 | 141.2                    | 104.48            | 0.3  | 126.78 | 218.64                            | 413.04         | 336     | 5.69 |
| M46 | 294559 | 2474834 | Pozo  | 04/09/2024        | 32.4 | 35.4                 | 2.57                    | 544                             | 7.46 | 178.1                    | 136.84            | 0.7  | 165.32 | 217.92                            | 411.72         | 372     | 6.30 |
| M47 | 293578 | 2474363 | Pozo  | 04/09/2024        | 31.8 | 33.6                 | 2.46                    | 590                             | 7.4  | 143.5                    | 120.62            | 0.3  | 146.52 | 218.64                            | 413.04         | 338     | 5.73 |
| M48 | 293832 | 2471251 | Pozo  | 04/09/2024        | 24.7 | 74.1                 | 5.6                     | 393                             | 7.56 | 126.3                    | 101.86            | 0.2  | 123.68 | 227.16                            | 428.66         | 328     | 5.56 |
| M49 | 294031 | 2468289 | Pozo  | 04/09/2024        | 29.1 | 38.9                 | 3                       | 435                             | 7.53 | 164.7                    |                   |      |        | 221.88                            | 418.98         | 362     | 6.13 |
| M50 | 293378 | 2466676 | Pozo  | 04/09/2024        | 30.6 | 37.6                 | 2.81                    | 410.8                           | 7.56 | 172.2                    | 117.75            | 0.4  | 142.6  | 220.08                            | 415.68         | 368     | 6.23 |
| M51 | 294534 | 2467935 | Pozo  | 04/09/2024        | 26.7 | 49.8                 | 3.96                    | 467.7                           | 7.66 | 166.2                    | 115.2             | 0.36 | 139.68 | 224.76                            | 424.26         | 366     | 6.20 |
| M52 | 293669 | 2472840 | Pozo  | 05/09/2024        | 39.1 | 50                   | 311                     | 625                             | 7.58 | 197.5                    | 139.6             | 0.72 | 168.68 | 209.88                            | 396.98         | 385     | 6.52 |
| M53 | 294203 | 2467418 | Pozo  | 05/09/2024        | 30.6 | 71.1                 | 4.28                    | 423.6                           | 7.49 | 138.2                    | 121.52            | 0.3  | 147.44 | 220.08                            | 415.68         | 334     | 5.66 |
| M54 | 295478 | 2467423 | Pozo  | 05/09/2024        | 28.0 | 51                   | 3.21                    | 456.5                           | 7.8  | 115.2                    | 98.52             | 0.4  | 119.16 | 223.2                             | 421.4          | 313     | 5.31 |
| M55 | 295393 | 2467747 | Pozo  | 05/09/2024        | 27.5 | 67.3                 | 4.27                    | 475                             | 7.77 | 143.9                    | 104.56            | 0.3  | 126.76 | 223.8                             | 422.5          | 343     | 5.81 |
| M56 | 293037 | 2465904 | Pozo  | 05/09/2024        | 30.9 | 70.7                 | 4.77                    | 448.8                           | 7.61 | 99.4                     | 114.88            | 0.3  | 139.38 | 219.72                            | 415.02         | 295     | 4.99 |
| M57 | 294262 | 2466131 | Pozo  | 05/09/2024        | 27.1 | 73.3                 | 4.7                     | 368.7                           | 7.64 | 108.8                    | 88.44             | 0.26 | 107.28 | 224.28                            | 423.38         | 308     | 5.22 |
| M58 | 297396 | 2458618 | Pozo  | 06/09/2024        | 25.9 | 56                   | 3.67                    | 529                             | 7.76 | 147.7                    | 163.88            | 1.04 | 197.64 | 225.72                            | 426.02         | 348     | 5.90 |
| M59 | 306189 | 2461052 | Pozo  | 06/09/2024        | 21.6 | 78.4                 | 5.58                    | 816                             | 6.57 | 155.9                    | 196.76            | 0.1  | 239.7  | 230.88                            | 435.48         | 361     | 6.11 |
| M60 | 308128 | 2459965 | Pozo  | 06/09/2024        | 26.8 | 68                   | 4.37                    | 424.3                           | 7.16 | 138.2                    | 137.84            | 0.3  | 167.46 | 224.64                            | 424.04         | 338     | 5.72 |
| M61 | 308828 | 2459537 | Pozo  | 06/09/2024        | 23.8 | 94.2                 | 5.9                     | 1236                            | 6.56 | 156.1                    | 171.02            | 0.1  | 208.32 | 228.24                            | 430.64         | 359     | 6.08 |

| Id  | X      | Y       | Tipo  | Fecha de muestreo | Temp | Oxígeno Disuelto (%) | Oxígeno Disuelto (mg/L) | Conductividad Eléctrica (µS/cm) | pH   | Potencial REDOX ORP (mV) | Alcalinidad total | CO3 mg/l | HCO3   | Potencial REDOX ORP (Zobell (mV)) | Eh Zobell (mV) | Eh (mV) | pe   |
|-----|--------|---------|-------|-------------------|------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|------|--------------------------|-------------------|----------|--------|-----------------------------------|----------------|---------|------|
|     |        |         |       |                   | (°C) |                      |                         |                                 |      |                          | mg/l CaCO3        |          | mg/l   |                                   |                |         |      |
| M62 | 308354 | 2459544 | Pozo  | 06/09/2024        | 23.1 | 91.6                 | 6.36                    | 878                             | 6.46 | 197.5                    | 138.32            | 0        | 168.56 | 229.08                            | 432.18         | 401     | 6.79 |
| M63 | 310127 | 2467612 | Pozo  | 06/09/2024        | 28.4 | 48.1                 | 3.01                    | 373.1                           | 7.54 | 168.2                    | 111.56            | 0.4      | 135.14 | 222.72                            | 420.52         | 366     | 6.20 |
| M64 | 293421 | 2461602 | Pozo  | 07/09/2024        | 33.6 | 31.2                 | 2.21                    | 254.4                           | 7.62 | 152.8                    | 132.1             | 0.7      | 159.58 | 216.48                            | 409.08         | 345     | 5.85 |
| M65 | 302554 | 2455396 | Pozo  | 07/09/2024        | 33.4 | 22.4                 | 1.6                     | 259.8                           | 7.46 | 164.6                    | 108.74            | 0.5      | 131.5  | 216.72                            | 409.52         | 357     | 6.06 |
| M66 | 305108 | 2456815 | Pozo  | 07/09/2024        | 24.6 | 14.1                 | 1.59                    | 206                             | 7.85 | 145.6                    | 117.46            | 0.64     | 141.86 | 227.28                            | 428.88         | 347     | 5.88 |
| M67 | 305508 | 2456040 | Noria | 07/09/2024        | 20.1 | 1.9                  | 0.17                    | 1642                            | 6.68 | 180                      | 290.2             | 0.22     | 353.34 | 232.68                            | 438.78         | 386     | 6.54 |
| M68 | 305395 | 2456015 | Pozo  | 07/09/2024        | 20.5 | 1.8                  | 0.16                    | 994                             | 6.5  | 158.5                    | 251.98            | 0.1      | 307.02 | 232.2                             | 437.9          | 364     | 6.17 |
| M69 | 306706 | 2456133 | Noria | 07/09/2024        | 20.2 | 22                   | 1.98                    | 1398                            | 6.87 | 151.4                    | 488.4             | 0.5      | 594.54 | 232.56                            | 438.56         | 357     | 6.06 |
| M70 | 307886 | 2455251 | Pozo  | 07/09/2024        | 25.1 | 40                   | 3.31                    | 514                             | 7.54 | 151                      | 106.175           | 0.5      | 128.35 | 226.68                            | 427.78         | 352     | 5.97 |
| M71 | 290827 | 2466497 | Pozo  | 08/09/2024        | 31.0 | 66.5                 | 3.97                    | 366.7                           | 7.24 | 107                      | 113.48            | 1.1      | 135.92 | 219.6                             | 414.8          | 302     | 5.12 |
| M72 | 287626 | 2467901 | Pozo  | 08/09/2024        | 29.3 | 62.1                 | 3.8                     | 391.6                           | 7.05 | 104.3                    | 99.68             | 0.18     | 121.12 | 221.64                            | 418.54         | 301     | 5.11 |
| M73 | 288660 | 2465694 | Pozo  | 08/09/2024        | 30.9 | 56.8                 | 3.38                    | 329.6                           | 7.15 | 129.9                    | 112.32            | 0.3      | 136.32 | 219.72                            | 415.02         | 325     | 5.51 |
| M74 | 297966 | 2465589 | Pozo  | 08/09/2024        | 25.9 | 68.9                 | 4.56                    | 358.9                           | 7.39 | 45.4                     | 141.88            | 0.4      | 172.18 | 225.72                            | 426.02         | 246     | 4.16 |
| M75 | 301798 | 2459703 | Pozo  | 08/09/2024        | 27.2 | 55.1                 | 3.52                    | 382.9                           | 7.29 | 67.3                     | 127.5             | 0.2      | 155    | 224.16                            | 423.16         | 266     | 4.51 |
| M76 | 305953 | 2453788 | Noria | 08/09/2024        | 21.2 | 46.8                 | 3.33                    | 1563                            | 6.84 | 91.6                     | 352.42            | 0.2      | 429.24 | 231.36                            | 436.36         | 297     | 5.03 |
| M77 | 309158 | 2454279 | Pozo  | 08/09/2024        | 32.0 | 61.6                 | 3.61                    | 348                             | 7.58 | 70.6                     | 115.04            | 0.5      | 139.26 | 218.4                             | 412.6          | 265     | 4.49 |
| M78 | 309007 | 2460217 | Pozo  | 09/09/2024        | 23.0 | 95.3                 | 6.61                    | 839                             | 6.44 | 140.7                    | 147.14            | 0.1      | 179.3  | 229.2                             | 432.4          | 344     | 5.83 |
| M79 | 309498 | 2459386 | Pozo  | 09/09/2024        | 25.6 | 49.9                 | 3.29                    | 786                             | 6.94 | 50.3                     | 143.6             | 0.1      | 174.78 | 226.08                            | 426.68         | 251     | 4.25 |
| M80 | 307999 | 2463895 | Pozo  | 09/09/2024        | 26.3 | 58.7                 | 3.83                    | 266.2                           | 7.87 | 70.6                     | 104.84            | 0.66     | 126.4  | 225.24                            | 425.14         | 271     | 4.58 |
| M81 | 293018 | 2459446 | Pozo  | 10/09/2024        | 33.2 | 70.9                 | 4.08                    | 396.7                           | 7.25 | 65.2                     | 80.06             | 0.1      | 97.3   | 216.96                            | 409.96         | 258     | 4.38 |
| M82 | 309943 | 2471216 | Pozo  | 10/09/2024        | 31.0 | 52.8                 | 3.44                    | 376.2                           | 7.69 | 37.8                     | 121.38            | 0.18     | 147.68 | 219.6                             | 414.8          | 233     | 3.95 |
| M83 | 289101 | 2464119 | Pozo  | 11/09/2024        | 28.8 | 59.3                 | 3.55                    | 241.9                           | 7.49 | 45.3                     | 157               | 0.3      | 190.72 | 222.24                            | 419.64         | 243     | 4.11 |
| M84 | 302697 | 2460256 | Noria | 11/09/2024        | 20.7 | 56                   | 4.05                    | 701                             | 6.78 | 68.3                     | 282.26            | 0.1      | 343.86 | 231.96                            | 437.46         | 274     | 4.64 |
| M85 | 302454 | 2459589 | Pozo  | 11/09/2024        | 25.3 | 49.6                 | 3.28                    | 207.7                           | 6.7  | 92.6                     | 73.6              | 0        | 89.72  | 226.44                            | 427.34         | 294     | 4.97 |
| M86 | 305596 | 2463170 | Noria | 11/09/2024        | 20.6 | 55.3                 | 4.03                    | 1128                            | 6.47 | 93.2                     | 242.74            | 0.1      | 295.84 | 232.08                            | 437.68         | 299     | 5.06 |
| M87 | 305449 | 2463146 | Noria | 11/09/2024        | 21.0 | 59.4                 | 4.24                    | 1001                            | 6.42 | 114.5                    | 205.92            | 0.1      | 251.02 | 231.6                             | 436.8          | 320     | 5.42 |
| M88 | 306773 | 2462885 | Pozo  | 11/09/2024        | 22.3 | 55.1                 | 3.84                    | 538                             | 6.82 | 104.5                    | 129.42            | 0.1      | 157.6  | 230.04                            | 433.94         | 308     | 5.23 |
| M89 | 302756 | 2461067 | Pozo  | 12/09/2024        | 22.1 | 36.3                 | 6.07                    | 674                             | 6.72 | 108.7                    | 170.34            | 0.1      | 207.54 | 230.28                            | 434.38         | 313     | 5.30 |
| M90 | 306500 | 2455116 | Noria | 12/09/2024        | 20.4 | 58.2                 | 4.23                    | 1458                            | 6.78 | 107.1                    | 292.28            | 0.2      | 356.04 | 232.32                            | 438.12         | 313     | 5.30 |
| M91 | 306007 | 2455768 | Pozo  | 12/09/2024        | 21.0 | 55.5                 | 3.96                    | 1344                            | 6.67 | 105.5                    | 293.56            | 0.1      | 357.7  | 231.6                             | 436.8          | 311     | 5.27 |
| M92 | 306009 | 2455281 | Pozo  | 12/09/2024        | 21.8 | 53.5                 | 3.77                    | 1135                            | 6.6  | 97.4                     | 236.2             | 0.1      | 287.84 | 230.64                            | 435.04         | 302     | 5.12 |
| M93 | 304721 | 2455886 | Pozo  | 12/09/2024        | 22.0 | 30.6                 | 2.14                    | 941                             | 6.6  | 92.7                     | 282.4             | 0.1      | 344.14 | 230.4                             | 434.6          | 297     | 5.03 |
| M94 | 304807 | 2455603 | Pozo  | 12/09/2024        | 24.3 | 52.7                 | 3.53                    | 344                             | 7.98 | 49.5                     | 98.04             | 0.26     | 118.76 | 227.64                            | 429.54         | 251     | 4.26 |
| M95 | 304772 | 2455244 | Pozo  | 12/09/2024        | 21.6 | 31.7                 | 2.24                    | 997                             | 6.65 | 79.3                     | 258.12            | 0.1      | 314.64 | 230.88                            | 435.48         | 284     | 4.81 |
| M96 | 301925 | 2456500 | Pozo  | 12/09/2024        | 22.6 | 26                   | 1.79                    | 889                             | 6.31 | 51                       | 113.38            | 0        | 138.24 | 229.68                            | 433.28         | 255     | 4.32 |
| M97 | 303436 | 2456078 | Noria | 12/09/2024        | 20.6 | 20.3                 | 1.5                     | 1627                            | 6.83 | 75.7                     | 454.42            | 0.24     | 553.56 | 232.08                            | 437.68         | 281     | 4.77 |
| M98 | 303545 | 2457661 | Noria | 13/09/2024        | 20.5 | 30.9                 | 2.24                    | 1360                            | 6.65 | 109.8                    | 352.08            | 0.1      | 429.04 | 232.2                             | 437.9          | 316     | 5.35 |
| M99 | 304411 | 2457693 | Noria | 13/09/2024        | 21.3 | 57.9                 | 4.14                    | 1256                            | 7.09 | 89.7                     | 223.6             | 0.2      | 272.16 | 231.24                            | 436.14         | 295     | 4.99 |

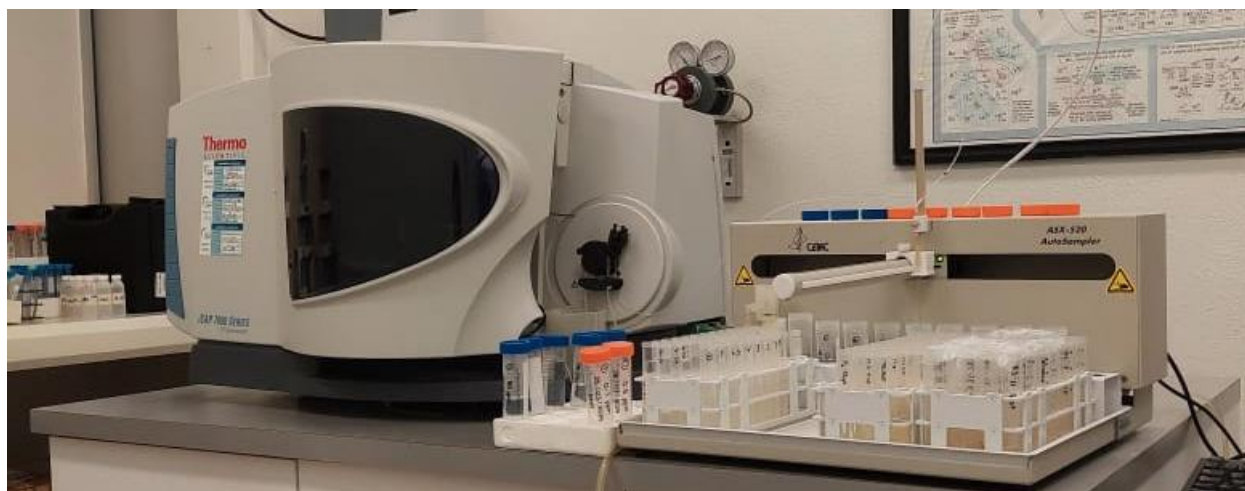
| Id   | X       | Y       | Tipo  | Fecha de muestreo | Temp | Oxígeno Disuelto (%) | Oxígeno Disuelto (mg/L) | Conductividad Eléctrica (µS/cm) | pH   | Potencial REDOX ORP (mV) | Alcalinidad total | CO3   | HCO3    | Potencial REDOX ORP (Zobell (mV)) | Eh Zobell (mV) | Eh (mV) | pe    |
|------|---------|---------|-------|-------------------|------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|------|--------------------------|-------------------|-------|---------|-----------------------------------|----------------|---------|-------|
|      |         |         |       |                   | (°C) |                      |                         |                                 |      |                          | mg/l CaCO3        | mg/l  | mg/l    |                                   |                |         |       |
| M100 | 304188  | 2457889 | Noria | 13/09/2024        | 20.7 | 50.1                 | 3.62                    | 1339                            | 6.96 | 95.5                     | 284               | 0.2   | 345.9   | 231.96                            | 437.46         | 301     | 5.10  |
| M101 | 304783  | 2458351 | Noria | 13/09/2024        | 21.4 | 39.4                 | 2.8                     | 1480                            | 6.81 | 93.7                     | 297.54            | 0.1   | 362.5   | 231.12                            | 435.92         | 299     | 5.06  |
| M102 | 305393  | 2458444 | Noria | 13/09/2024        | 21.8 | 628                  | 4.39                    | 2606                            | 6.86 | 85.6                     | 329.9             | 0.4   | 401.5   | 230.64                            | 435.04         | 290     | 4.92  |
| M103 | 306359  | 2458865 | Noria | 13/09/2024        | 22.1 | 45.4                 | 3.12                    | 1672                            | 7.1  | 64                       | 336.14            | 0.5   | 408.86  | 230.28                            | 434.38         | 268     | 4.54  |
| M104 | 306807  | 2458166 | Noria | 13/09/2024        | 22.6 | 49.2                 | 3.4                     | 1190                            | 6.73 | 72.2                     | 289.94            | 0.2   | 353.2   | 229.68                            | 433.28         | 276     | 4.67  |
| M105 | 307254  | 2458679 | Noria | 13/09/2024        | 22.3 | 44.4                 | 3.09                    | 1168                            | 6.71 | 93.2                     | 225.24            | 0.1   | 274.44  | 230.04                            | 433.94         | 297     | 5.04  |
| M106 | 306283  | 2457432 | Noria | 13/09/2024        | 20.9 | 31.6                 | 2.26                    | 1430                            | 6.82 | 68.6                     | 398.4             | 0.3   | 485.2   | 231.72                            | 437.02         | 274     | 4.64  |
| M107 | 303169  | 2457867 | Noria | 13/09/2024        | 20.5 | 29.2                 | 2.11                    | 1379                            | 6.64 | 79.2                     | 366.44            | 0.2   | 446.4   | 232.2                             | 437.9          | 285     | 4.83  |
| M108 | 299285  | 2467021 | Pozo  | 15/09/2024        | 25.4 | 57.5                 | 3.8                     | 409.9                           | 7.81 | 42.8                     | 120.925           | 0.525 | 146.275 | 226.32                            | 427.12         | 244     | 4.13  |
| M109 | 295212  | 2451132 | Noria | 17/09/2024        | 24.4 | 30.4                 | 2.05                    | 1113                            | 6.63 | 7.14                     | 268.24            | 0.1   | 326.82  | 227.52                            | 429.32         | 209     | 3.54  |
| M110 | 304040  | 2459091 | Noria | 17/09/2024        | 21.7 | 43.2                 | 3.04                    | 1706                            | 6.9  | 62.1                     | 343.94            | 0.3   | 418.86  | 230.76                            | 435.26         | 267     | 4.52  |
| M111 | 307716  | 2459201 | Noria | 17/09/2024        | 22.5 | 36.5                 | 2.53                    | 1608                            | 6.64 | 82.9                     | 357.96            | 0.2   | 436.14  | 229.8                             | 433.5          | 287     | 4.86  |
| M112 | 308397  | 2458673 | Noria | 17/09/2024        | 23.7 | 34.6                 | 2.37                    | 1595                            | 6.71 | 79.8                     | 503.2             | 0.4   | 612.68  | 228.36                            | 430.86         | 282     | 4.78  |
| M113 | 308871  | 2458142 | Noria | 17/09/2024        | 20.6 | 26.4                 | 0.9                     | 1555                            | 6.92 | 83.8                     | 526.72            | 0.4   | 641.5   | 232.08                            | 437.68         | 289     | 4.91  |
| M114 | 307684  | 2458220 | Noria | 17/09/2024        | 20.8 | 20.5                 | 1.47                    | 1476                            | 6.77 | 77.8                     | 456.98            | 0.2   | 556.74  | 231.84                            | 437.24         | 283     | 4.80  |
| M115 | 307722  | 2457401 | Noria | 17/09/2024        | 21.1 | 14.7                 | 1.05                    | 1502                            | 6.76 | 74.8                     | 467.76            | 0.4   | 569.62  | 231.48                            | 436.58         | 280     | 4.74  |
| M116 | 307219  | 2455560 | Pozo  | 18/09/2024        | 27.6 | 83.4                 | 5.31                    | 241.4                           | 7.87 | 95                       | 98.975            | 0.6   | 119.4   | 223.68                            | 422.28         | 294     | 4.98  |
| M117 | 303331  | 2451828 | Noria | 18/09/2024        | 20.5 | 30.1                 | 2.18                    | 2073                            | 6.92 | 103.7                    | 372.78            | 0.3   | 453.86  | 232.2                             | 437.9          | 309     | 5.24  |
| M118 | 303634  | 2452320 | Noria | 18/09/2024        | 20.7 | 43.2                 | 3.1                     | 2769                            | 6.94 | 115.9                    | 409.82            | 0.48  | 498.74  | 231.96                            | 437.46         | 321     | 5.45  |
| M119 | 304480  | 2452812 | Noria | 18/09/2024        | 24.0 | 70.7                 | 4.78                    | 1798                            | 6.61 | 132.9                    | 272.02            | 0.2   | 331.28  | 228                               | 430.2          | 335     | 5.68  |
| M120 | 304817  | 2454676 | Noria | 18/09/2024        | 22.4 | 22.4                 | 3.2                     | 952                             | 950  | 6.54                     | 342.1             | 0.1   | 416.86  | 229.92                            | 433.72         | 210     | 3.57  |
| M121 | 303230  | 2454585 | Noria | 18/09/2024        | 21.5 | 35.6                 | 2.52                    | 1889                            | 6.68 | 92.5                     | 249.3             | 0.1   | 303.76  | 231                               | 435.7          | 297     | 5.04  |
| M122 | 300438  | 2453947 | Noria | 25/09/2024        | 21.7 | 25.4                 | 1.78                    | 1783                            | 7.08 | 100.2                    | 368.8             | 0.5   | 448.66  | 230.76                            | 435.26         | 305     | 5.16  |
| M123 | 294975  | 2456175 | Pozo  | 22/09/2024        | 26.5 | 51.6                 | 3.32                    | 131.1                           | 7.24 | 77.4                     | 35.24             | 0     | 42.86   | 225                               | 424.7          | 277     | 4.70  |
| M125 | 287252  | 2456805 | Pozo  | 28/09/2024        | 36.0 | 61.6                 | 3.36                    | 400.8                           | 6.9  | 100                      | 121.18            | 0.2   | 147.34  | 213.6                             | 403.8          | 290     | 4.92  |
| M126 | 287675  | 2454414 | Pozo  | 28/09/2024        | 33.6 | 41.1                 | 2.31                    | 390.5                           | 7.14 | 80                       | 148.7             | 0.2   | 180.8   | 216.48                            | 409.08         | 273     | 4.62  |
| M127 | 292653  | 2957293 | Pozo  | 28/09/2024        | 33.8 | 74.1                 | 4.07                    | 458.3                           | 7.1  | 95.8                     | 139.7             | 0.42  | 169.4   | 216.24                            | 408.64         | 288     | 4.88  |
| M128 | 291631  | 2557400 | Pozo  | 28/09/2024        | 30.8 | 56.6                 | 3.38                    | 409.7                           | 7.37 | 99.4                     | 131.72            | 0.2   | 160.18  | 219.84                            | 415.24         | 295     | 5.00  |
| M129 | 292896  | 2455469 | Noria | 30/09/2024        | 21.8 | 45.6                 | 3.22                    | 762                             | 7.09 | 124.6                    | 235.4             | 0.3   | 286.35  | 230.64                            | 435.04         | 329     | 5.58  |
| M130 | 297483  | 2455873 | Noria | 30/09/2024        | 20.2 | 43                   | 3.13                    | 627                             | 6.97 | 36                       | 183.72            | 0.2   | 223.6   | 232.56                            | 438.56         | 242     | 4.10  |
| M131 | 293483  | 2455472 | Noria | 30/09/2024        | 23.1 | 52.6                 | 3.62                    | 775                             | 6.96 | 125.3                    | 180.48            | 0.1   | 219.78  | 229.08                            | 432.18         | 328     | 5.57  |
| M133 | 294566  | 2456483 | Pozo  | 30/09/2024        | 34.3 | 66.2                 | 3.75                    | 442                             | 7.12 | 113.9                    | 125.66            | 0.3   | 152.56  | 215.64                            | 407.54         | 306     | 5.18  |
| M134 | 297058  | 2451159 | Pozo  | 01/10/2024        | 33.7 | 61.5                 | 3.53                    | 417.7                           | 7.08 | 90                       | 111.8             | 0.3   | 135.65  | 216.36                            | 408.86         | 283     | 4.79  |
| M135 | 295220  | 2456229 | Pozo  | 30/09/2024        | 30.8 | 63.8                 | 3.81                    | 385                             | 7.18 | 116.3                    | 120.06            | 0.2   | 145.9   | 219.84                            | 415.24         | 312     | 5.28  |
| M136 | 294320  | 2452739 | Pozo  | 01/10/2024        | 28.9 | 80.4                 | 5                       | 282.1                           | 7.02 | 732.9                    | 77.36             | 0.1   | 94.18   | 222.12                            | 419.42         | 930     | 15.77 |
| M137 | 293746  | 2453315 | Pozo  | 01/10/2024        | 28.1 | 76.2                 | 4.78                    | 360.2                           | 6.95 | 326.6                    | 95.18             | 0.1   | 115.86  | 223.08                            | 421.18         | 525     | 8.89  |
| M138 | 294434  | 2453479 | Pozo  | 01/10/2024        | 27.3 | 78.3                 | 4.99                    | 391.3                           | 7.48 | 290.6                    | 95.94             | 0.3   | 116.4   | 224.04                            | 422.94         | 490     | 8.30  |
| M139 | 2912569 | 2453372 | Pozo  | 01/10/2024        | 35.1 | 72.4                 | 4.03                    | 468.3                           | 7.33 | 286.1                    | 114.16            | 0.2   | 138.68  | 214.68                            | 405.78         | 477     | 8.09  |

| Id   | X      | Y       | Tipo | Fecha de muestreo | Temp | Oxígeno Disuelto (%) | Oxígeno Disuelto (mg/L) | Conductividad Eléctrica (μS/cm) | pH   | Potencial REDOX ORP (mV) | Alcalinidad total | CO3   | HCO3    | Potencial REDOX ORP (Zobell (mV)) | Eh Zobell (mV) | Eh (mV) | pe   |
|------|--------|---------|------|-------------------|------|----------------------|-------------------------|---------------------------------|------|--------------------------|-------------------|-------|---------|-----------------------------------|----------------|---------|------|
|      |        |         |      |                   | (°C) |                      |                         |                                 |      |                          | mg/l CaCO3        | mg/l  | mg/l    |                                   |                |         |      |
| M140 | 298793 | 2451311 | Pozo |                   | 31.0 | 70.3                 | 4.18                    | 332.5                           | 7.23 | 292.6                    | 96.8              | 0.2   | 117.56  | 219.6                             | 414.8          | 488     | 8.27 |
| M141 | 300899 | 2455460 | Pozo | 02/10/2024        | 34.7 | 54.2                 | 3.05                    | 370.5                           | 6.97 | 292                      | 96.72             | 0.2   | 117.48  | 215.16                            | 406.66         | 484     | 8.19 |
| M142 | 292971 | 2452289 | Pozo | 02/10/2024        | 34.6 | 61.2                 | 3.44                    | 452.7                           | 6.98 | 292.6                    | 129.9             | 0.28  | 157.84  | 215.28                            | 406.88         | 484     | 8.21 |
| M143 | 291774 | 2451179 | Pozo | 02/10/2024        | 37.1 | 42.4                 | 2.29                    | 525                             | 7.68 | 250.3                    | 156.66            | 1.44  | 187.96  | 212.28                            | 401.38         | 439     | 7.45 |
| M144 | 292043 | 2453540 | Pozo | 02/10/2024        | 33.3 | 42.3                 | 2.43                    | 497.9                           | 7.25 | 254.7                    | 145.5             | 0.375 | 176.675 | 216.84                            | 409.74         | 448     | 7.59 |
| M145 | 291035 | 2453694 | Pozo | 02/10/2024        | 34.4 | 54.2                 | 3.04                    | 484.7                           | 7.04 | 251.8                    | 136.25            | 0.225 | 165.625 | 215.52                            | 407.32         | 444     | 7.52 |
| M146 | 291781 | 2454162 | Pozo | 02/10/2024        | 33.9 | 56.9                 | 3.24                    | 462                             | 7.07 | 254.7                    | 148.32            | 0.4   | 180.04  | 216.12                            | 408.42         | 447     | 7.58 |
| M147 | 292384 | 2453950 | Pozo | 02/10/2024        | 35.8 | 62.4                 | 3.44                    | 472                             | 7.06 | 274.3                    | 131               | 0.475 | 158.725 | 213.84                            | 404.24         | 465     | 7.88 |
| M148 | 296090 | 2454154 | Pozo | 02/10/2024        | 33.5 | 70.8                 | 4.05                    | 412.8                           | 7.13 | 256.3                    | 122.16            | 0.2   | 148.58  | 216.6                             | 409.3          | 449     | 7.61 |
| M149 | 313343 | 2444851 | Pozo | 04/12/2024        | 30.4 | 28                   | 1.69                    | 356                             | 7.68 | 98.3                     | 150.66            | 0.4   | 182.82  | 220.32                            | 416.12         | 294     | 4.98 |
| M150 | 312934 | 2445172 | Pozo | 04/12/2024        | 31.6 | 42.7                 | 2.55                    | 351.6                           | 7.7  | 75.3                     | 113.06            | 0.5   | 136.76  | 218.88                            | 413.48         | 270     | 4.57 |
| M151 | 304129 | 2442247 | Pozo | 04/12/2024        | 27.5 | 43.4                 | 2.76                    | 360.3                           | 8.11 | 66                       | 128.46            | 1.2   | 154.08  | 223.8                             | 422.5          | 265     | 4.49 |
| M152 | 304108 | 2440409 | Pozo | 04/12/2024        | 33.6 | 37.2                 | 2.13                    | 421.5                           | 7.29 | 65.3                     | 164.92            | 0.4   | 200.32  | 216.48                            | 409.08         | 258     | 4.37 |
| M153 | 305861 | 2441900 | Pozo | 04/12/2024        | 31.2 | 43.2                 | 2.58                    | 330                             | 7.02 | 43                       | 105.18            | 0.1   | 128.06  | 219.36                            | 414.36         | 238     | 4.03 |
| M154 | 309383 | 2438783 | Pozo | 05/12/2024        | 27.8 | 31.9                 | 2.03                    | 317.2                           | 7.58 | 84.1                     | 124.54            | 0.32  | 151.14  | 223.44                            | 421.84         | 283     | 4.79 |

### II.2.2.3 Análisis de laboratorio

Se guardaron las muestras en bolsas de plástico nuevas transparentes para su posterior transporte a los laboratorios en donde se realizaron los análisis fisicoquímicos. La determinación de metales menores y traza y de elementos de transición y tierras raras se llevó a cabo por medio de una espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, por sus siglas en inglés) en el Laboratorio de Geofísica del Instituto de Geología.

Para el caso del Sodio, Potasio, Magnesio, Calcio, Estroncio, Boro y Silice se utilizó para estas determinaciones el método de plasma de acoplamiento inductivo/espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES por sus siglas en inglés) mediante un equipo ICP-OES iCAP 700 series, modelo iCAP del Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología (Figura 25).



*Figura 25. Equipo ICP-OES iCAP 700 series, modelo iCAP del Laboratorio de Geoquímica del Instituto de Geología, UASLP.*

En el laboratorio de análisis de agua y suelo del Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería se analizó pH, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos, alcalinidad, fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos. Para la medición del pH se utilizó un pHmetro marca HORIBA, la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos se midieron con un equipo Orion 3 Star. La alcalinidad se determinó siguiendo la norma *NMX-AA-036-SCFI-2001* “Análisis de agua – Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba (Canela a la *NMX-AA-036-1980*) (DOF, 2001a). La determinación de los fluoruros se realizó siguiendo la norma *NMX-AA-077-SCFI-2001* del método potenciométrico (DOF, 2001d). Determinación de cloruros por titulación siguiendo la norma *NMX-AA-073-SCFI-2001* (DOF, 2001c). Los aniones (sulfato, nitrato) fueron determinados y cuantificados mediante la absorbancia de luz, utilizando un equipo espectrofotómetro UV-Visible Cary 50 conc (Figura 26).



*Figura 26. Espectrofotómetro UV-Visible Cary 50 conc.*

Para asegurar la calidad de los resultados del laboratorio, las mediciones se realizaron con métodos de medición validados, utilizando materiales de referencia certificados o sales de alta pureza para realizar las curvas de calibración y soluciones de referencia. Además, se utilizaron controles de calidad de concentración conocida y blancos analíticos durante la medición para asegurar la exactitud de los resultados obtenidos. La validación de los resultados de laboratorio se realizó de diferentes formas: a) condición de electroneutralidad, b) utilización de estándares internacionales de referencia (NIST y USGS).

Finalmente, para complementar los análisis se enviaron a analizar los isótopos estables, sin embargo, en este estudio no se utilizaron los resultados.

### II.2.3 Resultados de los análisis químicos de campo y laboratorio.

A lo largo de la dirección del flujo de agua subterránea, la gran heterogeneidad de medios geológicos y la interacción que presentan con los minerales producen una gran diversidad de concentraciones que condicionan los efectos de la composición física y química del agua.

En la siguiente Tabla 8, se muestran los resultados de los análisis físicos y químicos de las muestras de agua recolectadas. Se presentan en primera instancia los elementos mayores y menores que generalmente se reportan como aniones y cationes, además de las concentraciones de silicio (Si) que por las condiciones de pH de las muestras de agua se presentan como ácido salicílico, por lo que consiste en un compuesto sin carga. La concentración de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) se reporta también como nitrógeno de nitrato ( $\text{N-NO}_3$ ), que es como se establece en la *NOM-127-SSA1-2021* (DOF, 2022).

La relación entre la conductividad eléctrica (CE) de campo y CE de laboratorio indica una ecuación con una pendiente de 0.9195, una ordenada al origen de -41.982 con un coeficiente de correlación de 0.9733, por lo que es posible establecer que la integridad de las muestras de agua se mantuvo de manera adecuada durante el almacenamiento y transporte desde las condiciones de campo hasta le laboratorio.

Entre los elementos traza (metales, metaloides, halógenos), muchos presentaron al menos algunas concentraciones superiores al límite de detección que se estableció como 0.01 ug/l (microgramos por litro), como son: Li, Sr, F, etc. Otros elementos traza como la mayoría de los elementos lantánidos y actínidos y algunos metales de transición presentaron concentraciones menores al límites de detección de la técnica utilizada.

Sin embargo, para este estudio solo se utilizaron los siguientes parámetros: **pH, Na, K, Ca, Mg,  $\text{HCO}_3$ , dureza total,  $\text{CO}_3$ , Cl,  $\text{SO}_4$ , STD, F, Fe, Sr,  $\text{N-NO}_3$ , As, Li.**

Tabla 8. Resultados del análisis físico, químicos de las muestras de agua

| Id  | pH lab | CE lab<br>(mS/cm) | SDT<br>mg/L | Alcalinidad Total<br>(mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup><br>mg/l | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/l | Dureza Total<br>(mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | Cl <sup>-</sup><br>mg/L | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/L | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup><br>mg/L | F<br>mg/L | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup><br>mg/L | Na<br>mg/L | K<br>mg/L | Ca<br>mg/L | Mg<br>mg/L | Li<br>ug/L | Fe<br>ug/L | As<br>ug/L | Sr<br>ug/L |
|-----|--------|-------------------|-------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------|---------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| E1  | 6.92   | 353.0             | 173         | 135.6                                          | 0                                     | 165.4                                 | 76.2                                      | 16.88                   | 2.4                                    | 10.6                                 | 4.140     | 32.50                                 | 55.13      | 6.67      | 20.69      | 5.96       | 191.241    | 2.464      | 16.916     | 65.636     |
| E2  | 7.15   | 267.2             | 131         | 124.3                                          | 0                                     | 151.6                                 | 78.5                                      | 11.25                   | 1.4                                    | 6.2                                  | 0.914     | 13.90                                 | 34.68      | 4.45      | 26.21      | 3.16       | 92.625     | 2.025      | 12.472     | 34.715     |
| E3  | 7.39   | 267.6             | 134         | 118.7                                          | 0                                     | 144.8                                 | 77.8                                      | 11.25                   | 1.7                                    | 7.5                                  | 1.390     | 12.60                                 | 36.86      | 3.78      | 24.37      | 4.11       | 91.043     | 1.959      | 11.740     | 59.537     |
| E4  | 7.34   | 446.0             | 219         | 141.3                                          | 0                                     | 172.3                                 | 142.8                                     | 33.75                   | 2.6                                    | 11.5                                 | 0.759     | 47.00                                 | 42.29      | 4.58      | 48.51      | 5.26       | 121.022    | 5.481      | 8.374      | 84.334     |
| E5  | 7.45   | 264.3             | 129         | 135.6                                          | 0                                     | 165.4                                 | 101.4                                     | 15.00                   | 1.6                                    | 7.1                                  | 0.700     | 8.80                                  | 28.54      | 4.13      | 30.27      | 6.28       | 68.697     | 4.141      | 8.886      | 83.133     |
| E6  | 7.45   | 267.7             | 131         | 113.0                                          | 0                                     | 137.9                                 | 89.0                                      | 16.88                   | 1.4                                    | 6.2                                  | 0.659     | 9.70                                  | 25.42      | 3.89      | 28.53      | 4.33       | 62.480     | 4.205      | 7.348      | 80.501     |
| E7  | 6.92   | 2092.0            | 1025        | 358.6                                          | 0                                     | 437.4                                 | 680.6                                     | 279.40                  | 10.5                                   | 46.52                                | 0.516     | 274.50                                | 140.71     | 37.83     | 227.86     | 27.11      | 5.853      | 23.036     | 5.646      | 1939.792   |
| M1  | 6.83   | 728.0             | 357         | 169.5                                          | 0                                     | 206.8                                 | 211.8                                     | 63.64                   | 8.8                                    | 38.98                                | 0.893     | 121.80                                | 62.81      | 38.86     | 57.76      | 16.41      | 3.757      | 4.835      | 5.169      | 653.694    |
| M35 | 7.80   | 348.0             | 170         | 135.6                                          | 20.3                                  | 124.1                                 | 111.6                                     | 23.48                   | 2.5                                    | 11.1                                 | 0.973     | 30.8                                  | 36.883     | 4.757     | 43.122     | 0.951      | 88.252     | 7.553      | 7.119      | 274.239    |
| M36 | 8.11   | 333.0             | 163         | 113.0                                          | 13.6                                  | 110.3                                 | 98.1                                      | 21.68                   | 2.5                                    | 11.1                                 | 0.942     | 27                                    | 32.562     | 5.014     | 38.031     | 0.757      | 80.307     | 3.227      | 6.796      | 185.185    |
| M37 | 8.17   | 382.0             | 182         | 101.7                                          | 6.8                                   | 110.3                                 | 108.5                                     | 28.90                   | 3.4                                    | 15.1                                 | 0.884     | 45.6                                  | 34.982     | 6.937     | 41.937     | 0.917      | 81.424     | 15.275     | 7.999      | 248.241    |
| M38 | 7.85   | 429.0             | 210         | 107.4                                          | 13.6                                  | 103.4                                 | 132.8                                     | 37.93                   | 3.9                                    | 17.3                                 | 0.775     | 51.7                                  | 34.269     | 6.859     | 50.684     | 1.521      | 73.663     | 5.152      | 7.346      | 258.718    |
| M39 | 7.71   | 376.0             | 184         | 101.7                                          | 20.3                                  | 82.7                                  | 113.8                                     | 28.90                   | 2.7                                    | 12.0                                 | 0.796     | 46.9                                  | 32.76      | 7.035     | 43.543     | 1.238      | 63.972     | 7.466      | 7.645      | 257.055    |
| M40 | 7.90   | 369.0             | 181         | 90.4                                           | 0                                     | 110.3                                 | 110.4                                     | 28.90                   | 3.9                                    | 17.3                                 | 0.754     | 38.5                                  | 31.695     | 7.68      | 42.2       | 1.229      | 60.699     | 6.403      | 7.753      | 264.079    |
| M41 | 7.85   | 342.0             | 168         | 107.4                                          | 0                                     | 131.0                                 | 89.2                                      | 23.48                   | 3.1                                    | 13.7                                 | 0.942     | 28.4                                  | 34.031     | 9.537     | 33.757     | 1.204      | 54.469     | 11.983     | 10.481     | 265.848    |
| M42 | 7.81   | 384.0             | 188         | 96.1                                           | 0                                     | 117.2                                 | 113.2                                     | 36.13                   | 3.4                                    | 15.1                                 | 0.792     | 35.8                                  | 30.934     | 10.112    | 42.814     | 1.539      | 51.456     | 6.099      | 9.634      | 342.595    |
| M43 | 7.50   | 358.0             | 175         | 90.4                                           | 0                                     | 110.3                                 | 109.6                                     | 28.90                   | 4.8                                    | 21.3                                 | 0.659     | 36.9                                  | 29.763     | 7.366     | 41.728     | 1.315      | 50.555     | 7.024      | 7.609      | 305.338    |
| M44 | 7.46   | 368.0             | 181         | 101.7                                          | 0                                     | 124.1                                 | 112.9                                     | 31.40                   | 3.5                                    | 15.5                                 | 0.653     | 44                                    | 31.342     | 7.755     | 43.111     | 1.282      | 51.221     | 7.242      | 6.667      | 296.050    |
| M45 | 7.61   | 402.0             | 197         | 84.8                                           | 0                                     | 103.4                                 | 122.5                                     | 40.00                   | 3.7                                    | 16.4                                 | 0.693     | 51.6                                  | 35.949     | 5.329     | 48.267     | 0.482      | 74.696     | 8.702      | 6.939      | 62.262     |
| M46 | 7.80   | 396.0             | 194         | 107.4                                          | 0                                     | 131.0                                 | 106.8                                     | 30.71                   | 3.7                                    | 16.4                                 | 0.783     | 49                                    | 42.197     | 4.526     | 42.267     | 0.309      | 76.607     | 7.445      | 8.075      | 23.791     |
| M47 | 7.72   | 440.0             | 216         | 90.4                                           | 0                                     | 110.3                                 | 130.3                                     | 36.13                   | 3.9                                    | 17.3                                 | 0.716     | 66.2                                  | 40.908     | 5.53      | 50.697     | 0.904      | 93.193     | 10.987     | 6.861      | 169.442    |
| M48 | 7.73   | 435.0             | 213         | 84.8                                           | 0                                     | 103.4                                 | 145.7                                     | 41.55                   | 3.6                                    | 15.9                                 | 0.637     | 78.6                                  | 31.931     | 7.493     | 55.743     | 1.575      | 69.933     | 9.574      | 6.093      | 122.678    |
| M49 | 7.79   | 340.0             | 167         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 106.8                                     | 36.13                   | 3.8                                    | 16.8                                 | 0.656     | 24.7                                  | 31.232     | 3.828     | 41.454     | 0.804      | 45.300     | 7.978      | 7.648      | 229.423    |
| M50 | 7.85   | 311.0             | 153         | 84.8                                           | 0                                     | 103.4                                 | 95.6                                      | 27.10                   | 3.8                                    | 16.8                                 | 0.742     | 26.5                                  | 29.826     | 5.796     | 36.876     | 0.843      | 36.112     | 3.180      | 7.294      | 216.371    |
| M51 | 7.86   | 384.0             | 188         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 128.4                                     | 65.03                   | 4.7                                    | 20.8                                 | 0.497     | 20.3                                  | 29.183     | 4.533     | 49.743     | 1.01       | 42.594     | 10.258     | 6.289      | 123.466    |
| M52 | 7.68   | 473.0             | 232         | 67.8                                           | 0                                     | 82.7                                  | 132.5                                     | 52.39                   | 3.9                                    | 17.3                                 | 0.765     | 77.3                                  | 43.83      | 8.926     | 50.315     | 1.655      | 80.916     | 31.899     | 7.872      | 227.372    |
| M53 | 7.68   | 310.0             | 152         | 107.4                                          | 0                                     | 131.0                                 | 106.0                                     | 27.20                   | 3.2                                    | 14.2                                 | 0.739     | 23.1                                  | 32.768     | 4.906     | 41.182     | 0.758      | 40.396     | 7.543      | 8.007      | 159.510    |
| M54 | 7.85   | 349.0             | 171         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 104.2                                     | 36.13                   | 3.7                                    | 16.4                                 | 0.743     | 41.1                                  | 32.193     | 9.358     | 39.214     | 1.523      | 42.558     | 19.513     | 9.054      | 360.518    |
| M55 | 7.86   | 367.0             | 180         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 125.9                                     | 39.74                   | 3.4                                    | 15.1                                 | 0.545     | 43.5                                  | 26.021     | 9.797     | 47.454     | 1.808      | 35.464     | 5.934      | 5.862      | 372.616    |
| M56 | 7.88   | 324.0             | 159         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 94.4                                      | 30.71                   | 3.6                                    | 15.9                                 | 0.885     | 39.5                                  | 32.285     | 5.825     | 36.53      | 0.775      | 40.761     | 7.463      | 9.239      | 305.283    |
| M57 | 7.75   | 286.0             | 140         | 73.5                                           | 0                                     | 89.6                                  | 93.4                                      | 34.32                   | 3.6                                    | 15.9                                 | 0.686     | 13.5                                  | 24.818     | 7.857     | 34.766     | 1.608      | 21.672     | 8.507      | 7.685      | 251.089    |
| M58 | 7.82   | 416.0             | 204         | 113.0                                          | 0                                     | 137.9                                 | 104.9                                     | 45.16                   | 4.1                                    | 18.2                                 | 0.756     | 28.90                                 | 44.35      | 16.62     | 39.48      | 1.54       | 79.471     | 138.006    | 7.250      | 356.976    |
| M59 | 6.81   | 714.0             | 350         | 118.7                                          | 0                                     | 144.8                                 | 225.5                                     | 90.32                   | 9.9                                    | 43.9                                 | 0.310     | 66.80                                 | 44.50      | 23.83     | 75.23      | 9.14       | 8.071      | 17.861     | 5.381      | 792.780    |
| M60 | 7.36   | 343.0             | 168         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 108.7                                     | 41.55                   | 3.5                                    | 15.5                                 | 1.140     | 19.10                                 | 24.32      | 7.72      | 40.52      | 1.83       | 99.322     | 5.229      | 16.440     | 276.838    |
| M61 | 6.95   | 1031.0            | 505         | 124.3                                          | 0                                     | 151.6                                 | 377.7                                     | 175.22                  | 9.0                                    | 39.9                                 | 0.486     | 143.25                                | 65.49      | 19.26     | 129.61     | 13.12      | 20.653     | 26.999     | 8.615      | 979.243    |
| M62 | 6.78   | 743.0             | 364         | 101.7                                          | 0                                     | 124.1                                 | 243.0                                     | 113.80                  | 9.3                                    | 41.2                                 | 0.465     | 79.00                                 | 58.63      | 18.68     | 82.27      | 9.12       | 9.951      | 11.012     | 8.173      | 696.217    |
| M63 | 7.71   | 281.0             | 138         | 84.8                                           | 0                                     | 103.4                                 | 95.9                                      | 28.90                   | 3.2                                    | 14.2                                 | 0.810     | 15.50                                 | 24.99      | 6.77      | 36.99      | 0.87       | 42.557     | 6.844      | 14.581     | 190.090    |
| M64 | 7.70   | 275.1             | 135         | 79.1                                           | 0                                     | 96.5                                  | 75.7                                      | 27.10                   | 2.8                                    | 12.4                                 | 0.702     | 19.00                                 | 30.44      | 7.20      | 28.85      | 0.90       | 45.777     | 84.936     | 12.223     | 250.369    |
| M65 | 7.73   | 222.7             | 109         | 90.4                                           | 6.8                                   | 96.5                                  | 47.7                                      | 18.06                   | 3.0                                    | 13.3                                 | 0.948     | 7.80                                  | 34.56      | 3.65      | 18.97      | 0.09       | 126.950    | 2.810      | 9.529      | 22.445     |

| Id   | pH lab | CE lab  | SDT  | Alcalinidad Total         | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Dureza Total              | Cl <sup>-</sup> | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F     | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Na     | K     | Ca     | Mg     | Li     | Fe       | As     | Sr       |
|------|--------|---------|------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|----------|--------|----------|
|      |        | (mS/cm) | mg/L | (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | mg/l                          | mg/l                          | (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | mg/L            | mg/L                           | mg/L                         | mg/L  | mg/L                          | mg/L   | mg/L  | mg/L   | mg/L   | ug/L   | ug/L     | ug/L   | ug/L     |
| M66  | 8.03   | 180.6   | 88   | 79.1                      | 6.8                           | 82.7                          | 67.2                      | 12.64           | 1.6                            | 7.1                          | 0.340 | 2.00                          | 11.56  | 7.16  | 25.90  | 0.61   | 18.341 | 4.240    | 8.428  | 95.016   |
| M67  | 6.98   | 1615.0  | 791  | 248.6                     | 0                             | 303.3                         | 559.9                     | 196.90          | 10.8                           | 47.84                        | 0.434 | 250.00                        | 116.10 | 34.38 | 186.24 | 23.03  | 8.148  | 29.555   | 6.981  | 2026.159 |
| M68  | 6.86   | 967.0   | 474  | 163.9                     | 0                             | 199.9                         | 355.8                     | 97.55           | 10.2                           | 45.2                         | 0.358 | 131.50                        | 51.53  | 25.98 | 120.30 | 13.45  | 8.000  | 19.108   | 5.046  | 1569.311 |
| M69  | 7.21   | 1350.0  | 662  | 327.7                     | 0                             | 399.8                         | 276.5                     | 148.12          | 10.5                           | 46.52                        | 0.642 | 75.00                         | 180.81 | 23.11 | 95.65  | 9.14   | 9.295  | 18.300   | 30.556 | 848.806  |
| M70  | 7.81   | 454.0   | 223  | 62.2                      | 0                             | 75.8                          | 166.2                     | 86.71           | 6.8                            | 30.1                         | 0.327 | 23.00                         | 21.50  | 14.80 | 62.04  | 2.74   | 27.588 | 9.960    | 8.878  | 340.497  |
| M71  | 7.66   | 263.3   | 129  | 79.1                      | 0                             | 96.5                          | 78.0                      | 30.71           | 3.9                            | 17.3                         | 0.819 | 11.90                         | 27.42  | 7.20  | 29.59  | 1.006  | 28.158 | 7.802    | 8.184  | 294.021  |
| M72  | 7.58   | 291.8   | 143  | 79.1                      | 0                             | 96.5                          | 81.8                      | 37.93           | 5.1                            | 22.6                         | 0.879 | 14.40                         | 29.30  | 9.48  | 28.97  | 2.3    | 25.002 | 33.410   | 7.203  | 304.086  |
| M73  | 7.58   | 236.6   | 116  | 73.5                      | 0                             | 89.6                          | 72.5                      | 27.10           | 4.3                            | 19.0                         | 0.714 | 9.60                          | 22.66  | 6.79  | 27.15  | 1.155  | 23.588 | 10.354   | 9.443  | 239.178  |
| M74  | 7.96   | 290.0   | 142  | 107.4                     | 13.6                          | 103.4                         | 98.2                      | 28.90           | 3.5                            | 15.5                         | 0.755 | 16.00                         | 30.56  | 10.97 | 37.65  | 1.005  | 61.887 | 36.804   | 9.186  | 274.001  |
| M75  | 7.95   | 295.0   | 145  | 107.4                     | 6.8                           | 117.2                         | 84.9                      | 27.10           | 3.8                            | 16.8                         | 0.723 | 14.30                         | 36.05  | 6.45  | 32.93  | 0.655  | 96.430 | 5.405    | 8.639  | 115.190  |
| M76  | 7.14   | 1389.0  | 681  | 327.7                     | 0                             | 399.8                         | 418.0                     | 153.54          | 10.7                           | 47.40                        | 0.622 | 158.00                        | 147.50 | 30.62 | 141.60 | 15.645 | 6.866  | 20.512   | 10.022 | 1433.756 |
| M77  | 8.01   | 248.0   | 122  | 96.1                      | 13.6                          | 89.6                          | 79.7                      | 30.71           | 2.8                            | 12.4                         | 0.652 | 7.80                          | 31.00  | 5.70  | 31.34  | 0.341  | 95.199 | 7.785    | 11.611 | 117.569  |
| M78  | 6.91   | 717.0   | 351  | 96.1                      | 0                             | 117.2                         | 233.8                     | 121.03          | 8.6                            | 38.1                         | 0.515 | 62.00                         | 57.88  | 17.40 | 80.92  | 7.707  | 12.226 | 16.163   | 9.525  | 778.302  |
| M79  | 7.39   | 633.0   | 310  | 135.6                     | 0                             | 165.4                         | 204.1                     | 102.96          | 8.6                            | 38.1                         | 0.568 | 50.50                         | 59.39  | 16.05 | 70.84  | 6.615  | 21.318 | 190.904  | 11.052 | 534.411  |
| M80  | 8.19   | 211.0   | 103  | 90.4                      | 13.6                          | 82.7                          | 81.2                      | 16.26           | 2.7                            | 12.0                         | 0.563 | 4.50                          | 15.20  | 10.91 | 30.46  | 1.248  | 26.764 | 5.213    | 20.230 | 135.424  |
| M81  | 7.81   | 278.5   | 136  | 96.1                      | 0.0                           | 117.2                         | 66.9                      | 25.29           | 2.1                            | 9.3                          | 1.150 | 26.80                         | 39.92  | 11.98 | 25.33  | 0.878  | 57.638 | 9.645    | 15.747 | 213.172  |
| M82  | 7.98   | 270.8   | 133  | 90.4                      | 0.0                           | 110.3                         | 71.5                      | 34.32           | 2.6                            | 11.5                         | 1.020 | 8.80                          | 38.90  | 8.08  | 27.58  | 0.649  | 55.105 | 4.033    | 16.813 | 157.943  |
| M83  | 7.33   | 347.0   | 170  | 107.4                     | 0.0                           | 131.0                         | 91.6                      | 28.90           | 4.9                            | 21.7                         | 0.992 | 25.50                         | 41.49  | 9.82  | 34.25  | 1.472  | 41.791 | 8.095    | 7.911  | 406.502  |
| M84  | 6.73   | 632.0   | 309  | 169.5                     | 0.0                           | 206.8                         | 213.0                     | 52.39           | 8.0                            | 35.44                        | 0.360 | 47.00                         | 43.25  | 29.35 | 66.09  | 11.64  | 4.347  | 14.808   | 4.841  | 825.567  |
| M85  | 6.69   | 169.9   | 83   | 56.5                      | 0                             | 68.9                          | 59.5                      | 25.29           | 3.6                            | 15.9                         | 0.235 | 5.50                          | 12.44  | 13.33 | 18.94  | 2.966  | 14.879 | 5.662    | 5.041  | 146.455  |
| M86  | 6.38   | 1020.0  | 500  | 226.0                     | 0                             | 275.7                         | 329.7                     | 95.74           | 13.3                           | 58.92                        | 0.174 | 159.00                        | 79.35  | 39.53 | 105.35 | 16.186 | 10.172 | 22.611   | 5.969  | 1213.390 |
| M87  | 6.44   | 898.0   | 440  | 192.1                     | 0                             | 234.4                         | 294.9                     | 81.29           | 12.6                           | 55.82                        | 0.161 | 139.00                        | 68.96  | 35.12 | 94.88  | 14.091 | 11.208 | 22.162   | 4.770  | 1109.478 |
| M88  | 6.93   | 463.0   | 463  | 113.0                     | 0                             | 137.9                         | 181.0                     | 59.61           | 11.1                           | 49.2                         | 0.303 | 43.25                         | 35.92  | 18.47 | 63.25  | 5.591  | 10.964 | 12.480   | 11.073 | 456.789  |
| M89  | 6.78   | 588.0   | 288  | 169.5                     | 0                             | 206.8                         | 250.7                     | 45.16           | 8.8                            | 39.0                         | 0.271 | 96.00                         | 37.48  | 28.18 | 83.72  | 10.118 | 6.826  | 16.070   | 4.716  | 868.315  |
| M90  | 6.78   | 1325.0  | 649  | 282.5                     | 0                             | 344.7                         | 470.3                     | 171.61          | 10.9                           | 48.29                        | 0.344 | 105.00                        | 73.23  | 26.78 | 163.07 | 15.321 | 13.569 | 32.720   | 7.832  | 1651.132 |
| M91  | 6.58   | 1673.0  | 820  | 186.5                     | 0                             | 227.5                         | 466.8                     | 220.38          | 11.3                           | 50.1                         | 0.320 | 260.00                        | 143.89 | 37.91 | 142.20 | 27.122 | 11.072 | 42.891   | 7.456  | 2234.574 |
| M92  | 6.77   | 1005.0  | 492  | 231.7                     | 0                             | 282.6                         | 438.8                     | 130.06          | 10.1                           | 44.7                         | 0.351 | 153.00                        | 74.46  | 30.95 | 144.89 | 18.697 | 9.437  | 30.122   | 7.461  | 1706.789 |
| M93  | 6.70   | 822.0   | 403  | 209.1                     | 0                             | 255.0                         | 296.3                     | 77.68           | 8.7                            | 38.5                         | 0.388 | 104.50                        | 45.93  | 26.91 | 104.18 | 8.782  | 7.002  | 14.923   | 6.719  | 1191.408 |
| M94  | 7.98   | 286.8   | 141  | 79.1                      | 13.6                          | 68.9                          | 119.8                     | 48.77           | 4.4                            | 19.5                         | 0.392 | 27.40                         | 20.56  | 14.47 | 40.52  | 4.519  | 7.081  | 57.178   | 6.588  | 357.606  |
| M95  | 6.75   | 882.0   | 432  | 237.3                     | 0                             | 289.5                         | 310.5                     | 65.03           | 9.4                            | 41.6                         | 0.416 | 162.50                        | 72.15  | 32.91 | 97.25  | 16.427 | 5.883  | 21.352   | 5.825  | 1433.920 |
| M96  | 6.39   | 771.0   | 378  | 67.8                      | 0                             | 82.7                          | 248.5                     | 126.45          | 11.2                           | 49.6                         | 0.181 | 85.00                         | 57.02  | 23.12 | 73.93  | 15.507 | 9.942  | 3755.208 | 0.883  | 948.051  |
| M97  | 7.04   | 1477.0  | 724  | 429.4                     | 0                             | 523.9                         | 336.0                     | 142.71          | 10.8                           | 47.84                        | 0.325 | 233.75                        | 214.48 | 40.58 | 100.69 | 20.548 | 5.799  | 51.722   | 12.608 | 1218.980 |
| M98  | 6.63   | 1229.0  | 602  | 348.0                     | 0                             | 424.6                         | 375.3                     | 124.64          | 10.7                           | 47.40                        | 0.240 | 166.00                        | 153.19 | 38.27 | 121.69 | 17.357 | 8.590  | 29.388   | 16.613 | 1434.075 |
| M99  | 7.08   | 1111.0  | 545  | 248.0                     | 9.6                           | 283.0                         | 409.0                     | 177.03          | 11.2                           | 49.62                        | 0.218 | 110.50                        | 97.98  | 36.89 | 136.54 | 16.538 | 6.453  | 31.465   | 6.390  | 1685.479 |
| M100 | 7.02   | 1204.0  | 590  | 243.0                     | 0                             | 296.4                         | 500.3                     | 162.58          | 10.8                           | 47.84                        | 0.162 | 131.00                        | 55.09  | 40.92 | 163.76 | 22.185 | 7.637  | 29.180   | 4.854  | 1755.957 |
| M101 | 6.81   | 1268.0  | 621  | 276.9                     | 0                             | 337.8                         | 477.8                     | 153.54          | 11.1                           | 49.17                        | 0.261 | 135.50                        | 88.86  | 42.90 | 156.34 | 21.239 | 8.608  | 31.336   | 5.120  | 1793.130 |
| M102 | 6.90   | 2298.0  | 1126 | 327.7                     | 0                             | 399.8                         | 903.8                     | 451.60          | 11.5                           | 50.95                        | 0.205 | 217.50                        | 116.80 | 60.05 | 292.73 | 41.987 | 4.838  | 57.664   | 4.829  | 3038.270 |
| M103 | 7.19   | 1455.0  | 713  | 333.4                     | 0                             | 406.7                         | 424.9                     | 211.35          | 10.7                           | 47.40                        | 0.354 | 136.25                        | 174.71 | 48.99 | 135.34 | 21.123 | 4.885  | 33.454   | 8.841  | 1269.416 |
| M104 | 6.85   | 1026.0  | 503  | 276.0                     | 0                             | 336.7                         | 375.7                     | 130.06          | 10.7                           | 47.40                        | 0.353 | 89.00                         | 58.58  | 39.82 | 124.09 | 15.996 | 6.485  | 17.486   | 5.942  | 1137.677 |
| M105 | 6.78   | 1010.0  | 495  | 244.0                     | 0                             | 297.7                         | 389.9                     | 149.93          | 8.8                            | 38.98                        | 0.318 | 96.50                         | 52.91  | 44.23 | 129.23 | 16.321 | 7.455  | 16.752   | 6.424  | 1105.067 |

| Id   | pH lab | CE lab  | SDT  | Alcalinidad Total         | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Dureza Total              | Cl <sup>-</sup> | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F     | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Na     | K     | Ca     | Mg     | Li      | Fe      | As      | Sr       |
|------|--------|---------|------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|--------|-------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|
|      |        | (mS/cm) | mg/L | (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | mg/l                          | mg/l                          | (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | mg/L            | mg/L                           | mg/L                         | mg/L  | mg/L                          | mg/L   | mg/L  | mg/L   | mg/L   | ug/L    | ug/L    | ug/L    | ug/L     |
| M106 | 6.95   | 1276.0  | 625  | 389.9                     | 0                             | 475.6                         | 338.9                     | 135.48          | 10.5                           | 46.52                        | 0.541 | 97.50                         | 137.63 | 48.13 | 111.55 | 14.659 | 5.883   | 16.641  | 18.492  | 892.201  |
| M107 | 6.83   | 1247.0  | 611  | 339.0                     | 0                             | 413.6                         | 338.6                     | 130.06          | 10.6                           | 46.96                        | 0.282 | 141.50                        | 123.62 | 45.72 | 106.42 | 17.705 | 5.535   | 17.785  | 7.300   | 930.101  |
| M108 | 7.74   | 331.0   | 162  | 120.0                     | 9.6                           | 126.9                         | 112.0                     | 27.10           | 3.6                            | 15.9                         | 1.110 | 25.10                         | 36.33  | 14.92 | 42.69  | 1.299  | 78.177  | 6.463   | 8.791   | 199.436  |
| M109 | 7.73   | 922.0   | 452  | 292.0                     | 0                             | 356.2                         | 215.8                     | 84.90           | 10.8                           | 47.84                        | 0.328 | 73.50                         | 121.42 | 36.96 | 68.74  | 10.730 | 4.941   | 11.165  | 43.581  | 572.768  |
| M110 | 7.04   | 1502.0  | 736  | 388.0                     | 0                             | 473.4                         | 390.2                     | 165.29          | 11.6                           | 51.39                        | 2.330 | 212.50                        | 190.29 | 55.09 | 119.67 | 22.195 | 45.657  | 17.831  | 229.435 | 933.782  |
| M111 | 6.7    | 1390.0  | 681  | 396.0                     | 0                             | 483.1                         | 521.9                     | 164.38          | 11.0                           | 48.73                        | 0.541 | 122.50                        | 98.85  | 36.77 | 176.96 | 19.448 | 13.017  | 31.131  | 7.451   | 1408.097 |
| M112 | 7.04   | 1346.0  | 660  | 448.0                     | 0                             | 546.6                         | 328.9                     | 130.06          | 11.0                           | 48.73                        | 0.372 | 40.00                         | 185.32 | 27.02 | 120.09 | 7.055  | 23.406  | 23.835  | 9.472   | 478.074  |
| M113 | 6.93   | 1401.0  | 687  | 528.0                     | 0                             | 644.2                         | 380.5                     | 157.16          | 10.5                           | 46.52                        | 0.642 | 51.25                         | 173.48 | 39.35 | 136.05 | 9.909  | 18.651  | 19.035  | 6.864   | 525.185  |
| M114 | 6.83   | 1321.0  | 649  | 460.0                     | 0                             | 561.2                         | 327.3                     | 137.29          | 10.9                           | 48.29                        | 0.658 | 61.25                         | 180.10 | 35.52 | 116.25 | 8.992  | 15.302  | 13.274  | 10.180  | 352.984  |
| M115 | 6.95   | 1332.0  | 653  | 456.0                     | 0                             | 556.3                         | 494.0                     | 149.93          | 9.7                            | 42.97                        | 0.645 | 61.25                         | 113.06 | 27.16 | 173.26 | 14.898 | 9.517   | 23.724  | 6.824   | 1426.365 |
| M116 | 7.81   | 185.5   | 91   | 96.0                      | 9.6                           | 97.6                          | 65.8                      | 23.48           | 2.3                            | 10.2                         | 0.552 | 4.10                          | 21.40  | 16.97 | 23.93  | 1.476  | 17.396  | 9.924   | 5.349   | 47.360   |
| M117 | 7.04   | 1860.0  | 911  | 384.0                     | 0                             | 468.5                         | 631.1                     | 236.64          | 11.3                           | 50.06                        | 0.363 | 182.50                        | 138.56 | 71.25 | 197.33 | 33.594 | 4.013   | 27.402  | 5.599   | 1915.561 |
| M118 | 7.09   | 2486.0  | 1218 | 448.0                     | 0                             | 546.6                         | 850.8                     | 410.05          | 11.3                           | 50.06                        | 0.850 | 230.00                        | 212.03 | 61.82 | 276.49 | 38.946 | 6.938   | 46.480  | 9.639   | 2707.235 |
| M119 | 6.84   | 1502.0  | 736  | 284.0                     | 0                             | 346.5                         | 613.7                     | 182.45          | 11.4                           | 50.50                        | 0.615 | 240.00                        | 92.08  | 52.10 | 197.57 | 29.229 | 5.558   | 29.203  | 5.047   | 1880.658 |
| M120 | 6.67   | 813.0   | 398  | 364.0                     | 0                             | 444.1                         | 380.4                     | 63.22           | 3.0                            | 13.29                        | 0.502 | 52.00                         | 57.73  | 41.36 | 124.39 | 16.952 | 4.742   | 31.287  | 5.242   | 1008.450 |
| M121 | 6.82   | 1666.0  | 816  | 296.0                     | 0                             | 361.1                         | 655.5                     | 220.38          | 11.3                           | 50.06                        | 0.528 | 250.00                        | 72.25  | 53.56 | 212.89 | 30.100 | 5.059   | 28.157  | 3.824   | 1932.127 |
| M122 | 7.17   | 1558.0  | 763  | 384.0                     | 0                             | 468.5                         | 443.3                     | 119.58          | 11.2                           | 49.62                        | 0.435 | 285.00                        | 178.34 | 31.14 | 145.60 | 19.355 | 3.949   | 11.692  | 18.830  | 1023.410 |
| M123 | 7.3    | 99.2    | 49   | 32.0                      | 0                             | 39.0                          | 34.7                      | 17.58           | 2.0                            | 8.9                          | 0.305 | 1.70                          | 11.69  | 6.29  | 11.00  | 1.765  | 8.151   | 20.017  | 6.580   | 55.694   |
| M125 | 7.32   | 201.3   | 128  | 116.0                     | 0                             | 141.5                         | 65.1                      | 22.86           | 2.2                            | 9.7                          | 2.370 | 12.80                         | 49.52  | 2.48  | 25.29  | 0.477  | 105.830 | 96.073  | 9.805   | 50.567   |
| M126 | 7.26   | 264.2   | 129  | 120.0                     | 0                             | 146.4                         | 57.9                      | 19.34           | 2.5                            | 11.1                         | 2.890 | 12.70                         | 52.41  | 2.84  | 22.65  | 0.316  | 113.701 | 3.742   | 11.598  | 32.630   |
| M127 | 7.33   | 299.0   | 146  | 136.0                     | 0                             | 165.9                         | 83.1                      | 29.89           | 2.7                            | 12.0                         | 2.170 | 19.10                         | 60.16  | 4.18  | 32.49  | 0.481  | 98.950  | 3.493   | 10.316  | 71.241   |
| M128 | 7.46   | 294.5   | 144  | 132.0                     | 0                             | 161.0                         | 73.3                      | 26.38           | 2.6                            | 11.5                         | 2.860 | 18.10                         | 60.64  | 6.38  | 28.93  | 0.265  | 119.245 | 2.138   | 12.995  | 26.106   |
| M129 | 7.25   | 659.0   | 323  | 236.0                     | 0                             | 287.9                         | 191.8                     | 45.72           | 8.8                            | 38.98                        | 0.730 | 60.00                         | 71.24  | 15.93 | 66.41  | 6.310  | 4.595   | 5.322   | 3.405   | 455.425  |
| M130 | 7.11   | 565.0   | 277  | 184.0                     | 0                             | 224.5                         | 166.1                     | 38.69           | 7.2                            | 31.90                        | 0.992 | 70.50                         | 56.96  | 19.07 | 54.30  | 7.401  | 4.955   | 336.328 | 1.760   | 346.953  |
| M131 | 7.11   | 658.0   | 322  | 172.0                     | 0                             | 209.8                         | 155.9                     | 58.03           | 10.4                           | 46.07                        | 0.746 | 55.50                         | 75.46  | 15.95 | 51.69  | 6.516  | 6.353   | 5.771   | 3.676   | 297.995  |
| M133 | 7.34   | 298.0   | 146  | 124.0                     | 0                             | 151.3                         | 55.0                      | 14.07           | 3.0                            | 13.3                         | 2.550 | 17.20                         | 51.08  | 4.96  | 21.44  | 0.345  | 108.983 | 2.911   | 12.055  | 66.131   |
| M134 | 7.24   | 287.6   | 141  | 108.0                     | 0                             | 131.8                         | 62.7                      | 14.07           | 3.6                            | 15.9                         | 2.060 | 17.30                         | 44.65  | 6.92  | 23.55  | 0.940  | 99.708  | 16.678  | 8.807   | 72.749   |
| M135 | 7.42   | 278.1   | 136  | 120.0                     | 0                             | 146.4                         | 66.6                      | 14.07           | 2.9                            | 12.8                         | 1.510 | 11.00                         | 41.42  | 6.59  | 25.19  | 0.907  | 78.747  | 25.602  | 10.744  | 99.923   |
| M136 | 6.94   | 203.4   | 100  | 76.0                      | 0                             | 92.7                          | 49.6                      | 14.07           | 2.7                            | 12.0                         | 0.495 | 11.30                         | 20.00  | 14.76 | 16.30  | 2.169  | 15.627  | 1.128   | 8.922   | 123.145  |
| M137 | 7.13   | 275.5   | 135  | 96.0                      | 0                             | 117.1                         | 67.4                      | 21.10           | 3.4                            | 15.1                         | 0.677 | 18.20                         | 30.19  | 19.44 | 22.63  | 2.643  | 28.739  | 0.336   | 8.907   | 159.786  |
| M138 | 7.41   | 304.0   | 144  | 96.0                      | 0                             | 117.1                         | 57.0                      | 21.10           | 4.0                            | 17.7                         | 1.980 | 18.40                         | 45.25  | 11.86 | 20.20  | 1.585  | 78.147  | 4.854   | 11.219  | 80.270   |
| M139 | 7.27   | 312.0   | 153  | 112.0                     | 0                             | 136.6                         | 53.3                      | 15.83           | 2.4                            | 10.6                         | 3.410 | 21.60                         | 55.00  | 4.34  | 20.62  | 0.428  | 146.199 | 5.248   | 13.732  | 57.950   |
| M140 | 7.16   | 240.1   | 118  | 96.0                      | 0                             | 117.1                         | 54.0                      | 17.58           | 2.7                            | 12.0                         | 1.420 | 11.00                         | 29.89  | 14.55 | 18.24  | 2.050  | 50.101  | 6.651   | 8.455   | 91.452   |
| M141 | 7.17   | 251.9   | 123  | 96.0                      | 0                             | 117.1                         | 44.4                      | 12.31           | 3.9                            | 17.3                         | 2.250 | 17.20                         | 40.02  | 7.00  | 15.92  | 1.129  | 98.048  | 2.513   | 11.091  | 69.683   |
| M142 | 7.26   | 302.0   | 148  | 128.0                     | 0                             | 156.2                         | 59.8                      | 12.31           | 3.8                            | 16.8                         | 3.250 | 22.60                         | 53.71  | 5.00  | 22.86  | 0.669  | 123.562 | 10.693  | 11.896  | 36.683   |
| M143 | 7.77   | 334.0   | 164  | 152.0                     | 4.8                           | 175.7                         | 63.8                      | 14.07           | 3.4                            | 15.1                         | 4.060 | 22.90                         | 63.04  | 4.17  | 24.95  | 0.375  | 165.508 | 2.698   | 13.900  | 49.411   |
| M144 | 7.4    | 311.0   | 152  | 148.0                     | 0                             | 180.6                         | 60.2                      | 12.31           | 2.6                            | 11.5                         | 3.640 | 21.70                         | 57.64  | 5.12  | 23.25  | 0.512  | 137.317 | 4.498   | 13.014  | 48.191   |
| M145 | 7.14   | 327.0   | 160  | 136.0                     | 0                             | 165.9                         | 61.4                      | 14.07           | 3.4                            | 15.1                         | 3.900 | 26.20                         | 60.79  | 4.14  | 24.00  | 0.358  | 155.568 | 2.278   | 13.404  | 38.828   |
| M146 | 7.17   | 315.0   | 154  | 132.0                     | 0                             | 161.0                         | 53.0                      | 12.31           | 2.3                            | 10.2                         | 3.630 | 20.00                         | 53.88  | 4.39  | 20.50  | 0.428  | 145.011 | 14.387  | 12.498  | 46.555   |
| M147 | 7.31   | 310.0   | 152  | 132.0                     | 0                             | 161.0                         | 52.9                      | 10.55           | 3.5                            | 15.5                         | 3.690 | 20.00                         | 55.26  | 4.68  | 20.54  | 0.400  | 145.020 | 1.825   | 12.562  | 45.830   |

| Id   | pH lab | CE lab  | SDT  | Alcalinidad Total         | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Dureza Total              | Cl <sup>-</sup> | N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | F     | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Na    | K     | Ca    | Mg    | Li      | Fe     | As     | Sr      |
|------|--------|---------|------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------|--------------------------------|------------------------------|-------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|--------|---------|
|      |        | (mS/cm) | mg/L | (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | mg/l                          | mg/l                          | (mg/L CaCO <sub>3</sub> ) | mg/L            | mg/L                           | mg/L                         | mg/L  | mg/L                          | mg/L  | mg/L  | mg/L  | mg/L  | ug/L    | ug/L   | ug/L   | ug/L    |
| M148 | 7.25   | 282.9   | 139  | 120.0                     | 0                             | 146.4                         | 54.1                      | 8.79            | 2.6                            | 11.5                         | 2.810 | 16.40                         | 44.14 | 6.38  | 20.69 | 0.587 | 108.579 | 3.607  | 13.170 | 75.781  |
| M149 | 7.5    | 326.0   | 160  | 113.9                     | 0                             | 139.0                         | 80.6                      | 26.38           | 1.7                            | 7.5                          | 0.648 | 18.30                         | 36.48 | 3.66  | 32.11 | 0.098 | 93.267  | 3.891  | 12.899 | 42.494  |
| M150 | 7.64   | 308.0   | 151  | 117.9                     | 0                             | 143.8                         | 75.0                      | 19.34           | 1.4                            | 6.2                          | 0.679 | 17.20                         | 37.47 | 3.49  | 29.92 | 0.068 | 98.452  | 6.690  | 13.498 | 40.373  |
| M151 | 8.05   | 348.0   | 170  | 125.7                     | 4.7                           | 143.8                         | 50.8                      | 24.62           | 0.7                            | 3.1                          | 2.840 | 18.30                         | 53.35 | 9.47  | 18.85 | 0.915 | 157.226 | 17.175 | 0.500  | 112.636 |
| M152 | 7.39   | 355.0   | 174  | 133.6                     | 0                             | 163.0                         | 54.2                      | 19.34           | 0.9                            | 4.0                          | 2.670 | 19.00                         | 53.37 | 6.14  | 20.92 | 0.484 | 200.417 | 8.043  | 12.912 | 129.195 |
| M153 | 7.14   | 292.0   | 143  | 86.4                      | 0                             | 105.4                         | 56.0                      | 22.86           | 1.0                            | 4.4                          | 2.190 | 18.50                         | 41.74 | 5.86  | 21.60 | 0.503 | 115.192 | 3.229  | 13.812 | 84.699  |
| M154 | 7.63   | 303.0   | 149  | 98.2                      | 0                             | 119.8                         | 89.5                      | 28.14           | 1.1                            | 4.9                          | 0.358 | 17.10                         | 25.73 | 13.09 | 34.74 | 0.673 | 12.056  | 3.048  | 8.179  | 128.952 |

### II.2.3.1 Validación de resultados (porcentaje de error, balance de cargas)

Es adecuado verificar si los resultados de los análisis químicos obtenidos presentan la cantidad analítica requerida para la interpretación. Esto permitirá que exista congruencia con las condiciones naturales.

El porcentaje de error se obtiene del total de equivalente de cargas positivas (cationes) y negativas (aniones), es la diferencia como un porcentaje de la suma, de acuerdo con la ecuación:

$$\%E = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100$$

En general se acepta que el análisis químico de una muestra de agua es congruente para este criterio, cuando el porcentaje de error es menor o igual al  $\pm 5\%$ , como se muestra en la Figura 27.

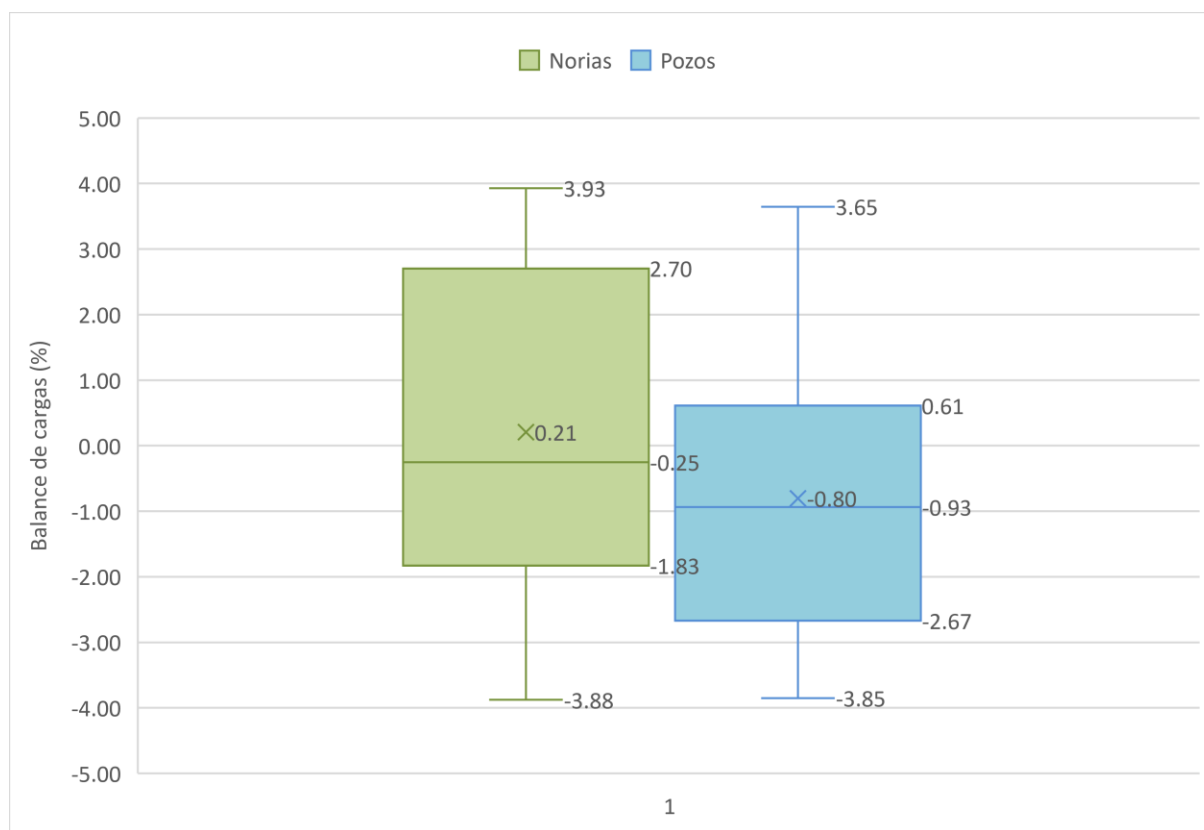


Figura 27. Diagrama de cajas y bigotes para el porcentaje de error.

Es importante considerar que un error menor al 5% no constituye una garantía total de que los resultados son analíticamente correctos. Puede llegar el caso en que dos errores analíticos en la determinación de un anión y catión se cancelen, por ende, el porcentaje de error no detecta anomalías. De acuerdo con el estricto control de resultados que se llevó a cabo en el trabajo de campo y laboratorio, en este caso un error en el balance de cargas menor al 5% indicará un análisis químico de buena calidad por lo que se considera apto para utilizarse en la interpretación.

### II.2.3.2 Diagramas de Piper y familias de agua por ion dominante

Una herramienta visual que permite observar los procesos que ocurren en el agua subterránea es el diagrama de Piper. Consiste en dos triángulos (en uno de ellos se representan los cationes y el otro los aniones), complementados con un rombo ubicado entre la porción superior de los triángulos. Los tres ejes del triángulo de los cationes se utilizan para las concentraciones de Ca, Mg y Na + K, representando las concentraciones como porcentajes del total de estos iones en miliequivalentes por litro (meq/l). El triángulo de los aniones se constituye de forma similar, con ejes para Cl, SO<sub>4</sub> y HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub>. De este modo, finalmente se tiene que cada análisis de agua subterránea disponible se representa como un punto en cada uno de los triángulos.

Permite ubicar las familias de agua en función de sus componentes aniones y cationes de manera simultánea, permitiendo visualizar de manera gráfica la evolución de las distintas fases hidrogeoquímicas, en Figura 28, se presentan las familias de los pozos analizados, así como la densidad de estas muestras, se observa que las densidades más altas corresponden a una familia tipo Bicarbonatada–Cálcica y Bicarbonatada–Sódica.

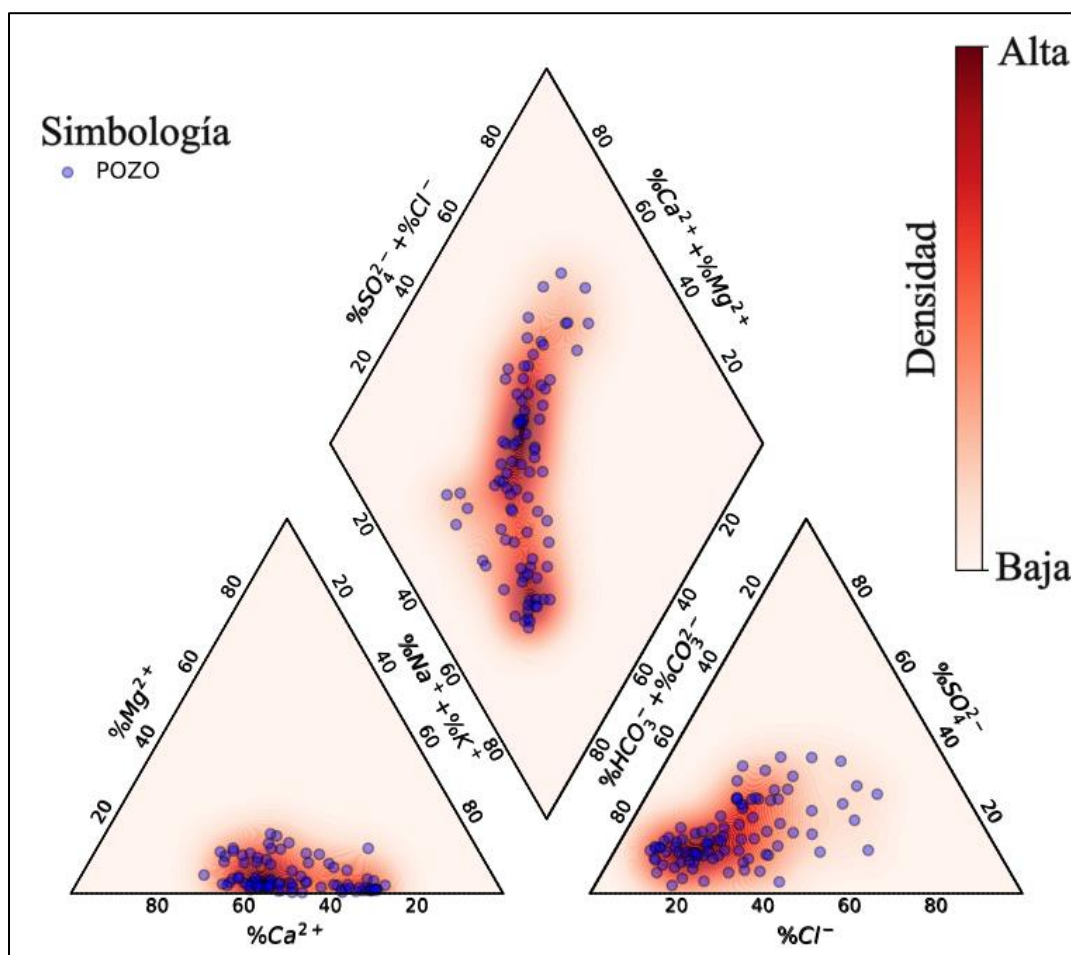


Figura 28. Diagrama de Piper de los pozos analizados.

En la Figura 29, se observa el diagrama de Piper de las norias analizadas, se observa un mayor número de mezclas en las que se considera la familia Mixta – Cálcica como la predominante junto con la Mixta – Mixta y Bicarbonatada – Sódica.

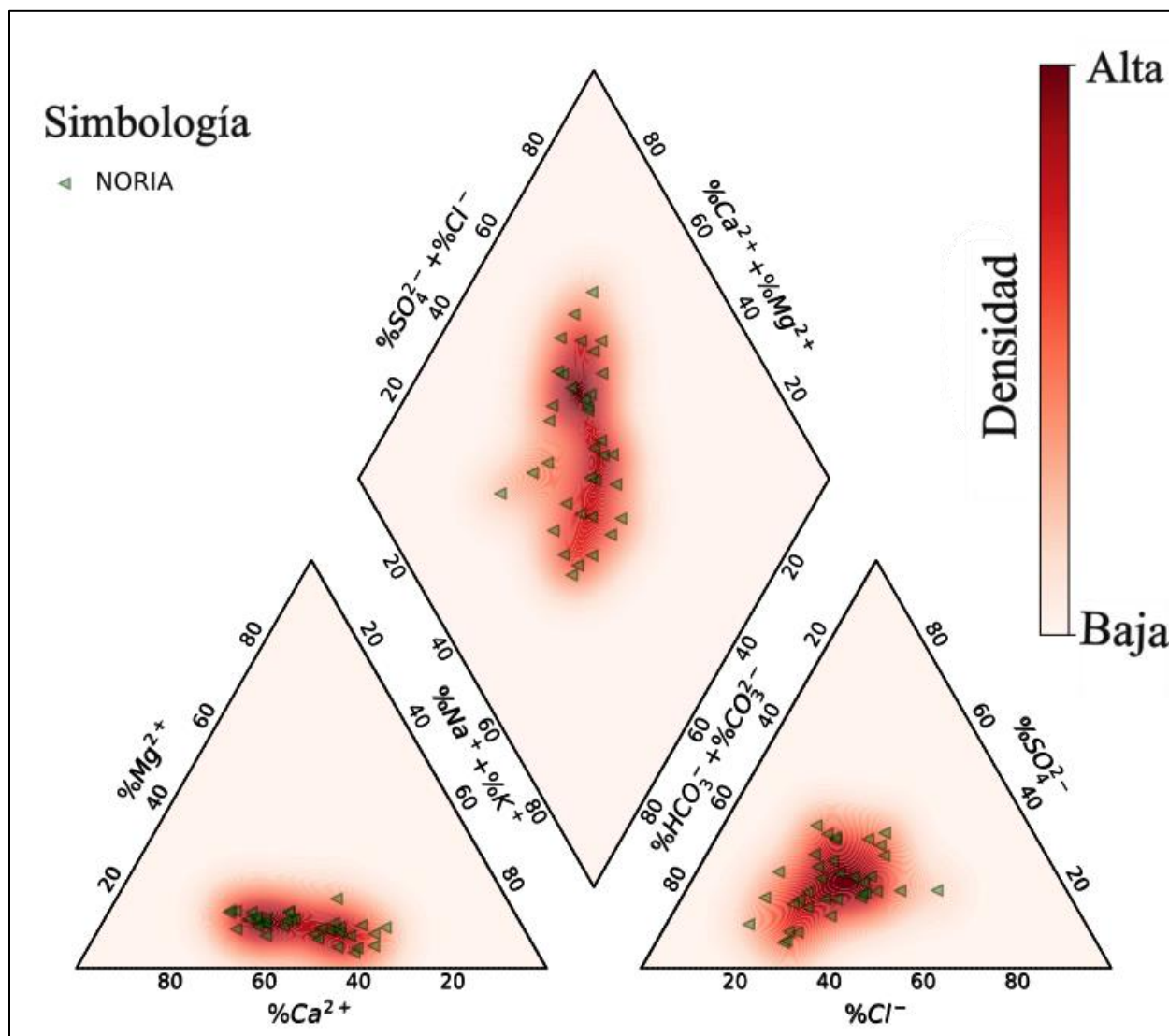


Figura 29. Diagrama de Piper de las norias analizadas.

- Relación de familias de agua y unidades hidrogeológicas

Una clasificación que se basa en las concentraciones de los elementos mayores es la denominada familia de agua por ion dominante. Se procedió a clasificar las muestras de agua de acuerdo al catión y anión dominante, es decir aquel ion cuya concentración en meq/l represente más del 50 % del total de cationes y aniones respectivamente; para los casos que un ion no representa el 50 % se consideró como familia mixta. A partir de los porcentajes en miliequivalentes de los elementos mayores ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Mg}$ ).

Para los pozos resultó en siete familias, como se muestra en la Tabla 9 y la Figura 30, se observa que tienen la misma relación que en el diagrama de Piper:

Tabla 9. Familias de agua por ion dominante en pozos

| NO. | FAMILIA               | CANTIDAD  |
|-----|-----------------------|-----------|
| 1   | BICARBONATADA-SÓDICA  | 35        |
| 2   | MIXTA-CÁLCICA         | 21        |
| 3   | BICARBONATADA-CÁLCICA | 22        |
| 4   | BICARBONATADA-MIXTA   | 7         |
| 5   | MIXTA-MIXTA           | 2         |
| 6   | CLORURADA-MIXTA       | 1         |
| 7   | CLORURADA-CÁLCICA     | 2         |
|     | <b>TOTAL</b>          | <b>90</b> |

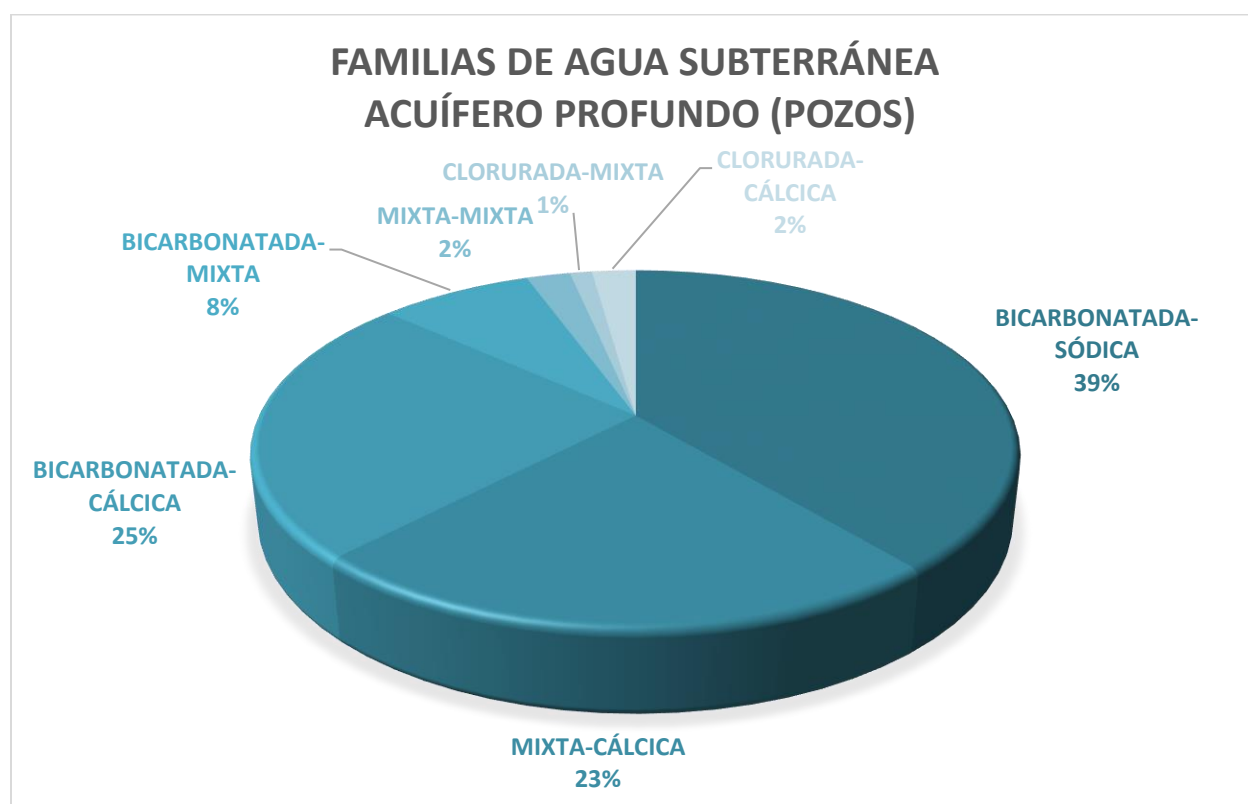


Figura 30. Familias de agua en los pozos.

Las familias con mayor presencia en los pozos son la Bicarbonatada-Sódica (35 muestras), Mixta-Cálcica (21 muestras) y Bicarbonatada-Cálcica (22 muestras). Estas se relacionan con los diferentes sistemas de flujo de agua subterránea.

Las familias resultantes de las norias fueron siete familias, como se muestra en la Tabla 10 y la Figura 31.

Tabla 10. Familias de agua por ión dominante en norias

| NO. | FAMILIA               | CANTIDAD  |
|-----|-----------------------|-----------|
| 1   | BICARBONATADA-SÓDICA  | 7         |
| 2   | MIXTA-CÁLCICA         | 9         |
| 3   | BICARBONATADA-CÁLCICA | 4         |
| 4   | BICARBONATADA-MIXTA   | 4         |
| 5   | MIXTA-MIXTA           | 7         |
| 6   | MIXTA-SÓDICA          | 4         |
| 7   | CLORURADA-CÁLCICA     | 1         |
|     | <b>TOTAL</b>          | <b>36</b> |

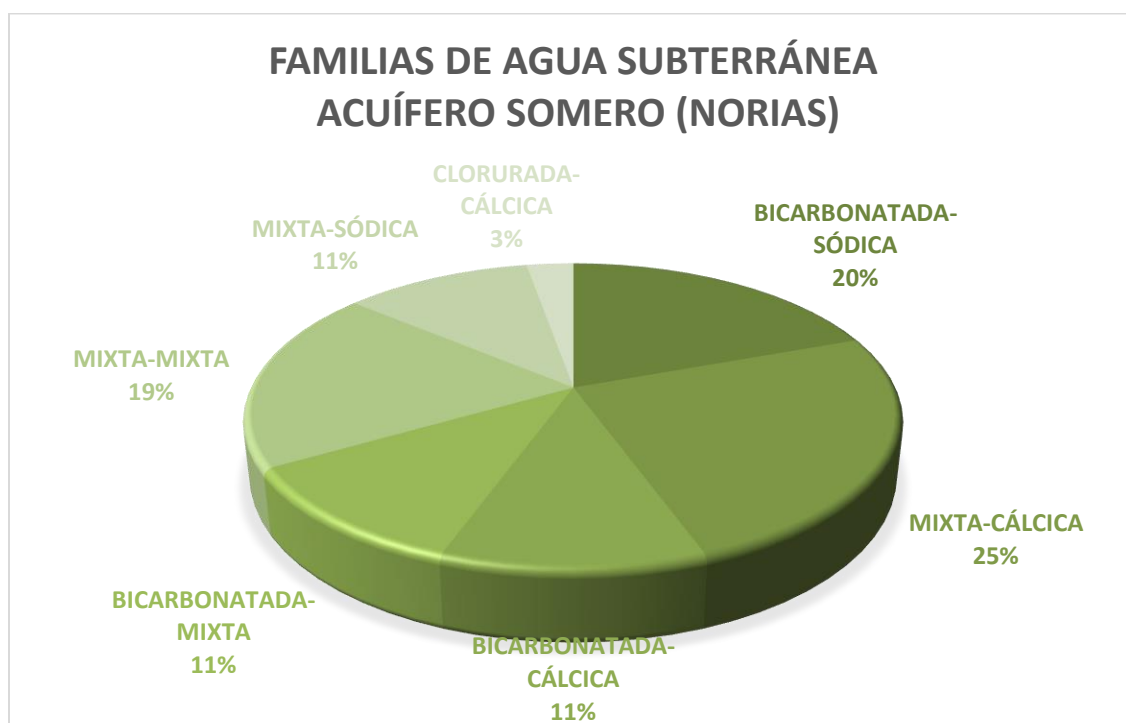


Figura 31. Familias de agua subterránea en el acuífero somero

En las norias existe una mayor diversidad de familias por las mezclas que se encuentran, las familias con mayor presencia son la Mixta-Cálcica (9 muestras), Bicarbonatada-sódica (7 muestras) y Mixta-mixta (7 muestras).

En la Figura 32, se muestran los diagramas de Stiff de las distintas familias de agua por ion dominante de los pozos analizados. Se observa que el tipo de Familia Bicarbonatada-Sódica es aquella que se considera de flujo vertical ascendente proveniente de un flujo regional. La Familia Bicarbonatada-Cálcica se refiere al flujo intermedio. Cardona (2007) nos dice que la Familia Cálcico-Clorurada-Bicarbonatada se refiere al agua del acuífero somero; se aprecia en el mapa la representación de los sistemas de flujo regional, intermedio y local, así como las mezclas.

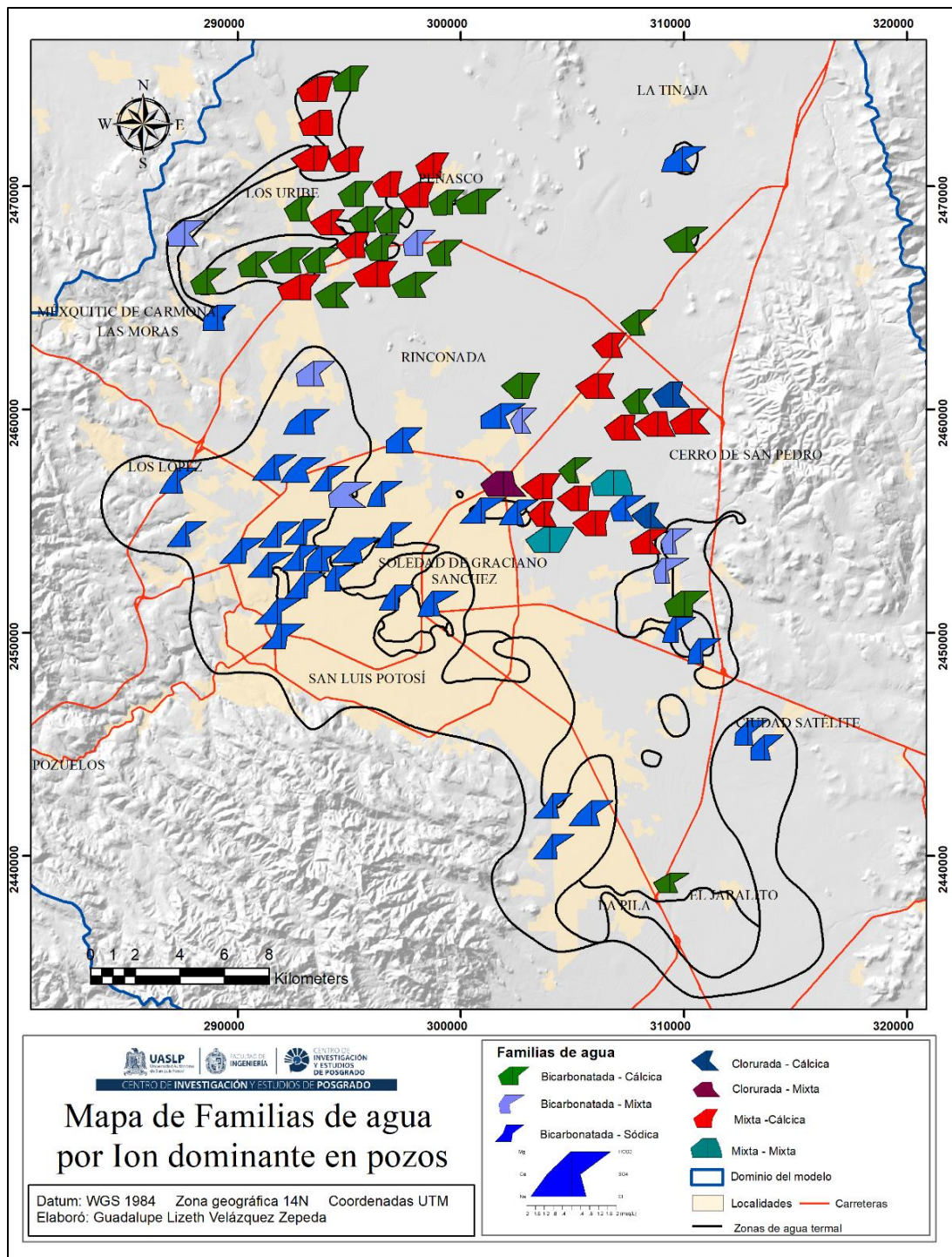


Figura 32. Mapa de familias de agua por ion dominante de los pozos muestreados.

La Figura 33, Mapa de temperaturas del acuífero profundo, muestra la interacción de los pozos profundos con los diferentes sistemas de flujo. Se considera que en las zonas con muestras de color rojo son zonas de agua termal donde existe un flujo vertical ascendente proveniente de las rocas volcánicas, mientras que en las áreas con muestras de color amarillo se presenta un flujo intermedio y las verdes un sistema diferente.

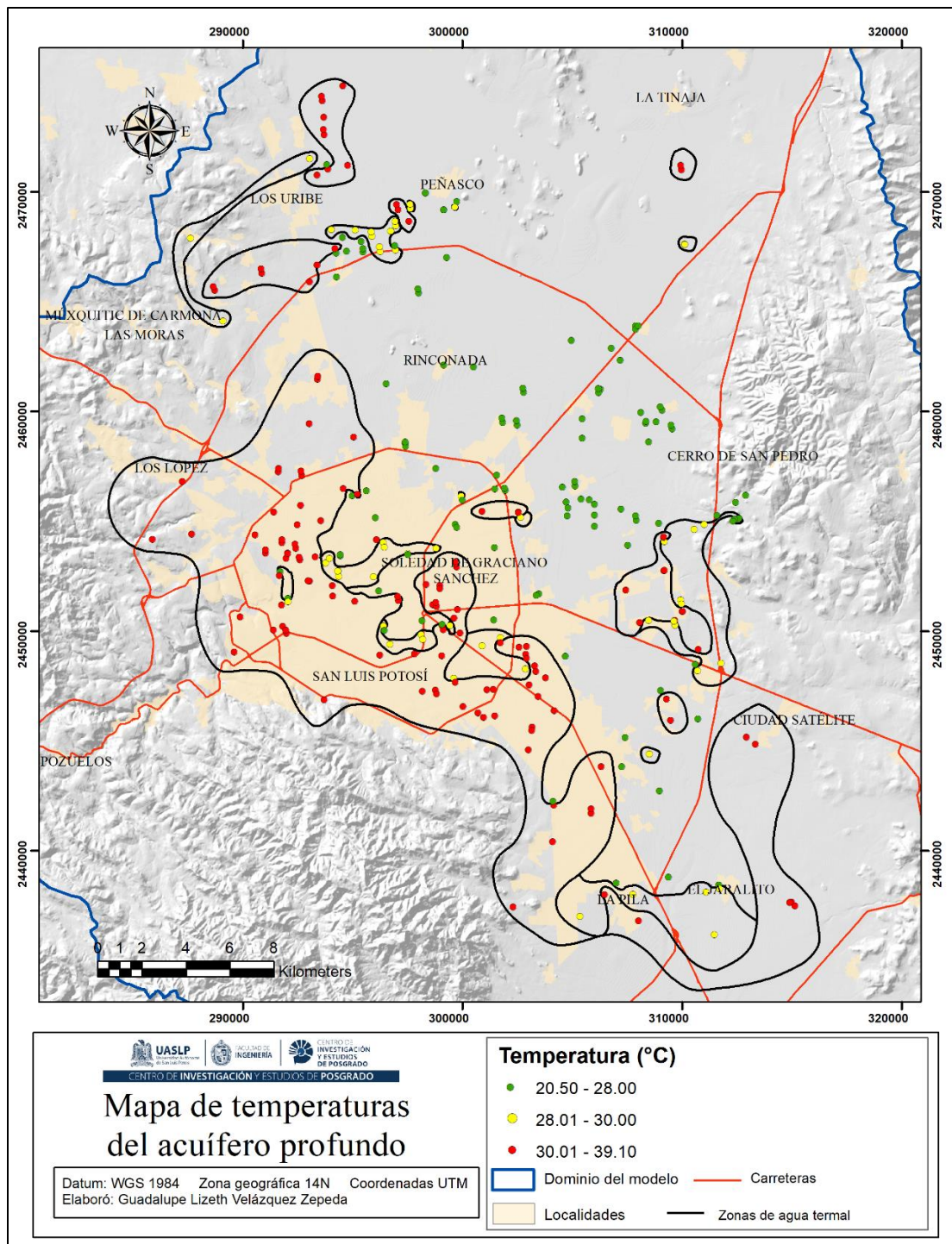


Figura 33. Mapa de temperaturas del acuífero profundo.

Existe una gran interrelación entre la temperatura y las concentraciones de litio en la Figura 34, se puede observar cómo las concentraciones de litio son mayores en donde existen temperaturas mayores a los 30°C. Cardona (2007) menciona que los pozos que captan el agua geotérmica se localizan en las regiones del acuífero profundo donde se registra el mayor abatimiento. La localización de los pozos geotérmicos se correlaciona con la tasa de los principales sistemas de fracturamiento.

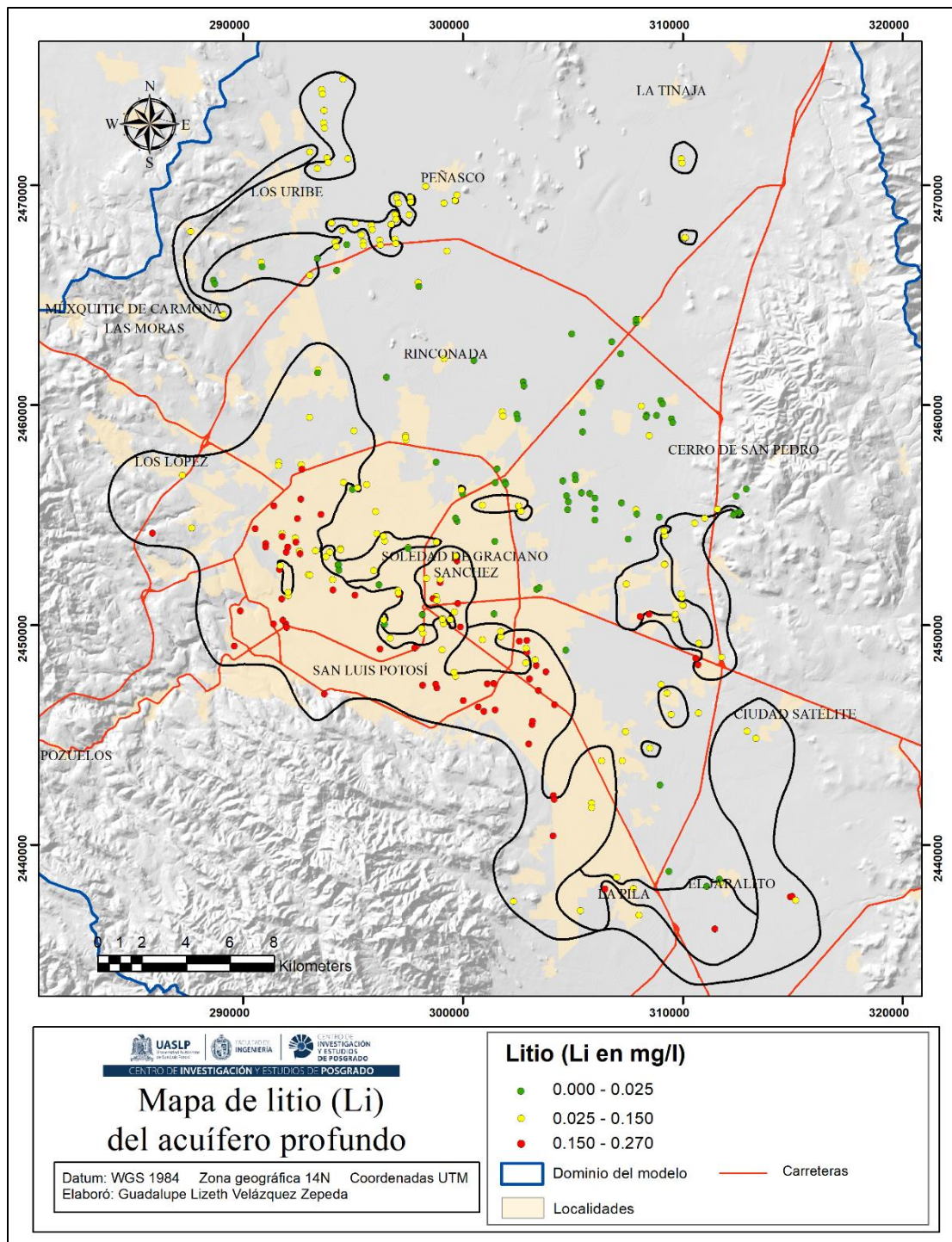


Figura 34. Mapa de litio.

Así mismo se tiene determinado por estudios previos que las concentraciones de nitrógeno de nitratos deberían ser menores en las zonas de agua subterránea del acuífero profundo, sin embargo, se observa en la Figura 35, que ya existen muestras con altas concentraciones de nitrógeno de nitratos en estas zonas, lo que indica una contaminación o mezcla con las aguas del acuífero somero, que a la vez tienen contaminación con aguas residuales.

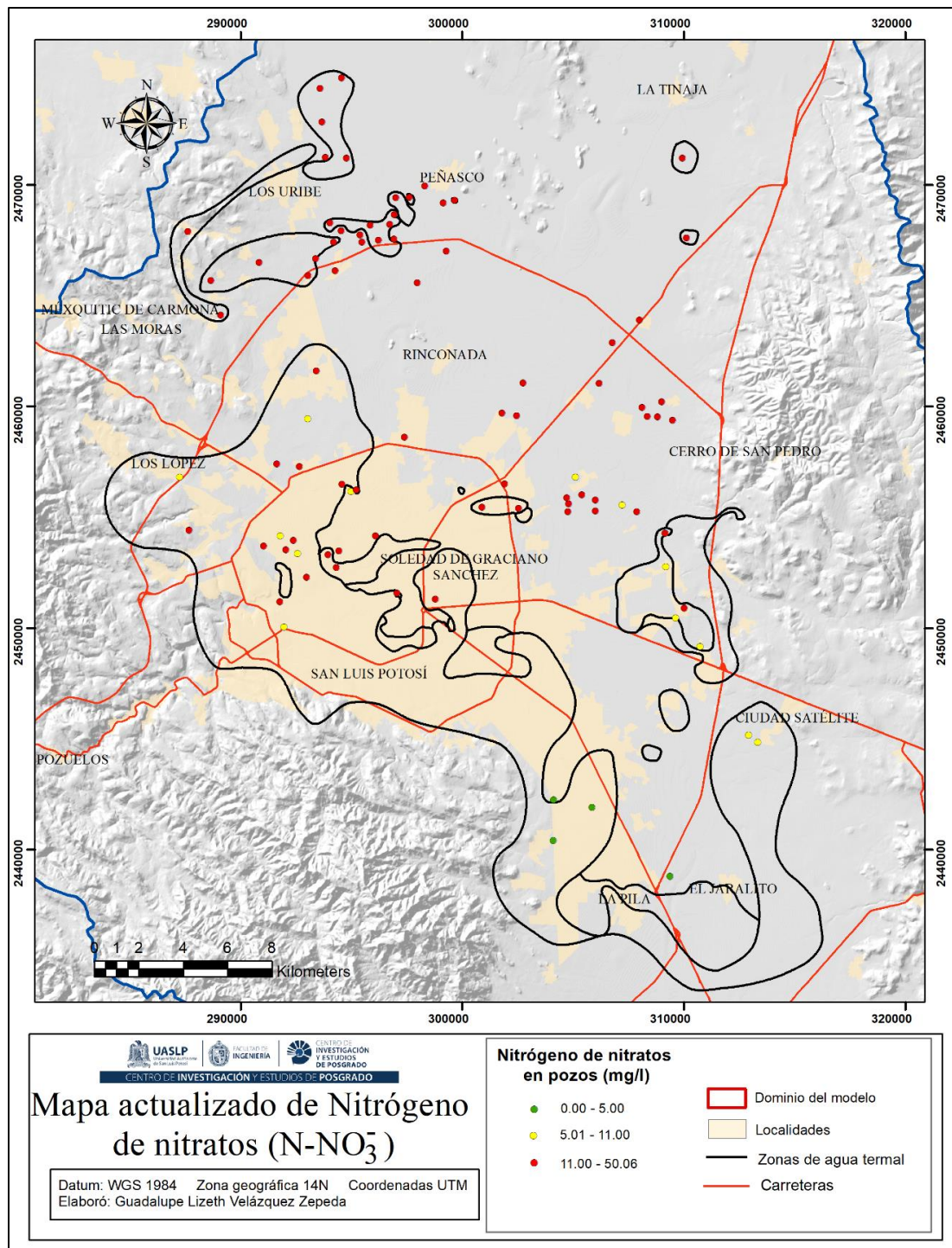


Figura 35. Mapa de nitrógeno de nitratos 2024.

Con la ayuda de la información de Cardona (2007) se realizó el mapa de nitrógeno de nitratos histórico que se muestra en la Figura 36, se muestran las concentraciones de nitrógeno de nitrato con respecto al tiempo, se observa contaminación de los pozos profundos; recordando que el valor del límite máximo permisible de la NOM-127-SSA1-2021 es 11 mg/l, (DOF, 2022).

Las muestras de agua subterránea del acuífero somero presentaron valores elevados de NO<sub>3</sub> (promedio 22 mg/l, variación entre 2 y 80 mg/l), comparados con el acuífero profundo (promedio 4.6 mg/l, variación entre 2 y 11 mg/l); las elevadas concentraciones de NO<sub>3</sub> se atribuyen a la

infiltración de retornos de riego (irrigación con agua residual sin tratamiento) en la zona agrícola de la planicie de SLP (Cardona, 2007).

Sin embargo, los datos actualizados del muestreo 2024 indican que el acuífero somero presenta un promedio de 46.13 mg/l, variación entre 13.29 y 58.919 mg/l; mientras que para el acuífero profundo se tiene un valor promedio de 17.88 mg/l, variación entre 3.1 y 50.06 mg/l. Lo que muestra el incremento en la contaminación del agua subterránea.

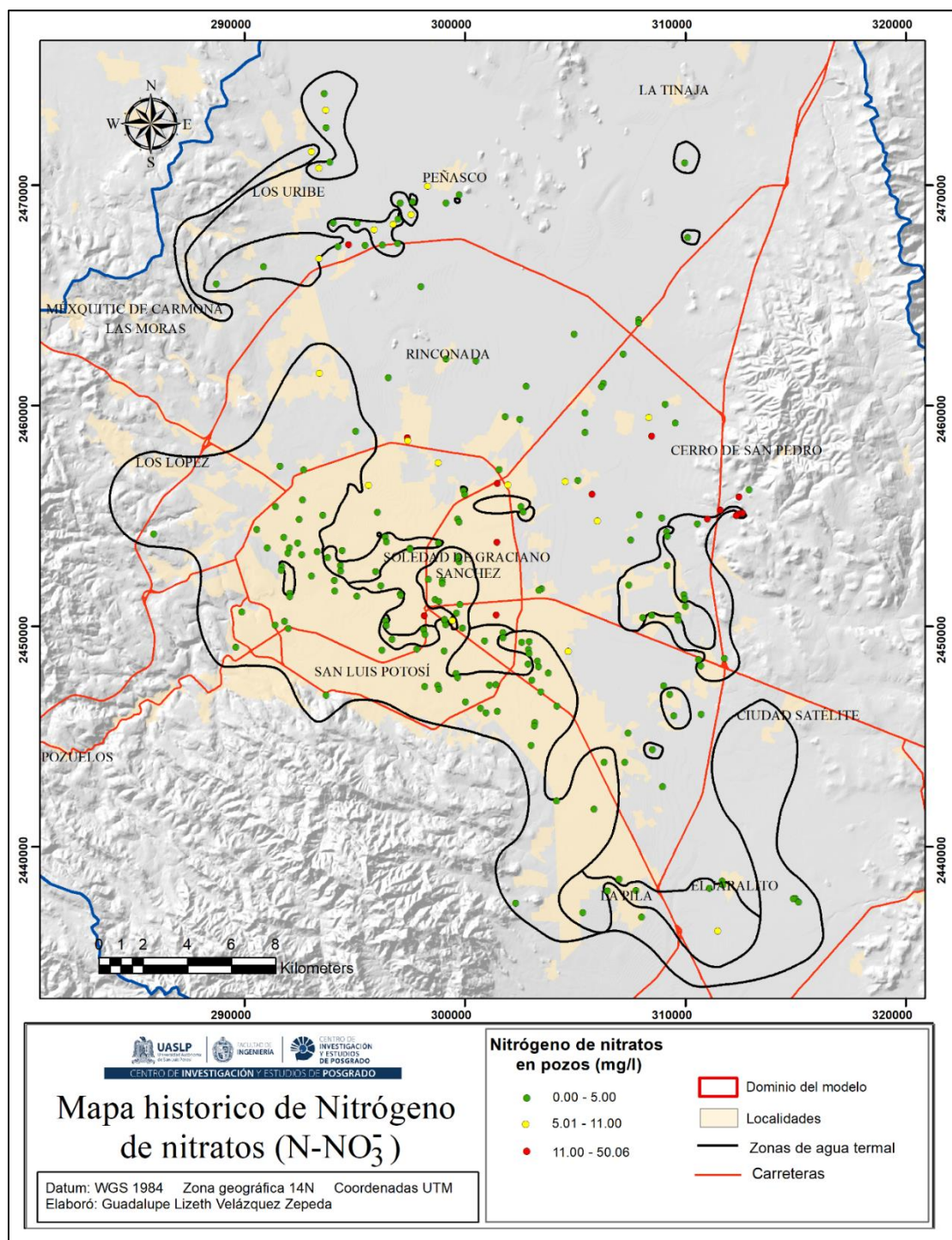


Figura 36. Mapa de nitrógeno de nitratos, históricos.

## II.2.4 Calidad del agua subterránea en San Luis Potosí

Referente al tema de la calidad del agua subterránea diferenciando la parte de la contaminación que se presenta por las norias en el acuífero somero por las aguas residuales y los contaminantes que se percolan, tenemos también la contaminación del acuífero profundo que si bien tiene años desde que se encontró sigue siendo la única fuente de abastecimiento en algunos años.

La calidad del agua en México se rige por la *NOM-127-SSA1-2021 llamada “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”* (DOF, 2022); esta norma contempla parámetros físicos, químicos, microbiológicos y radiactivos. Los parámetros que presentaron niveles superiores a la norma son: pH (3), STD (3), dureza total (9), nitrógeno de nitratos (16), fluoruros (28), hierro (2) y arsénico (41), con su respectivo número de muestras.

A continuación, se describen generalidades de los parámetros cuyos valores rebasaron al límite establecido por la norma.

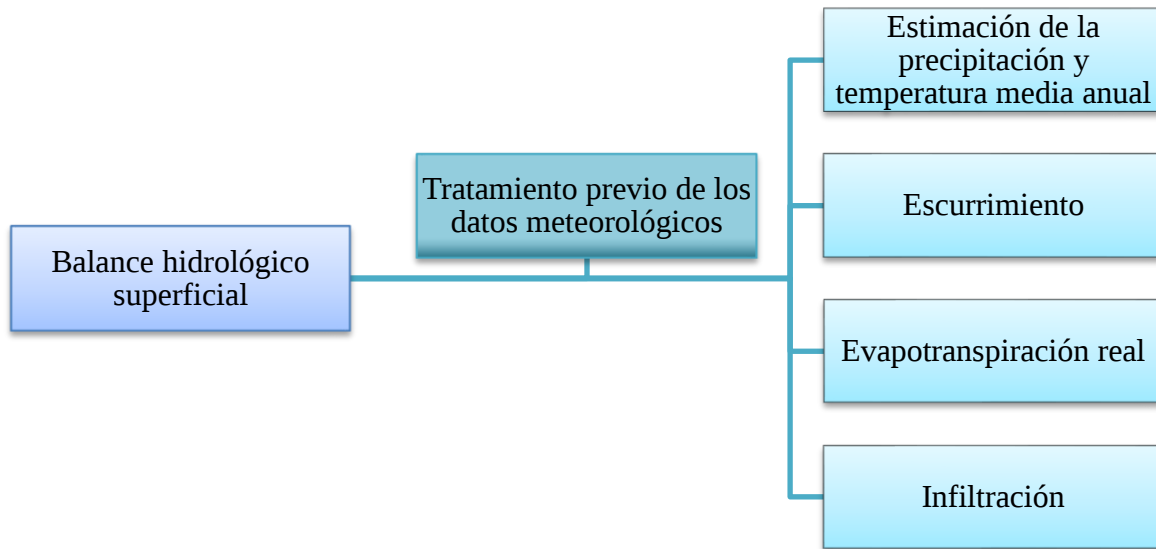
- **pH:** La medición del pH del agua es muy importante, valores altos y bajos son tóxicos para organismos acuáticos, ya sea directa o indirectamente; permite realizar la evaluación de las propiedades corrosivas de un medio ambiente acuático. Además, permite el funcionamiento efectivo de los procesos de tratamiento de aguas y su control (NMX-AA-008-SCFI-2011) (DOF, 2016).
- **STD:** Todas las aguas contienen sustancias disueltas en cantidades diferentes que dependen de su origen. El agua puede contener varios tipos de sólidos, entre ellos, sólidos disueltos y sólidos suspendidos. Estos pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua; en plantas potabilizadoras por ejemplo es importante como indicador de la efectividad de los procesos de tratamiento (NMX-AA-034-SCFI-2015) (DOF, 2015).
- **Dureza total:** se entiende como la capacidad de un agua para precipitar al jabón y está basada en la presencia de sales de los iones calcio y magnesio. La dureza es la responsable de la formación de incrustaciones en recipientes y tuberías, lo que genera fallas y pérdidas. El término representa al agua en la que era difícil (duro) de lavar (NMX-AA-072-1981) (DOF, 2001b).
- **Nitrógeno de nitratos:** El nitrato es una de las formas de nitrógeno de mayor interés en las aguas, generalmente en el agua superficial se encuentra como trazas, pero puede alcanzar elevadas concentraciones en las aguas subterráneas. El nitrato se encuentra sólo en pequeñas cantidades en las aguas residuales domésticas, pero en el diluyente de las plantas de tratamiento biológico desnitrificante. Una concentración alta de nitratos es indicio de una etapa mayor de mineralización de los compuestos nitrogenados. (NMX-AA-079-1986) (DOF, 2001e).
- **Fluoruro:** los iones fluoruro se encuentran en forma natural en el agua, forman complejos con silicio, aluminio y boro; estos complejos pueden existir en el agua debido al uso de compuestos fluorados por la industria. En muchas regiones las concentraciones de fluoruro han incrementado con el crecimiento de las prácticas de fluoración de aguas como medida de salud pública. La mayoría de las aguas no contienen más allá de 0.3 mg/l de fluoruros,

excepto cuando se contaminan con desechos industriales o aguas negras (MNX-AA-077-1982) (DOF, 2001d).

- **Hierro:** El hierro presente en las aguas subterráneas se encuentra en su forma ferrosa ( $\text{Fe}^2$ ), la cual es soluble y generalmente no representa un problema por sí sola. Sin embargo, el hierro ferroso tiende a oxidarse y convertirse en formas férricas que se presentan como hidróxidos insolubles en agua. Estos compuestos rojos son corrosivos y pueden causar obstrucciones en bombas, tuberías y sistemas de conducción de agua (Padilla Díaz, 2024).
- **Arsénico:** es extremadamente tóxico para el organismo humano, tanto en concentraciones altas, donde la exposición causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales, como en la exposición durante un largo período a bajas concentraciones (por ejemplo, por ingestión de agua) tiene efectos negativos crónicos para la salud, que incluyen cáncer. (Lillo, 2003).

### II.3 Hidrología superficial

En este apartado se describen todos los pasos realizados en el cálculo del balance hidrológico anual del periodo 1970-2024 de la región de estudio, con los que se alimentó al modelo numérico (Figura 37).



*Figura 37. Diagrama del proceso para el balance hidrológico superficial*

#### II.3.1 Tratamiento previo de los datos meteorológicos

En el cálculo del balance hidrológico superficial es importante usar los datos de las estaciones meteorológicas, porque es la información más real de la zona de estudio que se tiene, sin embargo, hay que realizar un tratamiento previo de estos datos.

Los datos meteorológicos suelen presentar inconsistencias debido a varios factores desde su registro, fallos en los equipos, falta de personal, etc.; por ello se deben verificar para que la información tenga consistencia. A continuación, se presentan las pruebas realizadas en los datos para mejorar la calidad de la información.

##### II.3.1.1 Estaciones

La CONAGUA dispone información de aproximadamente 5,400 estaciones climatológicas, de las cuales 2,800 reportan datos, un 51%, mientras que el resto dejó de operar temporal o definitivamente, sin embargo, conservan un considerable acervo de información. Las variables climatológicas que se pueden consultar son: temperaturas extremas, precipitación acumulada en 24 horas, algunos fenómenos como la tormenta eléctrica, niebla, granizo, la cobertura del cielo, evaporación y las normales climatológicas (CONAGUA, 2025).

Se procedió a descargar la información vectorial de las estaciones climatológicas para ubicarlas espacialmente dentro del área de estudio; se consideraron 26 estaciones como se muestra en la Figura 38, las cuales están distribuidas dentro y fuera del área de la cuenca, para tener valores interpolados reales de precipitación y temperatura.

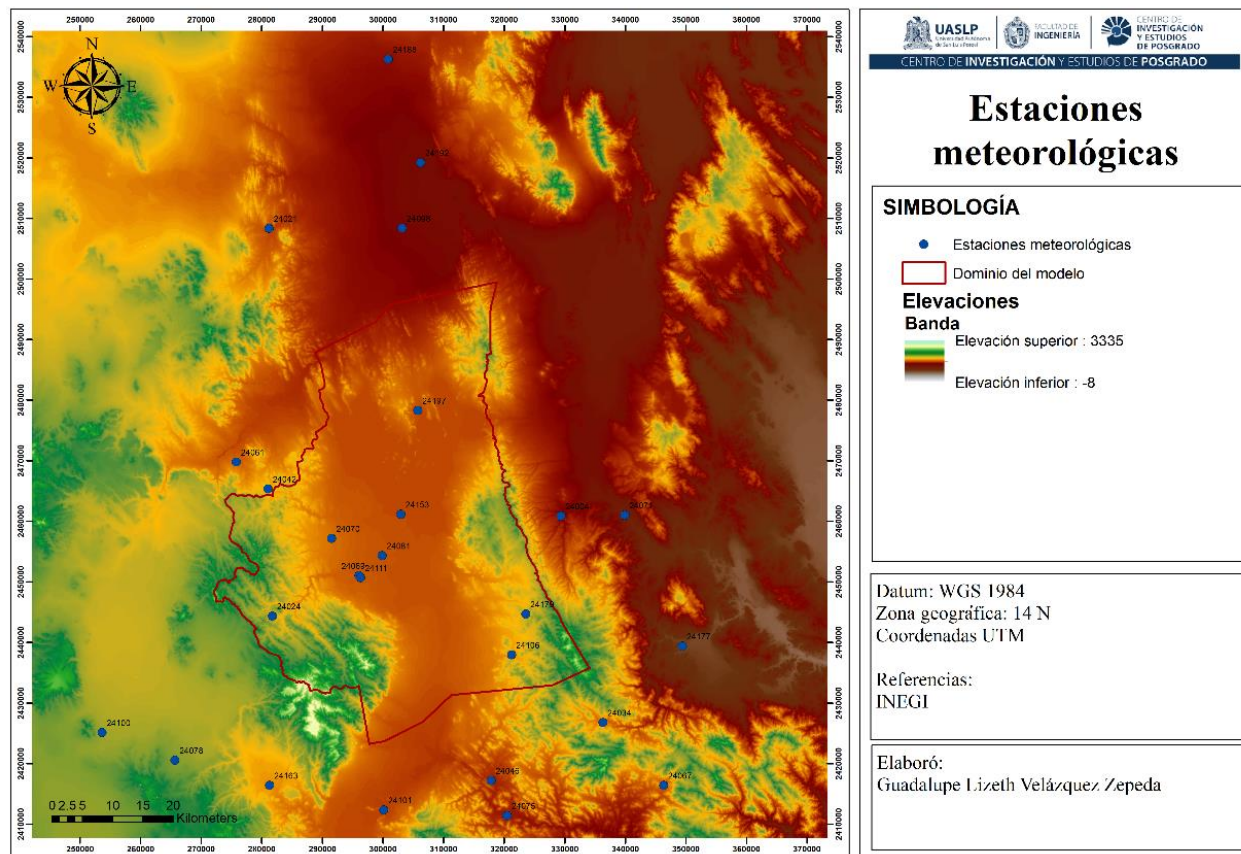


Figura 38. Localización de las Estaciones Climatológicas de la CONAGUA en la región de estudio.

En la Tabla 11, se observa el nombre de cada estación, las cuales fueron verificadas inicialmente para conocer si contaban con los registros suficientes para ser tomadas en cuenta; se consideró que contarán con un periodo de 30 años como mínimo, tomando el periodo de 1970-2024. De las estaciones seleccionadas se solicitó la información directamente a las oficinas de la CONAGUA en San Luis Potosí.

Tabla 11. Información de las Estaciones Climatológicas de CONAGUA analizadas.

| ESTACIONES TRABAJADAS |       |                                                |                       |         |                   |      |
|-----------------------|-------|------------------------------------------------|-----------------------|---------|-------------------|------|
| NO.                   | ID    | NOMBRE                                         | COORDENADAS UTM WGS84 |         | AÑOS DE OPERACIÓN |      |
|                       |       |                                                | X                     | Y       | INICIO            | FIN  |
| 1                     | 24004 | Armadillo de los infantes                      | 329419                | 2460880 | 1961              | 2018 |
| 2                     | 24021 | El grito, Moctezuma                            | 281207                | 2508400 | 1969              | 2017 |
| 3                     | 24024 | El Peaje, S.L.P.                               | 281762                | 2444370 | 1964              | 2022 |
| 4                     | 24034 | La Salitrera, Villa de Zaragoza                | 336366                | 2426790 | 1961              | 2018 |
| 5                     | 24042 | Mexquitic, Mexquitic de Carmona                | 281053                | 2465360 | 1944              | 2021 |
| 6                     | 24046 | Ojo Caliente, Villa de Reyes                   | 317890                | 2417240 | 1969              | 2020 |
| 7                     | 24061 | La Concordia, Armadillo de los Infantes        | 275791                | 2469830 | 1961              | 2018 |
| 8                     | 24067 | San Jose de Albuquerque, Santa María del río   | 346366                | 2416410 | 1961              | 2017 |
| 9                     | 24069 | Los Filtros, SLP                               | 296100                | 2451060 | 1949              | 2019 |
| 10                    | 24070 | Presa Golondrinas, San Nicolas Tolentino       | 291539                | 2457190 | 1986              | 2021 |
| 11                    | 24071 | San Nicolas Tolentino, San Nicolas Tolentino   | 339958                | 2461070 | 1961              | 2018 |
| 12                    | 24075 | Santa María del Río (DGE), Santa María del río | 320524                | 2411420 | 1961              | 2018 |
| 13                    | 24078 | Santiago, Villa de Arriaga                     | 265666                | 2420570 | 1961              | 2018 |
| 14                    | 24081 | Soledad, Soledad de Graciano Sanchez           | 299896                | 2454370 | 1945              | 2021 |
| 15                    | 24098 | El Mezquite, Villa de Arista                   | 303193                | 2508440 | 1962              | 2022 |
| 16                    | 24100 | Villa de arriaga, Villa de Arriaga (DGE)       | 253675                | 2425150 | 1962              | 2021 |
| 17                    | 24101 | Villa de Reyes, Villa de Reyes                 | 300139                | 2412370 | 1961              | 2021 |
| 18                    | 24106 | Zaragoza, Villa de Zaragoza                    | 321255                | 2437990 | 1961              | 2022 |
| 19                    | 24111 | San Luis Potosí (SMN)                          | 296324                | 2450720 | 1966              | 2022 |
| 20                    | 24153 | Col. Benito Juárez                             | 302990                | 2461190 | 1993              | 2024 |
| 21                    | 24163 | Bledos, Villa de Reyes                         | 281319                | 2416410 | 1978              | 2018 |
| 22                    | 24177 | Santa Catarina                                 | 349456                | 2439420 | 1980              | 2018 |
| 23                    | 24179 | Xoconoxtle, Villa de Zaragoza                  | 323595                | 2444700 | 1980              | 2021 |
| 24                    | 24188 | Coronado, Venado                               | 300904                | 2536350 | 1982              | 2022 |
| 25                    | 24192 | San Francisco II, Moctezuma                    | 306243                | 2519230 | 1982              | 2023 |
| 26                    | 24197 | El Terrero, S.L.P.                             | 305782                | 2478320 | 1983              | 2018 |

### II.3.1.2 Análisis de homogeneidad e independencia

La prueba de homogeneidad o prueba de Helmer se explica ampliamente en el libro de (Campos Aranda, 1998) con fines prácticos se puede decir que lo contrario a esta es cuando una serie de datos presenta cambios bruscos de su valor medio.

La prueba de Helmer es muy simple y consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor promedio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, una secuencia (S) es creada. Difiere si una desviación es seguida por otra de signo contrario, un cambio (C) será registrado. Cada año, excepto el primero, definirán una secuencia o un cambio.

Para que sea homogénea, la diferencia entre el número de secuencias (S) y el número de cambios (C) en el registro deberá ser cero, dentro de los límites de un error probable, el cual, de hecho, depende de la longitud del registro (n), esto es:

$$S - C = 0 \mp \sqrt{n-1}$$

O bien:

$$S - C = \mp \sqrt{n-1}$$

En el caso de que el número de secuencia sea mayor que el número de cambios, algún tipo de variación en la medida o una tendencia en los datos crea la inconsistencia.

La prueba de independencia la describe Campos Aranda (2010) en su libro esta prueba que revisa la persistencia, la cual se determina con el coeficiente de correlación serial de orden k, este indica que tan fuertemente es afectado un evento por el anterior a él, si está desfasado o tiene un retraso k. El coeficiente de correlación serial del orden 1 ( $r_1$ ) se cuantifica para un registro o serie anual de máximos de tamaño n, por medio de la (ecuación), haciendo parejas x, y de un dato como en el siguiente, después ese con el que sigue y así sucesivamente; se forman tantas parejas como n-1.

$$\lambda_2 = 2b_1 - b_0$$

La prueba de Anderson muestra que cuando el valor calculado de  $r_1$  no excede el intervalo definido por los límites o curvas de control (Lc), no es estadísticamente diferente de cero y por lo tanto la persistencia no existe. La ecuación del cálculo es:

$$Lc = \frac{-1.00 \mp 1.964\sqrt{(n-2)}}{(n-1)}$$

El signo que se usa en la ecuación anterior corresponde al de  $r_1$ . La independencia en los datos de una serie anual de máximos valida los resultados del análisis probabilístico.

La Tabla 12, muestra los resultados de las pruebas de Homogeneidad e Independencia.

Tabla 12. Resultados de las pruebas de homogeneidad e independencia.

| No.   | Nombre                                         | Año de inicio | Año de termino | Tiempo | Independencia | Homogeneidad | Periodo >30 |
|-------|------------------------------------------------|---------------|----------------|--------|---------------|--------------|-------------|
| 24004 | Armadillo de los infantes                      | 1961          | 2021           | 60     | SI            | NO           | SI          |
| 24021 | El grito, Moctezuma                            | 1969          | 2017           | 48     | SI            | NO           | SI          |
| 24024 | El Peaje, S.L.P.                               | 1964          | 2022           | 58     | SI            | SI           | SI          |
| 24034 | La Salitrera, Villa de Zaragoza                | 1961          | 2018           | 57     | SI            | SI           | SI          |
| 24042 | Mexquitic, Mexquitic de Carmona                | 1944          | 2021           | 77     | SI            | SI           | SI          |
| 24046 | Ojo Caliente, Villa de Reyes                   | 1969          | 2020           | 51     | SI            | SI           | SI          |
| 24061 | La Concordia, Armadillo de los Infantes        | 1961          | 2018           | 57     | SI            | NO           | SI          |
| 24067 | San Jose de Albuquerque, Santa María del río   | 1961          | 2017           | 56     | SI            | SI           | SI          |
| 24069 | Los Filtros, SLP                               | 1949          | 2019           | 70     | SI            | SI           | SI          |
| 24070 | Presa Golondrinas, San Nicolas Tolentino       | 1986          | 2024           | 38     | SI            | SI           | SI          |
| 24071 | San Nicolas Tolentino, San Nicolas Tolentino   | 1961          | 2018           | 57     | SI            | SI           | SI          |
| 24075 | Santa María del Río (DGE), Santa María del río | 1961          | 2018           | 57     | SI            | NO           | SI          |
| 24078 | Santiago, Villa de Arriaga                     | 1961          | 2018           | 57     | SI            | SI           | SI          |
| 24081 | Soledad, Soledad de Graciano Sanchez           | 1945          | 2021           | 76     | SI            | NO           | SI          |
| 24098 | El Mezquite, Villa de Arista                   | 1962          | 2022           | 60     | SI            | SI           | SI          |
| 24100 | Villa de arriaga, Villa de Arriaga (DGE)       | 1962          | 2021           | 59     | SI            | SI           | SI          |
| 24101 | Villa de Reyes, Villa de Reyes                 | 1961          | 2021           | 60     | SI            | SI           | SI          |
| 24106 | Zaragoza, Villa de Zaragoza                    | 1961          | 2022           | 61     | SI            | SI           | SI          |
| 24111 | San Luis Potosí (SMN)                          | 1966          | 2022           | 56     | SI            | SI           | SI          |
| 24153 | Col. Benito Juárez                             | 1993          | 2024           | 31     | SI            | NO           | SI          |
| 24163 | Bledos, Villa de Reyes                         | 1978          | 2018           | 40     | SI            | NO           | SI          |
| 24177 | Santa Catarina                                 | 1979          | 2018           | 39     | SI            | SI           | SI          |
| 24179 | Xoconoxtle, Villa de Zaragoza                  | 1980          | 2021           | 41     | SI            | SI           | SI          |
| 24188 | Coronado, Venado                               | 1982          | 2022           | 40     | SI            | SI           | SI          |
| 24192 | San Francisco II, Moctezuma                    | 1982          | 2023           | 41     | SI            | NO           | SI          |
| 24197 | El Terrero, S.L.P.                             | 1983          | 2018           | 35     | SI            | NO           | SI          |

Se concluye que las estaciones elegidas cumplen con las condiciones necesarias para utilizarse en el balance hídrico superficial, aunque se tengan 9 estaciones que no son homogéneas, mientras cumplan la prueba de Independencia y los años mínimos se aceptan.

### II.3.1.3 Datos faltantes

Debido a que se requieren los balances hídricos anuales se necesita tener los datos completos en los registros históricos, se realizaron primero los procesos de relleno de datos faltantes a partir de los siguientes métodos: método racional deductivo, método del inverso de la distancia y promedio de estaciones cercanas.

En algunos casos no es posible tener estaciones cercanas para rellenar o bien, las existentes no cuentan con la información del mismo periodo, en este caso se puede estimar el valor mensual por medio de un promedio aritmético de los valores contenidos en el registro para ese mes, es válido si es un solo año o máximo solo los faltantes y si el promedio se realiza con días años mínimo.

La descripción de los métodos proviene del libro de Campos Aranda (1998).

#### Método racional deductivo

Cuando el registro de precipitaciones mensuales de una estación se presenta uno o varios años incompletos, puede aplicarse el método racional deductivo para estimar los datos faltantes, siempre que estos no superen once años. Este procedimiento se basa en la información proporcionada por los años con registros completos.

En primer lugar, se suman las precipitaciones mensuales correspondientes a todos los años completos, obteniendo el promedio mensual de lluvia.

Posteriormente, para cada año completo se calculan los porcentajes mensuales de precipitación, definidos como la relación entre la precipitación mensual y la precipitación promedio mensual, multiplicada por 100.

Como verificación, al sumar los porcentajes mensuales calculados, se obtiene un valor de 1,200 y su promedio da un resultado de 100, lo que confirma la consistencia del cálculo.

A continuación, los porcentajes mensuales de cada uno de los doce meses se suman y se dividen entre el número de años completos disponibles. De este modo se obtiene el porcentaje promedio mensual denominado  $s_j$ , donde  $j$  toma valores de 1 a 12, correspondiente a los meses.

El método parte de la hipótesis de que los meses sin información presentan un comportamiento similar al promedio histórico, por lo que se le asigna el porcentaje promedio ( $s_j$ ). Para el desarrollo del cálculo se desigualan las variables siguientes:

$i$  = cada uno de los meses desconocidos, como máximo pueden ser once.

$P_i$  = Precipitación mensual desconocida en cada año incompleto, en mm.

$\sum S_i$  = suma de los porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce (%).

$\sum P$  = suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos, en mm.

$S_i$  = porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes.

Con base en estas definiciones, se establece la relación:

$$\frac{P_i}{S_i} = \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i}$$

Donde se obtiene:

$$P_i = \left( \frac{\sum P}{1200 - \sum S_i} \right) S_i$$

Dado que el término entre paréntesis es constante, la expresión final puede simplificarse como:

$$P_i = K (S_i)$$

#### Método del inverso de la distancia o método del U.S. National Weather Service.

Contempla que el dato faltante en una cierta estación A puede ser estimado en base a los datos observados en las estaciones vecinas. El método consiste en ponderar los valores observados en una cantidad W, igual al recíproco del cuadrado de la distancia (D) entre cada estación vecina y la estación A.

La lluvia buscada  $P_x$  será igual a:

$$P_x = \frac{\sum (P_i W_i)}{\sum W_i}$$

En donde:

$P_i$  = precipitación observada para la fecha de la faltante, en las estaciones auxiliares circundantes (mínimo 2), en mm.

$W_i = 1/D_i^2$ , siendo  $D_i$  la distancia entre cada estación circundante y la estación incompleta, en km.

Es recomendable utilizar cuatro estaciones auxiliares, de preferencia las más cercanas y cada una se encuentre en uno de los cuadrantes de los ejes coordenados que pasan por la estación incompleta.

En este caso para el relleno de los datos de precipitación media mensual se utilizó el método del inverso de la distancia para rellenar los meses de lluvias en las estaciones que se tienen datos y el método racional deductivo para los meses de estiaje, en los años que no se tiene forma de rellenar por estos métodos se usa el promedio de los datos de los meses de las estaciones secundarias, para cada estación se consideraron tres estaciones secundarias. En los datos de temperatura promedio, se utilizó el método de relleno con el promedio de las estaciones secundarias. En el apéndice se encuentra la información de cada cálculo.

### II.3.2 Estimación de la precipitación media anual y temperatura media anual

Al ser una región de estudio muy amplia, es importante realizar estimaciones de la precipitación y la temperatura media anual, considerando los datos anuales de las estaciones.

Para el análisis de Precipitación Media Anual (PMA) y la Temperatura Media Anual (TMA) se utilizó el método de las isoyetas, con base en la información de la CONAGUA para las 26 estaciones climatológicas homogéneas para un periodo de años del periodo 1970-2024.

El método de las isoyetas consiste en localizar espacialmente las estaciones con sus valores, generar curvas de igual cantidad de precipitación o temperatura para cada uno de los años. Se toma el valor promedio entre cada curva y el área entre ellas siguiendo la ecuación de Campos Aranda (1998):

$$P = \sum_{i=1}^n \left( \frac{A_i}{A_t} \right) P_i$$

Donde:

P = precipitación promedio en la cuenca, en mm.

$A_i$  = área entre cada dos isoyetas dentro del parteaguas de la cuenca, en km<sup>2</sup>

$A_t$  = área total de la cuenca, km<sup>2</sup>

$P_i$  = precipitación promedio entre cada dos isoyetas, en mm.

La interpolación de los datos para generar las curvas de isoyetas se realizó en *ArcMap 10.5*, con el método de interpolación de inverso de la distancia (IDW) siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

Se generó un archivo de texto separado por comas (csv) con la información de la precipitación anual promedio de cada estación con sus coordenadas UTM, en *ArcGIS 10.5* se habilitó la herramienta de “Geostatistical Analyst – Geostatistical Wizard”, se abrió una ventana nueva, se eligió el método de “Inverse Distance Weighting”, en “Dataset”, la fuente de datos que es el archivo csv previo, en “Data field” se eligió el año a trabajar, como se observa en la Figura 39.

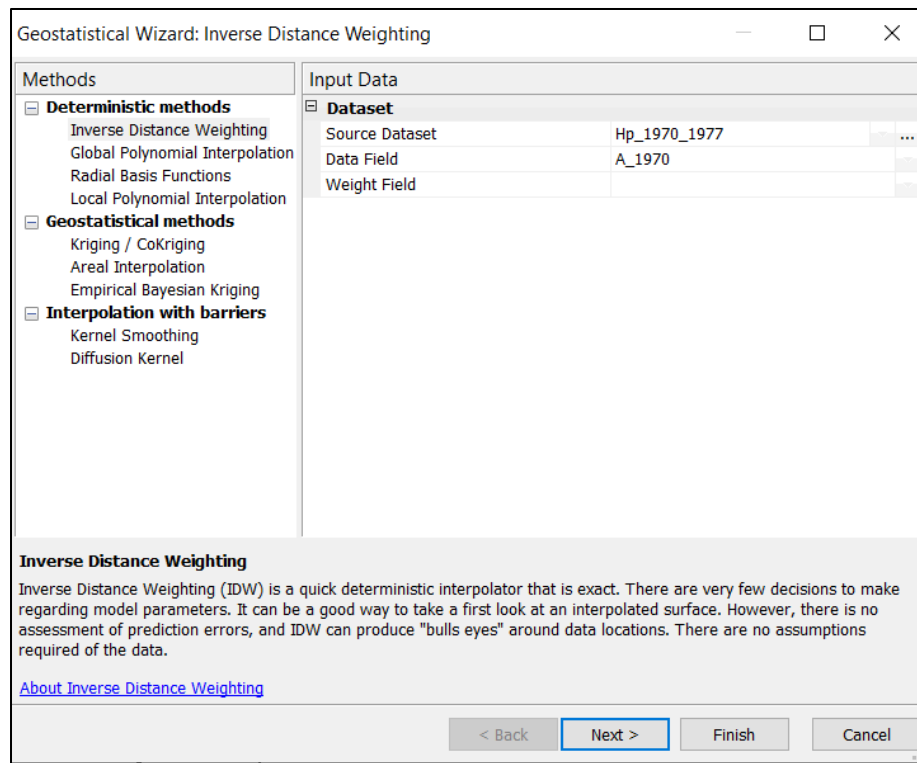


Figura 39. Interpolación IDW -isoyetas

Se dio clic en “next”, se eligió en propiedades generales, “Power 4” y en “Sector type – 4 sectors”, siguiente y finalizar, como se aprecia en la Figura 40.

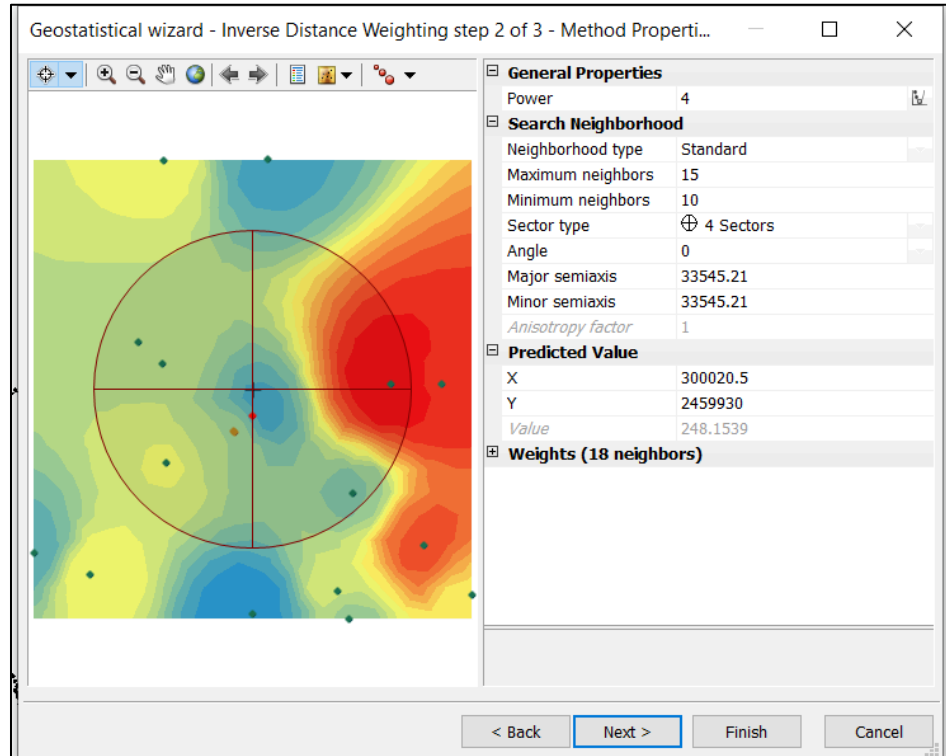
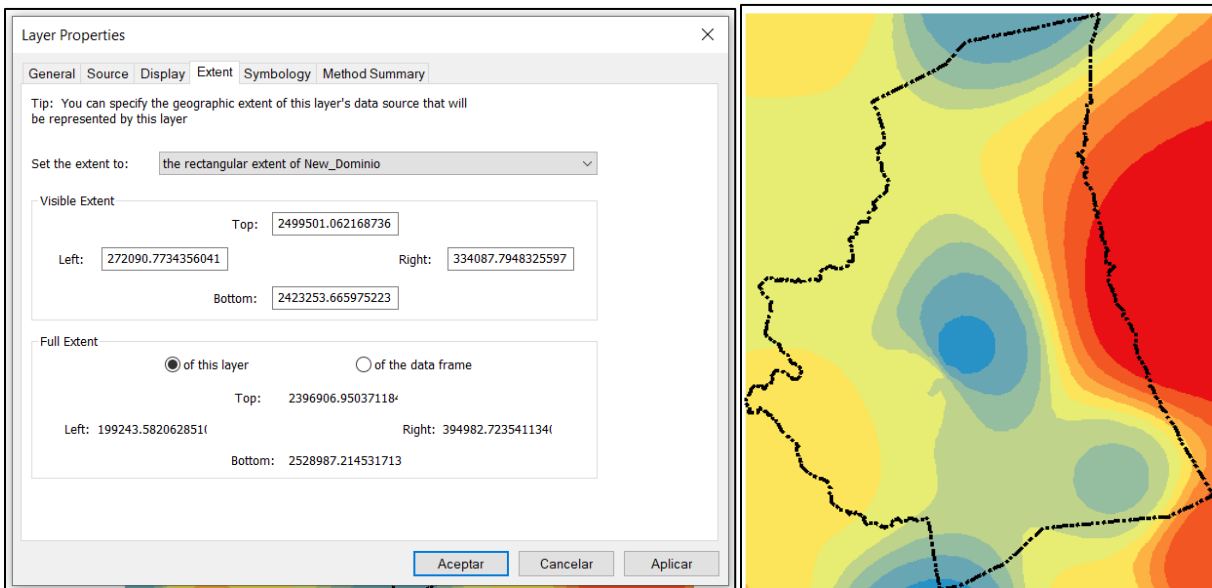


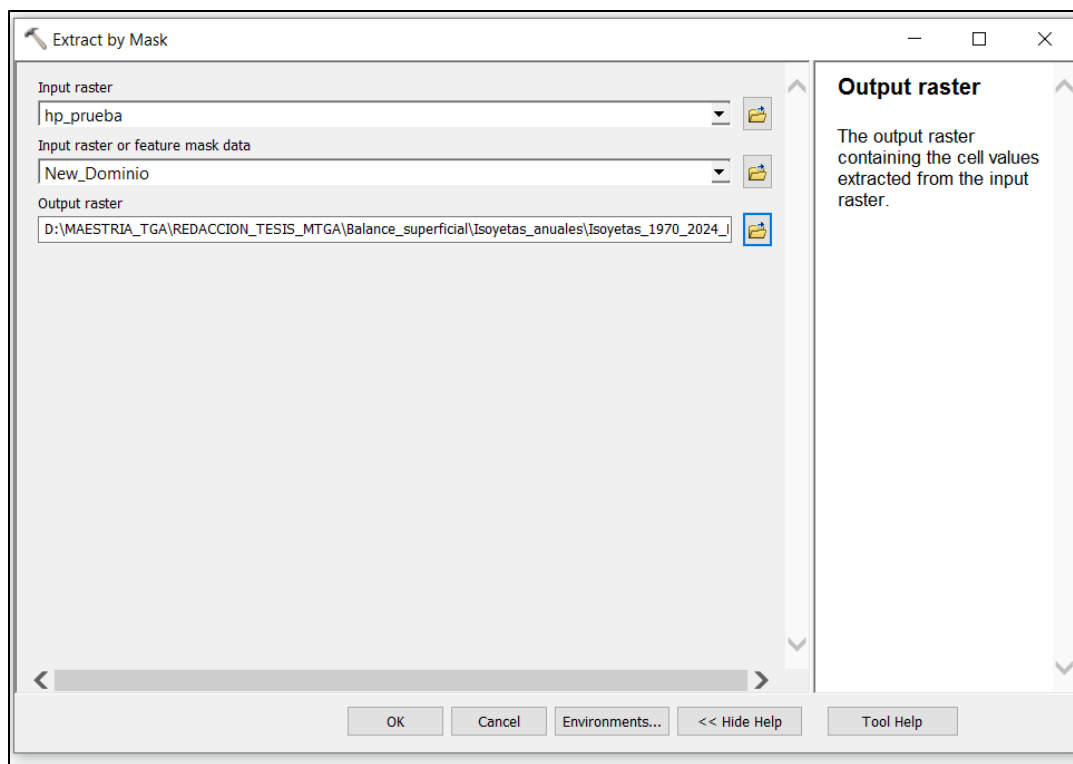
Figura 40. Características de interpolación -isoyetas

Con esto se realizó la interpolación de la precipitación, se extendió el tamaño del área de estudio de la imagen obtenida, se dio clic derecho en el nombre de la imagen, luego en propiedades, se abrió la ventana que se muestra en la Figura 41, en la pestaña “extent” se dio clic en “set the extent to” y se eligió el shape del dominio.



*Figura 41. Extensión de la zona interpolada - isoyetas*

Después se exportó el archivo a un formato raster, dando clic derecho y dando clic en “Data-Export to raster”. Después se recortó la imagen según la forma del dominio con el comando “Extract by mask”, y se guardó el archivo tal como se indica en la Figura 42.



*Figura 42. Extracción por mascara del raster - isoyetas*

Se generó una imagen reclasificada según el rango de precipitación en un intervalo de 50 mm, con el comando de “Reclassify”, se anotó (lo cual es recomendable) qué valor de número le corresponde el rango, para realizar la reclasificación se dio clic en “Classify” se abre otra ventana donde se anotaron manualmente los intervalos sin modificar el inicial o el valor final, Figura 43.

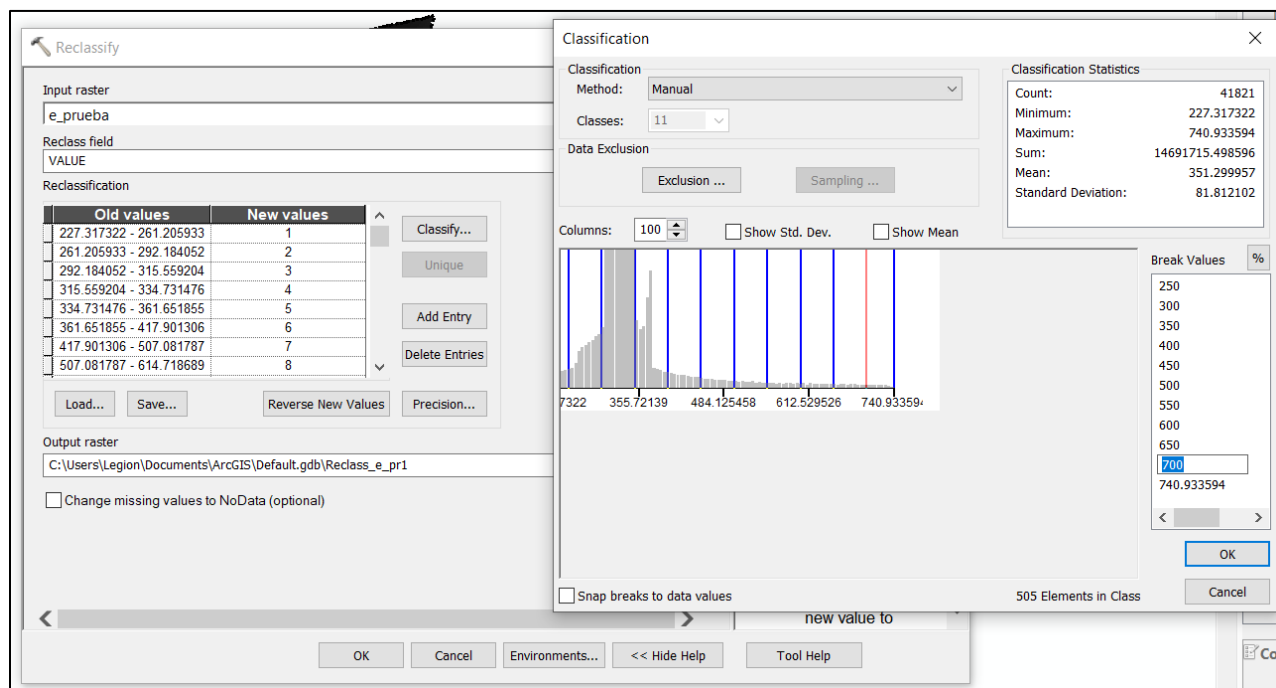


Figura 43. Reclasificación del raster - isoyetas.

Después se convirtió a archivo shape con el comando de “Raster to Polygon”, como se muestra en la Figura 44.

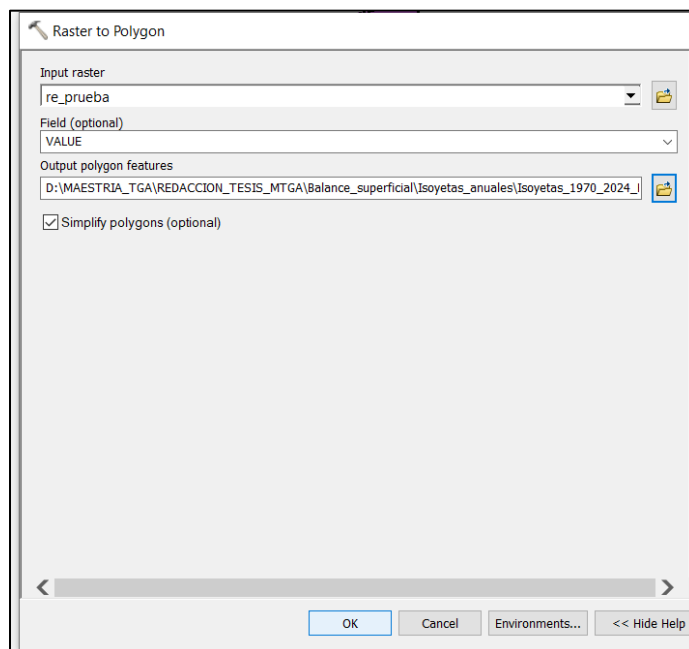


Figura 44. Convertirlo a polígono - isoyetas

Se agregaron dos columnas, una para el área (tipo: Double) y otra para el rango (tipo: Text). El área se calculó dando clic derecho sobre la columna y se dio clic en “Calculate geometry” para calcular el área en km<sup>2</sup>. Para el relleno del rango, se buscó que los valores reclasificados ahora digan qué valores reales tienen, para ello se usó un comando de Python (Figura 45).

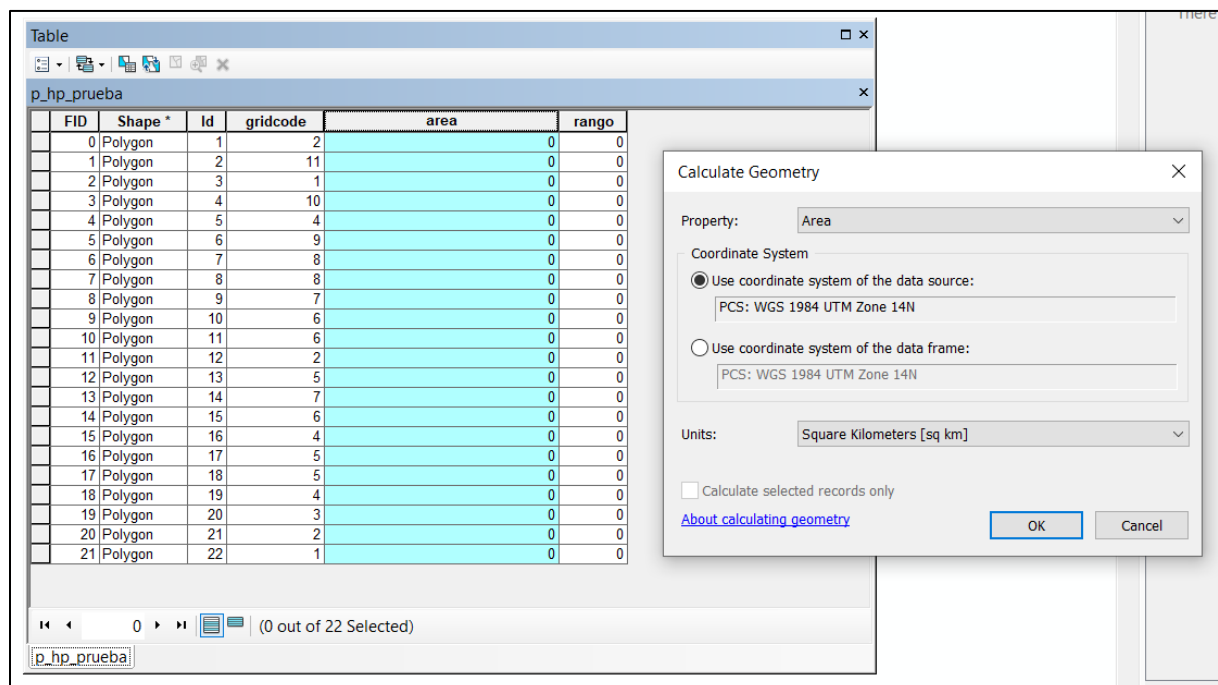


Figura 45. Cálculo de área por rango de valores - isoyetas.

Se dio clic derecho sobre la columna de rango, se eligió “Field calculator” y se abrió una ventana, se dio clic en aceptar y a continuación se abrió otra ventana en “Parser” se eligió “Python”, en “Type – Number”, se marcó la opción de “Show Codeblock” y en el primer recuadro en blanco se colocó el comando escrito en un block de notas, se cuidó que corresponda al rango que tenemos en el shape y en el recuadro de abajo se colocó: Reclasificar (;gridcode!), como se aprecia en la Figura 46.

Field Calculator

Parser

☐ VB Script
☒ Python

Fields:

FID  
Shape  
Id  
gridcode  
area  
rango

Type:

☒ Number  
☐ String  
☐ Date

Functions:

.conjugate()  
.denominator()  
.imag()  
.numerator()  
.real()  
.as\_integer\_ratio()  
.fromhex()  
.hex()  
.is\_integer()  
math.acos()  
math.acosh()  
math.asin()

☒ Show Codeblock

Pre-Logic Script Code:

```
def Reclassificar (rango):
    if rango == 1:
        return "200-250"
    elif rango == 2:
        return "250-300"
    elif rango == 3:
        return "300-350"
```

rango =

Reclasificar( !gridcode! )

[About calculating fields](#)

Clear

Load...

Save...

OK

Cancel

Table

p\_hp\_prueba

| FID | Shape * | Id | gridcode | area        | rango   |
|-----|---------|----|----------|-------------|---------|
| 0   | Polygon | 1  | 2        | 95.011804   | 250-300 |
| 1   | Polygon | 2  | 11       | 19.337551   | 700-750 |
| 2   | Polygon | 3  | 1        | 61.171511   | 200-250 |
| 3   | Polygon | 4  | 10       | 31.051873   | 650-700 |
| 4   | Polygon | 5  | 4        | 1.392024    | 350-400 |
| 5   | Polygon | 6  | 9        | 32.415084   | 600-650 |
| 6   | Polygon | 7  | 8        | 38.620649   | 550-600 |
| 7   | Polygon | 8  | 8        | 0.061498    | 550-600 |
| 8   | Polygon | 9  | 7        | 46.116977   | 500-550 |
| 9   | Polygon | 10 | 6        | 64.373523   | 450-500 |
| 10  | Polygon | 11 | 6        | 0.061498    | 450-500 |
| 11  | Polygon | 12 | 2        | 200.283675  | 250-300 |
| 12  | Polygon | 13 | 5        | 95.815471   | 400-450 |
| 13  | Polygon | 14 | 7        | 2.221203    | 500-550 |
| 14  | Polygon | 15 | 6        | 4.692312    | 450-500 |
| 15  | Polygon | 16 | 4        | 220.345029  | 350-400 |
| 16  | Polygon | 17 | 5        | 7.461856    | 400-450 |
| 17  | Polygon | 18 | 5        | 0.061498    | 400-450 |
| 18  | Polygon | 19 | 4        | 193.542508  | 350-400 |
| 19  | Polygon | 20 | 3        | 1418.967985 | 300-350 |
| 20  | Polygon | 21 | 2        | 33.126544   | 250-300 |
| 21  | Polygon | 22 | 1        | 5.575065    | 200-250 |

Figura 46. Colocación del rango por código de reclasificación - isoyetas.

Se exportó el archivo de texto de esta tabla de atributos y se convirtió a Excel, en este se realizó el cálculo de las isoyetas de precipitación, se realizó el mismo procedimiento para las isoyetas de precipitación y temperatura promedio, se muestran en la Tabla 13 los resultados.

Tabla 13. Precipitación y temperatura media anual de isoyetas de precipitación (1970-2024).

| Año  | PMA (mm/año) | TMA (°C) | Año              | PMA (mm/año) | TMA (°C) |
|------|--------------|----------|------------------|--------------|----------|
| 1970 | 350.68       | 16.92    | 1998             | 361.42       | 19.32    |
| 1971 | 419.71       | 17.68    | 1999             | 283.73       | 18.20    |
| 1972 | 340.55       | 18.49    | 2000             | 228.06       | 17.89    |
| 1973 | 413.44       | 17.61    | 2001             | 310.98       | 18.38    |
| 1974 | 387.81       | 17.37    | 2002             | 453.44       | 18.37    |
| 1975 | 502.99       | 17.45    | 2003             | 372.16       | 18.39    |
| 1976 | 638.04       | 16.90    | 2004             | 540.62       | 17.79    |
| 1977 | 348.82       | 17.71    | 2005             | 291.17       | 18.11    |
| 1978 | 467.85       | 17.41    | 2006             | 418.64       | 18.12    |
| 1979 | 413.67       | 17.43    | 2007             | 496.16       | 17.57    |
| 1980 | 289.87       | 17.69    | 2008             | 413.97       | 17.59    |
| 1981 | 446.37       | 17.29    | 2009             | 382.20       | 18.30    |
| 1982 | 294.35       | 18.14    | 2010             | 473.10       | 17.99    |
| 1983 | 461.23       | 18.91    | 2011             | 266.08       | 19.12    |
| 1984 | 410.19       | 17.10    | 2012             | 297.80       | 18.61    |
| 1985 | 445.60       | 17.17    | 2013             | 555.65       | 18.94    |
| 1986 | 386.15       | 17.37    | 2014             | 418.26       | 18.36    |
| 1987 | 320.75       | 17.18    | 2015             | 643.37       | 17.64    |
| 1988 | 390.24       | 17.31    | 2016             | 461.62       | 17.69    |
| 1989 | 231.77       | 17.91    | 2017             | 433.04       | 18.35    |
| 1990 | 290.10       | 17.69    | 2018             | 589.94       | 18.79    |
| 1991 | 503.44       | 17.37    | 2019             | 337.10       | 18.63    |
| 1992 | 443.72       | 16.96    | 2020             | 306.14       | 18.63    |
| 1993 | 406.60       | 17.54    | 2021             | 483.03       | 18.63    |
| 1994 | 411.71       | 18.07    | 2022             | 333.62       | 18.63    |
| 1995 | 359.51       | 18.19    | 2023             | 405.57       | 18.63    |
| 1996 | 359.41       | 17.69    | 2024             | 447.75       | 18.63    |
| 1997 | 444.84       | 17.93    | Hp promedio(mm): | 403.35       | 17.96    |

También se presentan en la Figura 47, el mapa de las isoyetas de precipitación del año 2015, como ejemplo de la precipitación total media anual más alta y en la Figura 48, se presentan las isoyetas con menor precipitación total media anual en el periodo de 1970-2024.

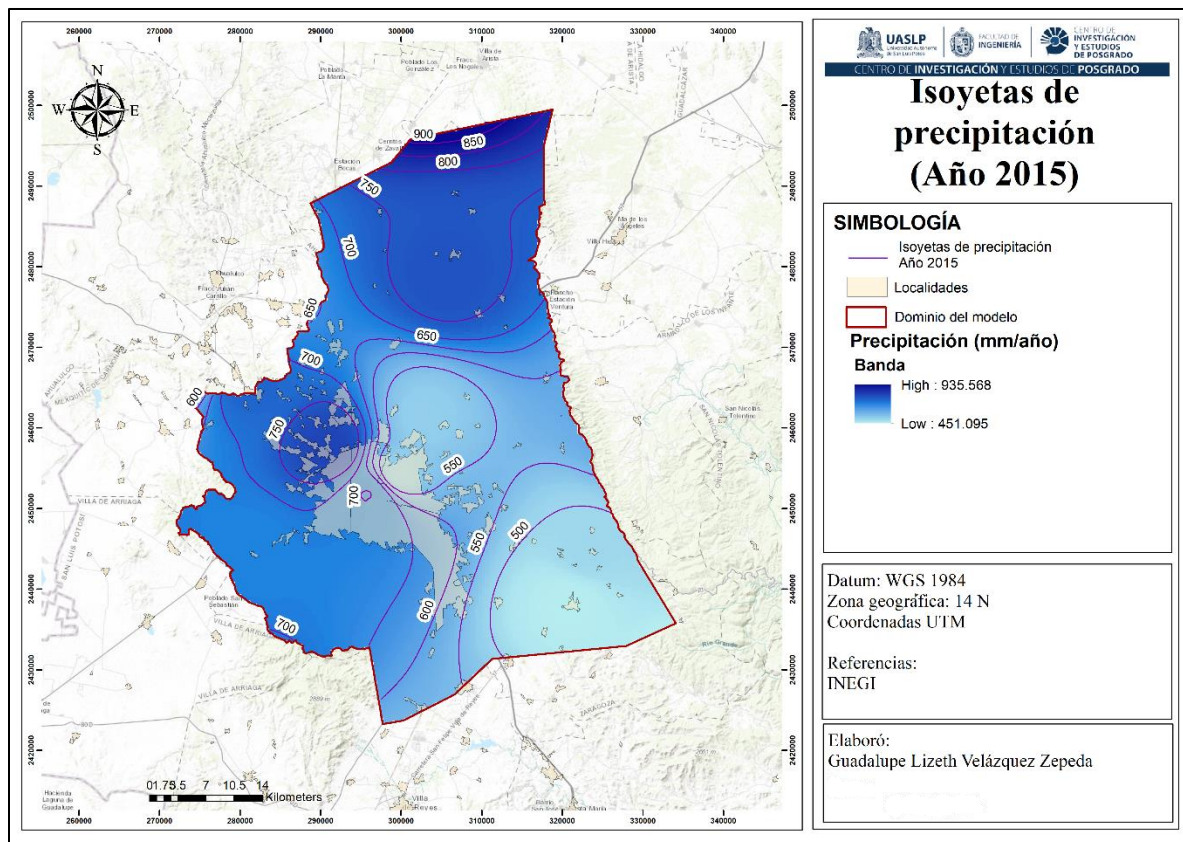


Figura 47. Isoyetas de precipitación del año 2015.

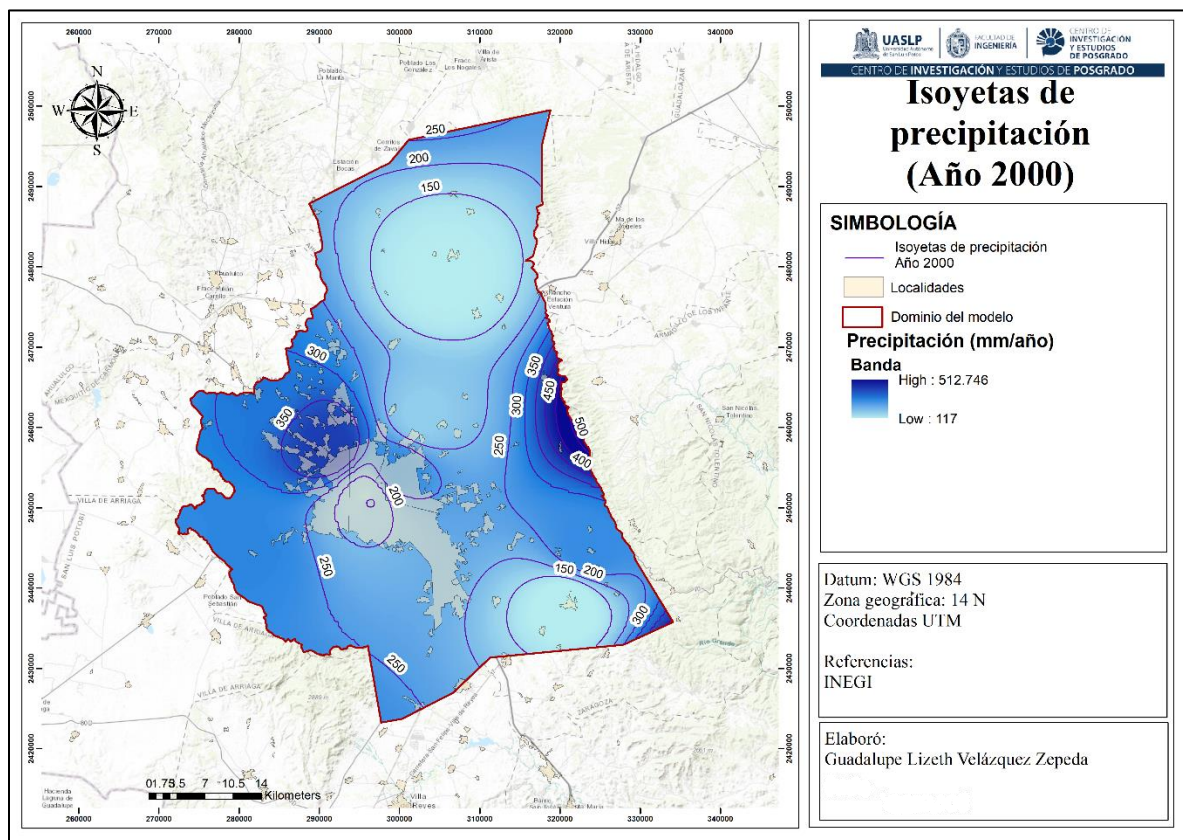


Figura 48. Isoyetas de precipitación del año 2000.

### II.3.3 Escurrimiento

Aparicio Mijares (1992) define el escurrimiento como el agua proveniente de la precipitación que, una vez que alcanza la superficie del suelo, se infiltra hasta que las capas superiores del mismo se saturan; posteriormente, se comienza a escurrir sobre la superficie. circula sobre el bajo la superficie del terreno y llega a un cauce para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

De acuerdo con Domínguez Mora et al. (2008), el método de número de curva del Soil Conservation Service (SCS-CN) se basa en la ecuación de balance hídrico y en dos hipótesis fundamentales. La primera hipótesis establece que la razón entre el volumen de escurrimiento directo y el escurrimiento potencial máximo es igual a la razón entre la infiltración real y la infiltración potencial máxima. La segunda hipótesis establece que la infiltración inicial de la retención potencial. La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son, respectivamente:

$$P = Pe + Ia + Fa$$

$$\frac{Pe}{P - Ia} = \frac{Fa}{S}$$

Donde

P: precipitación total

I<sub>a</sub>: infiltración inicial

F<sub>a</sub>: infiltración acumulada

Pe: precipitación efectiva

S: infiltración potencial máxima

Siendo  $I_a = 0.2S$ , por lo tanto, se obtiene:

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32}$$

Donde:

Pe: Precipitación efectiva (cm)

P: precipitación total (cm)

CN: número de curva determinado a partir del uso y tipo de suelo.

Los hidrólogos del Soil Conservation Service (SCS) propusieron un método para estimación de la lluvia en exceso (Pe) ocasionada por una tormenta, el que se basa en el parámetro N que describe numéricamente una combinación específica de tipo y uso del suelo (Campos Aranda, 2010).

Para la caracterización espacial del suelo, se utilizó el programa de *ArcMap 10.5*, se ha utilizado la información vectorial de las capas cartográficas “Edafología escala 1:1,000,000” y “Uso de suelo y vegetación escala 1:250,000” (Figuras 17 Figura 19).

Se les asignó un valor numérico de 100 a 400 para la clasificación hidrológica de suelo (Tabla 14), para la carta de edafología y valores de 1 – 41 para el número de curva según el uso de suelo (Tabla 15). Se abrió la tabla de atributos de edafología, se agregó una columna para la clase y se rellenó con el valor numérico correspondiente y así se hizo para el shape de uso de suelo.

Posteriormente, se convirtieron los archivos shapes a raster con el comando “polygon to raster”, se realizó la suma de ambos con el comando “Map Algebra – Raster Calculator”, se eligieron los archivos raster y se sumaron, como se muestra en la Figura 49.

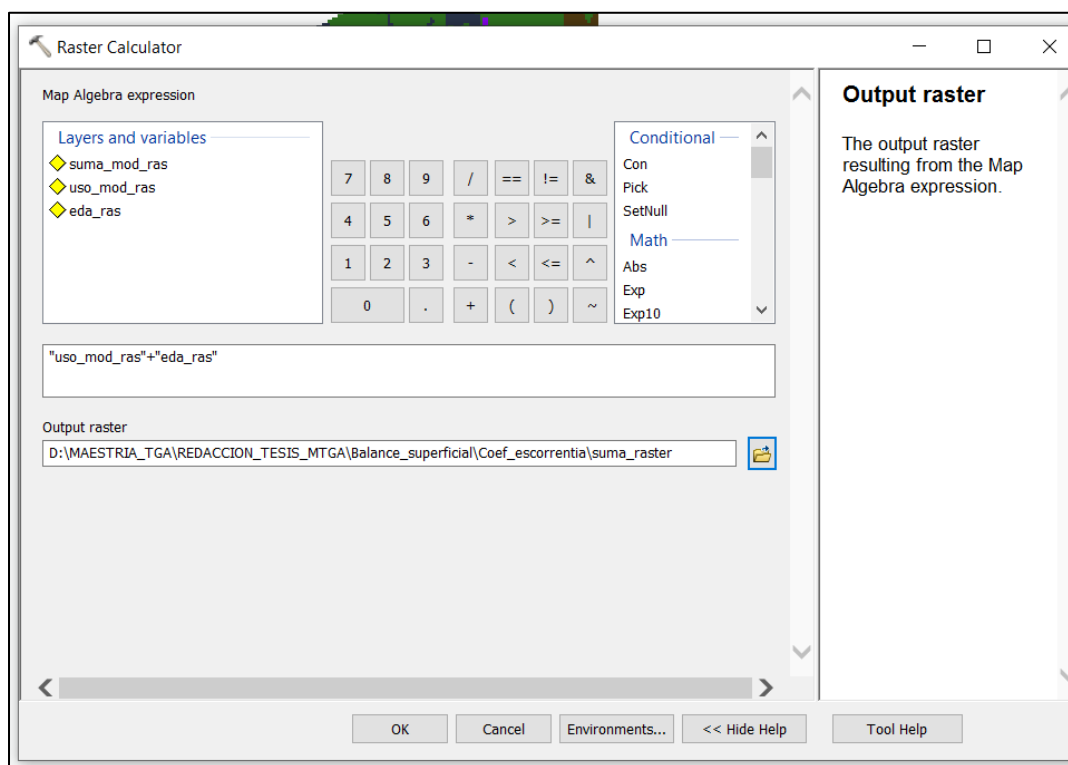


Figura 49. Cálculo de raster

Este archivo resultante se convirtió a polígono con el comando “Raster to polygon”, en la Figura 50 se aprecia la ventana de *ArcMap 10.5*.

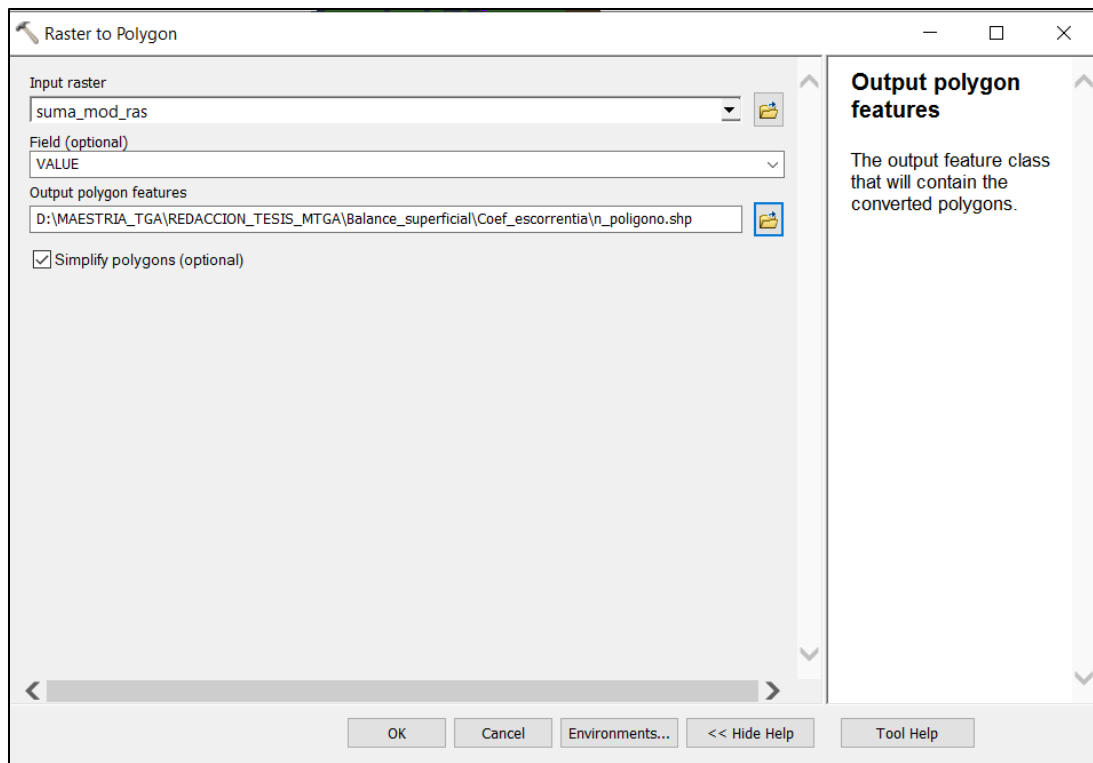


Figura 50. Raster a polígono.

En la tabla de atributos de este archivo se agregaron otras columnas, una con el nombre de N, y otra de área. Se calculó el valor del área y se colocó en edición el archivo, se agregó el valor de N según correspondía, como se muestra en la Figura 51.

| Table      |     |         |     |          |    |            |
|------------|-----|---------|-----|----------|----|------------|
| n_suma_mod |     |         |     |          |    |            |
|            | FID | Shape * | Id  | gridcode | N  | area       |
|            | 27  | Polygon | 28  | 225      | 58 | 3.745978   |
|            | 30  | Polygon | 31  | 225      | 58 | 0.042791   |
|            | 107 | Polygon | 108 | 225      | 58 | 0.5625     |
|            | 131 | Polygon | 132 | 225      | 58 | 0.54126    |
|            | 145 | Polygon | 146 | 225      | 58 | 1.288244   |
|            | 154 | Polygon | 155 | 225      | 58 | 0.642626   |
|            | 160 | Polygon | 161 | 225      | 58 | 0.125      |
|            | 163 | Polygon | 164 | 225      | 58 | 0.0625     |
|            | 164 | Polygon | 165 | 225      | 58 | 358.333691 |
|            | 165 | Polygon | 166 | 225      | 58 | 0.0625     |
|            | 214 | Polygon | 215 | 225      | 58 | 1.900886   |
|            | 226 | Polygon | 227 | 225      | 58 | 4.319974   |
|            | 262 | Polygon | 263 | 225      | 58 | 36.7559    |
|            | 263 | Polygon | 264 | 225      | 58 | 2.107678   |
|            | 319 | Polygon | 320 | 225      | 58 | 0.0625     |
|            | 321 | Polygon | 322 | 225      | 58 | 8.504569   |
|            | 348 | Polygon | 349 | 225      | 58 | 0.0625     |
|            | 594 | Polygon | 595 | 225      | 58 | 25.612021  |
|            | 596 | Polygon | 597 | 225      | 58 | 0.125      |

Figura 51. Valores de N

Tabla 14. Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad. Fuente: Domínguez Mora et al., 2008. Modificada: Velázquez, 2025.

| Clave de la clasificación FAO | Suelos                                    | Tipo hidrológico de suelo | Permeabilidad | Propiedades                                                                                                      |
|-------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T                             | Andosoles                                 | <b>A</b>                  | Muy alta      | Arenas con poco limo y arcilla (escurrimiento mínimo)                                                            |
| Q                             | Arenosoles                                |                           |               |                                                                                                                  |
| J                             | Fluviosoles                               |                           |               |                                                                                                                  |
| O                             | Histosoles                                |                           |               |                                                                                                                  |
| U                             | Ranker                                    |                           |               |                                                                                                                  |
| X, Y                          | Calcisoles (antes xerosol y yermosol)     | <b>B</b>                  | Buena         | Arenas finas y limos                                                                                             |
| I, E                          | Leptosoles (antes litosoles y rendizinas) |                           |               |                                                                                                                  |
| Z                             | Solonchaks                                |                           |               |                                                                                                                  |
| D                             | Podzoles                                  |                           |               |                                                                                                                  |
| F                             | Ferralsoles                               |                           |               |                                                                                                                  |
| R                             | Regosoles                                 |                           |               |                                                                                                                  |
| H                             | Feozems                                   | <b>C</b>                  | Media         | Arenas muy finas, limos y bastante arcilla                                                                       |
| K                             | Kastanozems                               |                           |               |                                                                                                                  |
| N                             | Nitosoles                                 |                           |               |                                                                                                                  |
| C                             | Chernozems                                |                           |               |                                                                                                                  |
| -                             | Alisoles                                  | <b>D</b>                  | Baja          | Arcillas en grandes cantidades, suelos poco profundos con subhorizontes casi impermeables (escurrimiento máximo) |
| A                             | Acrisoles                                 |                           |               |                                                                                                                  |
| B                             | Cambisoles                                |                           |               |                                                                                                                  |
| G                             | Gleysoles                                 |                           |               |                                                                                                                  |
| L                             | Luviosoles                                |                           |               |                                                                                                                  |
| V                             | Vertisoles                                |                           |               |                                                                                                                  |
| W                             | Planosoles                                |                           |               |                                                                                                                  |
| S                             | Solonetz                                  |                           |               |                                                                                                                  |
| D                             | Podzoluviosoles                           |                           |               |                                                                                                                  |
| -                             | Plintosoles                               |                           |               |                                                                                                                  |
| -                             | Lixisoles                                 |                           |               |                                                                                                                  |

Tabla 15. Número de curva según la cobertura del suelo. Fuente: Domínguez Mora et al., 2008. Modificada: Velázquez, 2025.

| Uso de suelo y vegetación (INEGI)                                                                                                             |                                                                    | Grupo hidrológico |     |     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------|-----|-----|-----|
|                                                                                                                                               |                                                                    | A                 | B   | C   | D   |
| Agricultura (de humedad, de riego, de temporal)                                                                                               | Condición hidrológica mala                                         | 72                | 81  | 88  | 91  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica regular                                      | 67                | 76  | 83  | 86  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica buena                                        | 62                | 71  | 78  | 81  |
| Área sin vegetación aparente                                                                                                                  |                                                                    | 77                | 86  | 91  | 94  |
| Asentamiento humano                                                                                                                           | Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. | 82                | 88  | 91  | 93  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica regular                                      | 49                | 69  | 79  | 84  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica buena                                        | 39                | 61  | 74  | 80  |
|                                                                                                                                               | Residencial 50% ó más área impermeable                             | 77                | 85  | 90  | 92  |
|                                                                                                                                               | Residencial 50% ó menos área impermeable                           | 61                | 75  | 83  | 87  |
|                                                                                                                                               | Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)                   | 89                | 92  | 94  | 95  |
|                                                                                                                                               | Districtos industriales (72% impermeables)                         | 81                | 88  | 91  | 93  |
|                                                                                                                                               | Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc.                   | 98                | 98  | 98  | 98  |
|                                                                                                                                               | Calles y carreteras (Pavimentados con cunetas y alcantarillas)     | 98                | 98  | 98  | 98  |
|                                                                                                                                               | Calles y carreteras de grava                                       | 76                | 85  | 89  | 91  |
|                                                                                                                                               | Calles y carreteras de tierra                                      | 72                | 82  | 87  | 89  |
| Bosque (cultivado, de encino, encino-pino, oyamel, pino, tascate, mesófilo de montaña)                                                        | Condición hidrológica mala                                         | 45                | 66  | 77  | 83  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica regular                                      | 36                | 60  | 73  | 79  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica buena                                        | 25                | 55  | 70  | 77  |
| Cardonal                                                                                                                                      |                                                                    | 54                | 71  | 80  | 89  |
| Chaparral (arbustos)                                                                                                                          |                                                                    | 20                | 48  | 65  | 73  |
| Cuerpo de agua                                                                                                                                |                                                                    | 100               | 100 | 100 | 100 |
| Erosión                                                                                                                                       |                                                                    | 68                | 79  | 86  | 89  |
| Manglar                                                                                                                                       |                                                                    | 100               | 100 | 100 | 100 |
| Matorral (con izotes, con rosetófilos acaules, crasicaule, desertico microfilo, desertico rosetofo, espinoso, inerme, subinerme, subtropical) | Condición hidrológica mala                                         | 48                | 67  | 77  | 83  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica regular                                      | 34                | 58  | 71  | 78  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica buena                                        | 20                | 48  | 65  | 73  |
| Mezquital                                                                                                                                     |                                                                    | 68                | 79  | 86  | 92  |
| Nopalera                                                                                                                                      |                                                                    | 39                | 61  | 74  | 84  |
| Palmar                                                                                                                                        |                                                                    | 45                | 66  | 77  | 83  |
| Pastizal (cultivado, halófilo, inducido, natural, natural huizachal)                                                                          | Condición hidrológica mala                                         | 68                | 79  | 86  | 89  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica regular                                      | 49                | 69  | 79  | 84  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica buena                                        | 39                | 61  | 74  | 80  |
| Plantación forestal                                                                                                                           | Condición hidrológica mala                                         | 55                | 73  | 82  | 86  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica regular                                      | 44                | 65  | 76  | 82  |
|                                                                                                                                               | Condición hidrológica buena                                        | 32                | 58  | 72  | 79  |
| Pradera de alta montaña                                                                                                                       |                                                                    | 30                | 58  | 71  | 78  |
| Sabana                                                                                                                                        |                                                                    | 45                | 66  | 77  | 83  |
| Selva (baja caducifolia, baja caducifolia y subcaducifolia, baja espinosa, mediana subcaducifolia)                                            |                                                                    | 45                | 66  | 77  | 83  |
| Tular                                                                                                                                         |                                                                    | 68                | 79  | 86  | 92  |
| Vegetación halófila                                                                                                                           |                                                                    | 68                | 79  | 100 | 100 |
| Vegetación secundaria                                                                                                                         |                                                                    | 68                | 79  | 86  | 89  |

En la Figura 52, se muestra espacialmente el número de curva de la región de estudio, se ponderó el valor del Número de Curva (NC) resultando igual a 75.05; posteriormente, se usó para el cálculo del escurrimiento por medio de las fórmulas descritas anteriormente.

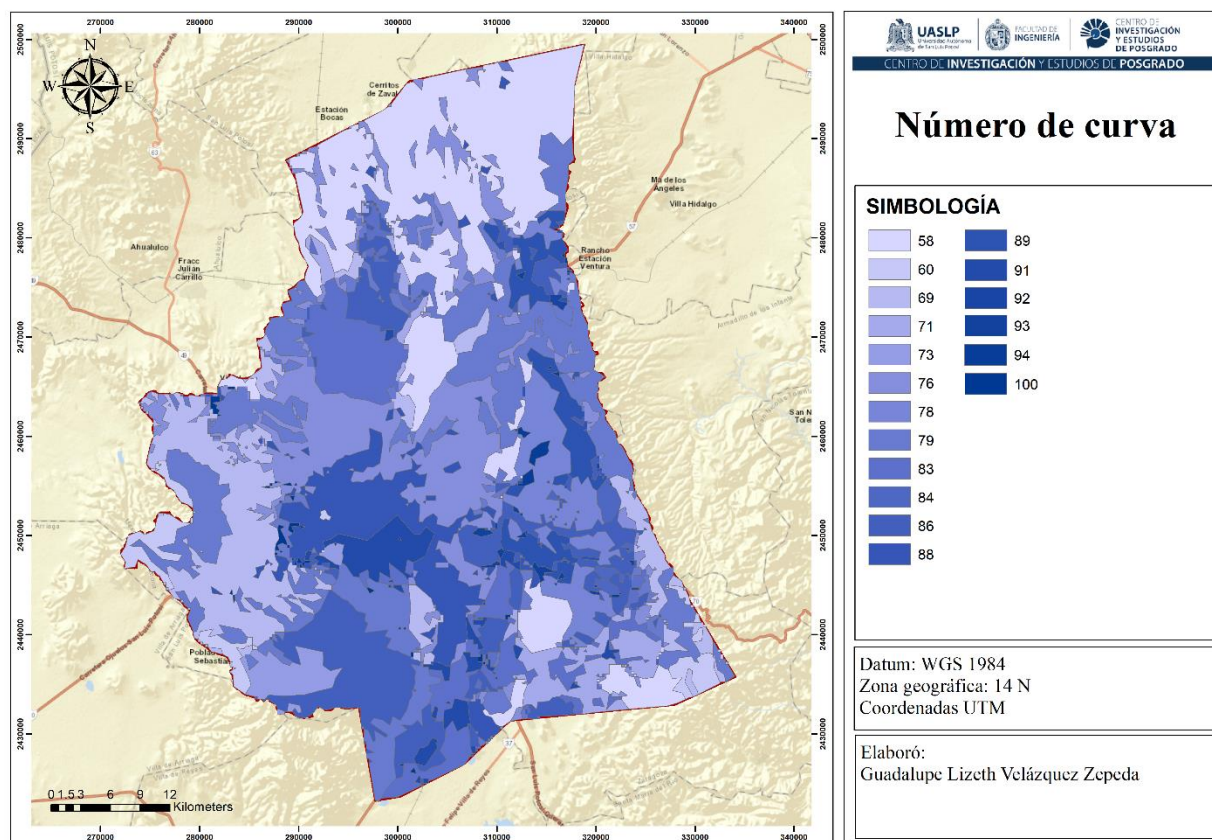


Figura 52. Mapa de número de curva (NC).

En la Tabla 16, se muestran los resultados de la precipitación efectiva (Pe) para el periodo de 1970 a 2024, en promedio, el 78.8 % de la precipitación escurre en la región de estudio.

*Tabla 16. Resultados de la precipitación efectiva (Pe), el coeficiente de escurrimiento (Ce) y la escorrentía (E), periodo 1970-2024.*

| <b>Año</b> | <b>P (cm/año)</b> | <b>CN</b> | <b>Pe (cm/año)</b> | <b>Pe (mm/año)</b> | <b>Ce</b> | <b>E (mm/año)</b> |
|------------|-------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----------|-------------------|
| 1970       | 35.07             | 75.05     | 26.64              | 266.39             | 0.76      | 266.39            |
| 1971       | 41.97             | 75.05     | 33.30              | 333.01             | 0.79      | 333.01            |
| 1972       | 34.05             | 75.05     | 25.67              | 256.68             | 0.75      | 256.68            |
| 1973       | 41.34             | 75.05     | 32.69              | 326.93             | 0.79      | 326.93            |
| 1974       | 38.78             | 75.05     | 30.21              | 302.13             | 0.78      | 302.13            |
| 1975       | 50.30             | 75.05     | 41.42              | 414.15             | 0.82      | 414.15            |
| 1976       | 63.80             | 75.05     | 54.68              | 546.81             | 0.86      | 546.81            |
| 1977       | 34.88             | 75.05     | 26.46              | 264.62             | 0.76      | 264.62            |
| 1978       | 46.78             | 75.05     | 37.98              | 379.83             | 0.81      | 379.83            |
| 1979       | 41.37             | 75.05     | 32.72              | 327.16             | 0.79      | 327.16            |
| 1980       | 28.99             | 75.05     | 20.85              | 208.49             | 0.72      | 208.49            |
| 1981       | 44.64             | 75.05     | 35.89              | 358.91             | 0.80      | 358.91            |
| 1982       | 29.43             | 75.05     | 21.27              | 212.72             | 0.72      | 212.72            |
| 1983       | 46.12             | 75.05     | 37.34              | 373.38             | 0.81      | 373.38            |
| 1984       | 41.02             | 75.05     | 32.38              | 323.78             | 0.79      | 323.78            |
| 1985       | 44.56             | 75.05     | 35.82              | 358.16             | 0.80      | 358.16            |
| 1986       | 38.62             | 75.05     | 30.05              | 300.53             | 0.78      | 300.53            |
| 1987       | 32.07             | 75.05     | 23.78              | 237.78             | 0.74      | 237.78            |
| 1988       | 39.02             | 75.05     | 30.45              | 304.48             | 0.78      | 304.48            |
| 1989       | 23.18             | 75.05     | 15.43              | 154.25             | 0.67      | 154.25            |
| 1990       | 29.01             | 75.05     | 20.87              | 208.70             | 0.72      | 208.70            |
| 1991       | 50.34             | 75.05     | 41.46              | 414.59             | 0.82      | 414.59            |
| 1992       | 44.37             | 75.05     | 35.63              | 356.33             | 0.80      | 356.33            |
| 1993       | 40.66             | 75.05     | 32.03              | 320.30             | 0.79      | 320.30            |
| 1994       | 41.17             | 75.05     | 32.53              | 325.25             | 0.79      | 325.25            |
| 1995       | 35.95             | 75.05     | 27.49              | 274.88             | 0.76      | 274.88            |
| 1996       | 35.94             | 75.05     | 27.48              | 274.77             | 0.76      | 274.77            |
| 1997       | 44.48             | 75.05     | 35.74              | 357.42             | 0.80      | 357.42            |
| 1998       | 36.14             | 75.05     | 27.67              | 276.71             | 0.77      | 276.71            |
| 1999       | 28.37             | 75.05     | 20.27              | 202.69             | 0.71      | 202.69            |
| 2000       | 22.81             | 75.05     | 15.08              | 150.85             | 0.66      | 150.85            |
| 2001       | 31.10             | 75.05     | 22.85              | 228.48             | 0.73      | 228.48            |
| 2002       | 45.34             | 75.05     | 36.58              | 365.79             | 0.81      | 365.79            |
| 2003       | 37.22             | 75.05     | 28.70              | 287.04             | 0.77      | 287.04            |
| 2004       | 54.06             | 75.05     | 45.10              | 451.01             | 0.83      | 451.01            |
| 2005       | 29.12             | 75.05     | 20.97              | 209.71             | 0.72      | 209.71            |
| 2006       | 41.86             | 75.05     | 33.20              | 331.97             | 0.79      | 331.97            |
| 2007       | 49.62             | 75.05     | 40.75              | 407.48             | 0.82      | 407.48            |
| 2008       | 41.40             | 75.05     | 32.74              | 327.44             | 0.79      | 327.44            |

| Año         | P (cm/año)    | CN    | Pe<br>(cm/año) | Pe<br>(mm/año) | Ce          | E<br>(mm/año) |
|-------------|---------------|-------|----------------|----------------|-------------|---------------|
| 2009        | 38.22         | 75.05 | 29.67          | 296.72         | 0.78        | 296.72        |
| 2010        | 47.31         | 75.05 | 38.50          | 384.96         | 0.81        | 384.96        |
| 2011        | 26.61         | 75.05 | 18.61          | 186.12         | 0.70        | 186.12        |
| 2012        | 29.78         | 75.05 | 21.60          | 215.99         | 0.73        | 215.99        |
| 2013        | 55.56         | 75.05 | 46.58          | 465.75         | 0.84        | 465.75        |
| 2014        | 41.83         | 75.05 | 33.16          | 331.60         | 0.79        | 331.60        |
| 2015        | 64.34         | 75.05 | 55.21          | 552.07         | 0.86        | 552.07        |
| 2016        | 46.16         | 75.05 | 37.38          | 373.76         | 0.81        | 373.76        |
| 2017        | 43.30         | 75.05 | 34.60          | 345.95         | 0.80        | 345.95        |
| 2018        | 58.99         | 75.05 | 49.94          | 499.45         | 0.85        | 499.45        |
| 2019        | 33.71         | 75.05 | 25.34          | 253.39         | 0.75        | 253.39        |
| 2020        | 30.61         | 75.05 | 22.39          | 223.89         | 0.73        | 223.89        |
| 2021        | 48.30         | 75.05 | 39.46          | 394.64         | 0.82        | 394.64        |
| 2022        | 33.36         | 75.05 | 25.01          | 250.06         | 0.75        | 250.06        |
| 2023        | 40.56         | 75.05 | 31.93          | 319.30         | 0.79        | 319.30        |
| 2024        | 44.78         | 75.05 | 36.03          | 360.26         | 0.80        | 360.26        |
| <b>Prom</b> | <b>349.72</b> |       |                |                | <b>0.78</b> | <b>317.74</b> |

### II.3.4 Evapotranspiración real

Una parte importante del balance hídrico superficial es el cálculo de la evapotranspiración real (ETR), la cual se refiere a la cantidad de agua que efectivamente existe en la zona para evapotranspirarse, también se conoce como déficit de escurrimiento (Campos Aranda, 1998). La ETR depende sólo de la precipitación y la temperatura, a diferencia de la evapotranspiración potencial que considera además el tipo de cultivo y la altura sobre el nivel del mar donde se toma la medida. En este balance se consideró realizar el cálculo con las fórmulas empíricas del Método de Turc y el de Coutagne.

#### II.3.4.1 Método de Turc

Existen diferentes métodos para calcular la evapotranspiración real anual. En este caso se siguió el descrito por Turc, según Campos Aranda (1998). Turc a partir de observaciones realizadas en 254 cuencas de todos los climas del mundo, reporta la esta expresión:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.90 + (P^2/L^2)}}$$

Siendo:

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

Estando ETR y P en milímetros y T en °C.

La limitación de esta fórmula es que para  $P < 0.31L$  daría una evapotranspiración mayor que la precipitación, por ende, en tales casos habrá que considerar que la evapotranspiración es igual a la precipitación.

#### II.3.4.2 Método de Coutagne

Como se describe en el libro Campos Aranda (1998), Coutagne propuso dos fórmulas del tipo II, siguientes:

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Con:

$$\lambda = \frac{1.00}{0.80 + 0.14T}$$

La ecuación se aplica para valores de la precipitación media anual (P) comprendidos entre  $1/8\lambda$  y  $1/2\lambda$ , estando ETR y P en metros y T en °C.

Si P es menor que  $1/8\lambda$  la evapotranspiración es igual a la precipitación, es decir, no existe escurrimiento; si la precipitación p es mayor que  $1/2\lambda$  la evapotranspiración es prácticamente independiente de P y su valor está dado por la ecuación siguiente, ETR en metros y T en °C:

$$ETR = 0.20 + 0.35T$$

Como se aprecia en la Figura 53, debido a que los valores máximos y mínimos de la temperatura no difieren mucho, el valor de la ETR depende de la precipitación, se aprecia que el método de Turc tiene valores más altos de ETR, generando una menor infiltración, considerando la zona geográfica y las condiciones de la geología se consideró que el método que mejor explica la ETR en la región de estudio es el de Turc.

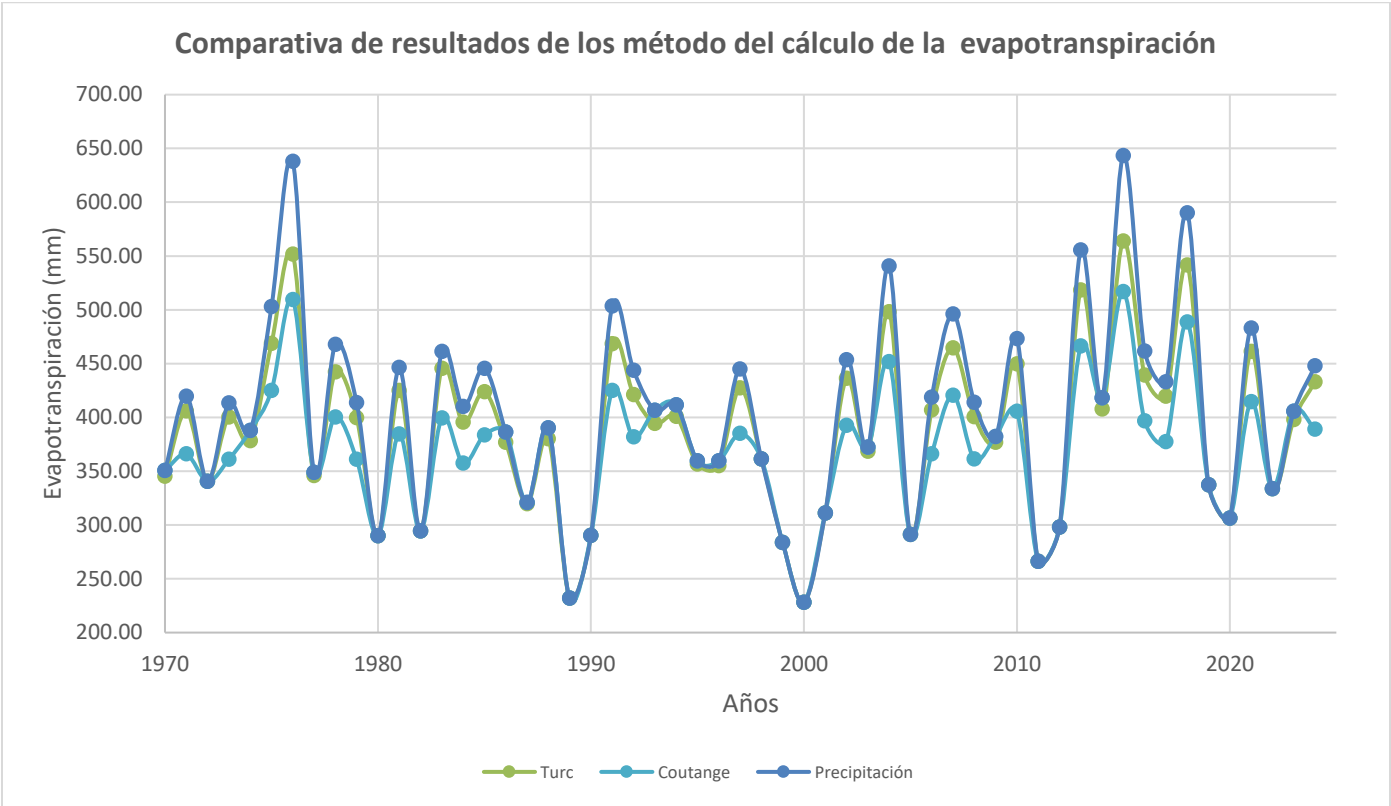


Figura 53. Comparativa de los resultados de los métodos de evapotranspiración (1970-2024).

En la Tabla 17, se muestran los resultados del cálculo de la evapotranspiración anual del periodo 1970 al 2024.

Tabla 17. Cálculo de la evapotranspiración, método de Turc, periodo 1970-2024.

| Año              | P (mm/año)    | T (°C)       | $L=300+25T+0.05T^3$ | $P<0.31L$     | Etr (mm/año)  |
|------------------|---------------|--------------|---------------------|---------------|---------------|
| 1970             | 350.68        | 16.92        | 965.26              | 299.23        | 345.20        |
| 1971             | 419.71        | 17.68        | 1018.58             | 315.76        | 405.79        |
| 1972             | 340.55        | 18.49        | 1078.28             | 334.27        | 340.55        |
| 1973             | 413.44        | 17.61        | 1013.17             | 314.08        | 400.34        |
| 1974             | 387.81        | 17.37        | 996.19              | 308.82        | 378.18        |
| 1975             | 502.99        | 17.45        | 1001.74             | 310.54        | 468.61        |
| 1976             | 638.04        | 16.90        | 964.00              | 298.84        | 551.58        |
| 1977             | 348.82        | 17.71        | 1020.52             | 316.36        | 345.93        |
| 1978             | 467.85        | 17.41        | 999.07              | 309.71        | 442.21        |
| 1979             | 413.67        | 17.43        | 1000.75             | 310.23        | 399.75        |
| 1980             | 289.87        | 17.69        | 1019.37             | 316.00        | 289.87        |
| 1981             | 446.37        | 17.29        | 990.58              | 307.08        | 425.01        |
| 1982             | 294.35        | 18.14        | 1051.89             | 326.09        | 294.35        |
| 1983             | 461.23        | 18.91        | 1110.65             | 344.30        | 445.38        |
| 1984             | 410.19        | 17.10        | 977.47              | 303.01        | 395.42        |
| 1985             | 445.60        | 17.17        | 982.37              | 304.53        | 423.76        |
| 1986             | 386.15        | 17.37        | 996.53              | 308.92        | 376.82        |
| 1987             | 320.75        | 17.18        | 983.30              | 304.82        | 319.73        |
| 1988             | 390.24        | 17.31        | 992.39              | 307.64        | 380.00        |
| 1989             | 231.77        | 17.91        | 1034.71             | 320.76        | 231.77        |
| 1990             | 290.10        | 17.69        | 1019.35             | 316.00        | 290.10        |
| 1991             | 503.44        | 17.37        | 996.38              | 308.88        | 468.38        |
| 1992             | 443.72        | 16.96        | 967.68              | 299.98        | 421.11        |
| 1993             | 406.60        | 17.54        | 1008.44             | 312.62        | 394.45        |
| 1994             | 411.71        | 18.07        | 1046.55             | 324.43        | 400.88        |
| 1995             | 359.51        | 18.19        | 1055.55             | 327.22        | 356.67        |
| 1996             | 359.41        | 17.69        | 1019.17             | 315.94        | 355.11        |
| 1997             | 444.84        | 17.93        | 1036.29             | 321.25        | 427.21        |
| 1998             | 361.42        | 19.32        | 1143.61             | 354.52        | 361.42        |
| 1999             | 283.73        | 18.20        | 1056.80             | 327.61        | 283.73        |
| 2000             | 228.06        | 17.89        | 1033.87             | 320.50        | 228.06        |
| 2001             | 310.98        | 18.38        | 1069.91             | 331.67        | 310.98        |
| 2002             | 453.44        | 18.37        | 1068.86             | 331.35        | 436.33        |
| 2003             | 372.16        | 18.39        | 1070.93             | 331.99        | 368.36        |
| 2004             | 540.62        | 17.79        | 1026.46             | 318.20        | 498.23        |
| 2005             | 291.17        | 18.11        | 1049.43             | 325.32        | 291.17        |
| 2006             | 418.64        | 18.12        | 1050.46             | 325.64        | 406.85        |
| 2007             | 496.16        | 17.57        | 1010.18             | 313.16        | 464.45        |
| 2008             | 413.97        | 17.59        | 1011.86             | 313.68        | 400.69        |
| 2009             | 382.20        | 18.30        | 1063.68             | 329.74        | 376.76        |
| 2010             | 473.10        | 17.99        | 1040.92             | 322.68        | 449.74        |
| 2011             | 266.08        | 19.12        | 1127.82             | 349.62        | 266.08        |
| 2012             | 297.80        | 18.61        | 1087.29             | 337.06        | 297.80        |
| 2013             | 555.65        | 18.94        | 1113.10             | 345.06        | 518.33        |
| 2014             | 418.26        | 18.36        | 1068.52             | 331.24        | 407.55        |
| 2015             | 643.37        | 17.64        | 1015.50             | 314.80        | 563.97        |
| 2016             | 461.62        | 17.69        | 1019.14             | 315.93        | 439.11        |
| 2017             | 433.04        | 18.35        | 1067.88             | 331.04        | 419.73        |
| 2018             | 589.94        | 18.79        | 1101.38             | 341.43        | 541.50        |
| 2019             | 337.10        | 18.63        | 1089.15             | 337.64        | 337.10        |
| 2020             | 306.14        | 18.63        | 1089.11             | 337.63        | 306.14        |
| 2021             | 483.03        | 18.63        | 1089.11             | 337.63        | 461.24        |
| 2022             | 333.62        | 18.63        | 1089.11             | 337.63        | 333.62        |
| 2023             | 405.57        | 18.63        | 1089.11             | 337.63        | 397.95        |
| 2024             | 447.75        | 18.63        | 1089.11             | 337.63        | 433.06        |
| <b>Promedio:</b> | <b>403.35</b> | <b>17.96</b> | <b>1038.66</b>      | <b>321.98</b> | <b>393.48</b> |

### II.3.5 Infiltración

CONAGUA (2020) nos indica que la infiltración puede estimarse a través de un balance de agua superficial para toda la región de estudio del acuífero, aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración} - \text{Esguerrimiento}$$

Dado que en la región de estudio no existen corrientes superficiales de agua permanentes, se considera que los esguerrimientos están inmersos en la evapotranspiración, debido a que la zona presenta un suelo que se satura rápidamente, se considera que el agua que esguerra finalmente termina evapotranspirándose.

Por lo tanto, para el cálculo del volumen de infiltración bastará con restar a la precipitación total el valor de la evapotranspiración, considerando la ecuación anterior, tenemos:

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración}$$

En otras palabras, de la precipitación una parte evapotranspira directamente, la otra parte esguerra, sin embargo, por el clima termina evapotranspirándose finalmente.

$$\text{Evapotranspiración} = \text{ETR directa} + \text{Esguerrimiento}$$

$$\text{Infiltración} = \text{Precipitación} - \text{Esguerrimiento} - \text{ETR directa}$$

Se ha aplicado la formula desde el año 1970 a 2024 y se muestran los resultados en la Tabla 18.

Tabla 18. Cálculo de la infiltración para el periodo de 1970 al 2024.

| Año  | Infiltración<br>(mm/año) | Año  | Infiltración<br>(mm/año) |
|------|--------------------------|------|--------------------------|
| 1970 | 5.48                     | 1998 | 0.00                     |
| 1971 | 13.92                    | 1999 | 0.00                     |
| 1972 | 0.00                     | 2000 | 0.00                     |
| 1973 | 13.10                    | 2001 | 0.00                     |
| 1974 | 9.62                     | 2002 | 17.11                    |
| 1975 | 34.38                    | 2003 | 3.80                     |
| 1976 | 86.46                    | 2004 | 42.39                    |
| 1977 | 2.90                     | 2005 | 0.00                     |
| 1978 | 25.63                    | 2006 | 11.80                    |
| 1979 | 13.92                    | 2007 | 31.72                    |
| 1980 | 0.00                     | 2008 | 13.28                    |
| 1981 | 21.36                    | 2009 | 5.44                     |
| 1982 | 0.00                     | 2010 | 23.36                    |
| 1983 | 15.85                    | 2011 | 0.00                     |
| 1984 | 14.77                    | 2012 | 0.00                     |
| 1985 | 21.84                    | 2013 | 37.32                    |
| 1986 | 9.33                     | 2014 | 10.70                    |
| 1987 | 1.02                     | 2015 | 79.40                    |
| 1988 | 10.24                    | 2016 | 22.51                    |
| 1989 | 0.00                     | 2017 | 13.31                    |
| 1990 | 0.00                     | 2018 | 48.44                    |
| 1991 | 35.06                    | 2019 | 0.00                     |
| 1992 | 22.61                    | 2020 | 0.00                     |
| 1993 | 12.15                    | 2021 | 21.79                    |
| 1994 | 10.83                    | 2022 | 0.00                     |
| 1995 | 2.84                     | 2023 | 7.62                     |
| 1996 | 4.30                     | 2024 | 14.69                    |
| 1997 | 17.64                    |      |                          |

El coeficiente de infiltración resultó de dividir el valor de la infiltración entre la precipitación total, en promedio para el periodo de tiempo analizado este valor resultó del orden de 2.5 %.

### II.3.6 Balance superficial

De acuerdo con el análisis hidrológico realizado en la región, durante el periodo 1970 – 2024, se registró una temperatura media anual de 17.96 °C, una precipitación media anual de 403.35 mm/año. Al estimar la evapotranspiración real fue de 393.48 mm/año, se obtuvo una infiltración de 9.87 mm/año, calculada por el Método de Turc, lo que representa el 2.5 % de la precipitación media anual. En la Figura 54, en el diagrama del balance superficial correspondiente.

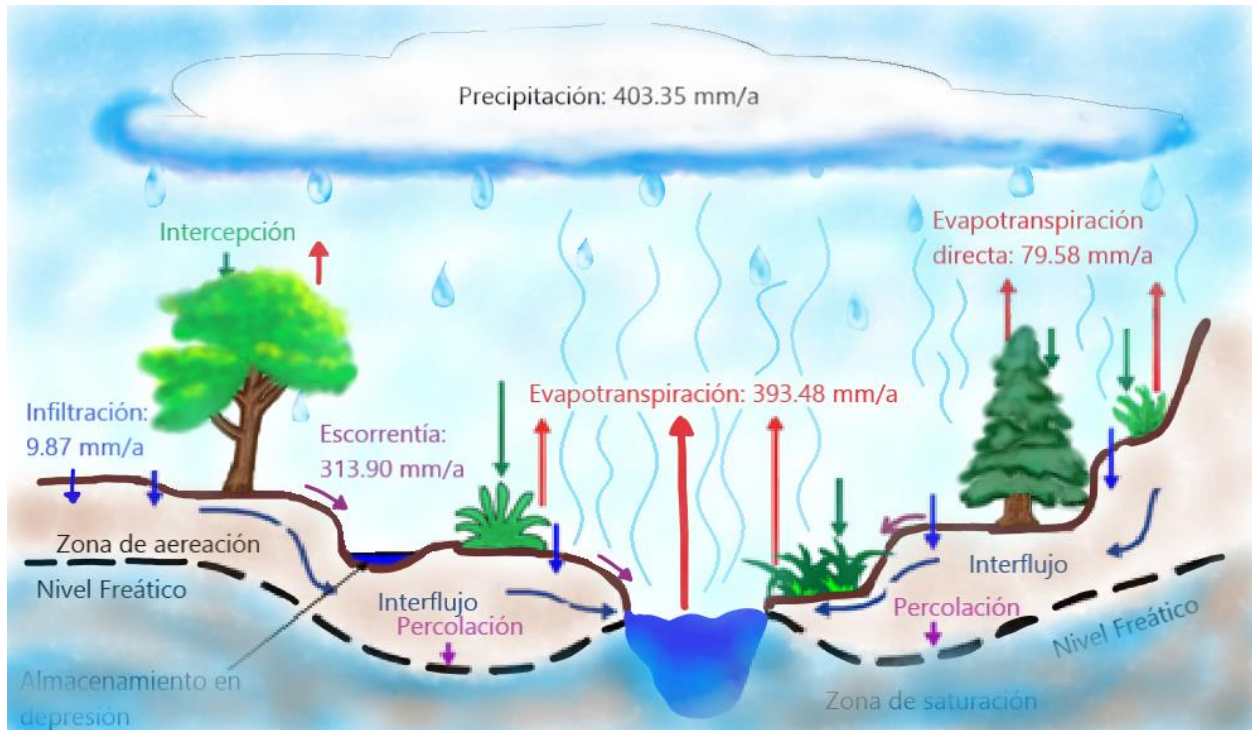


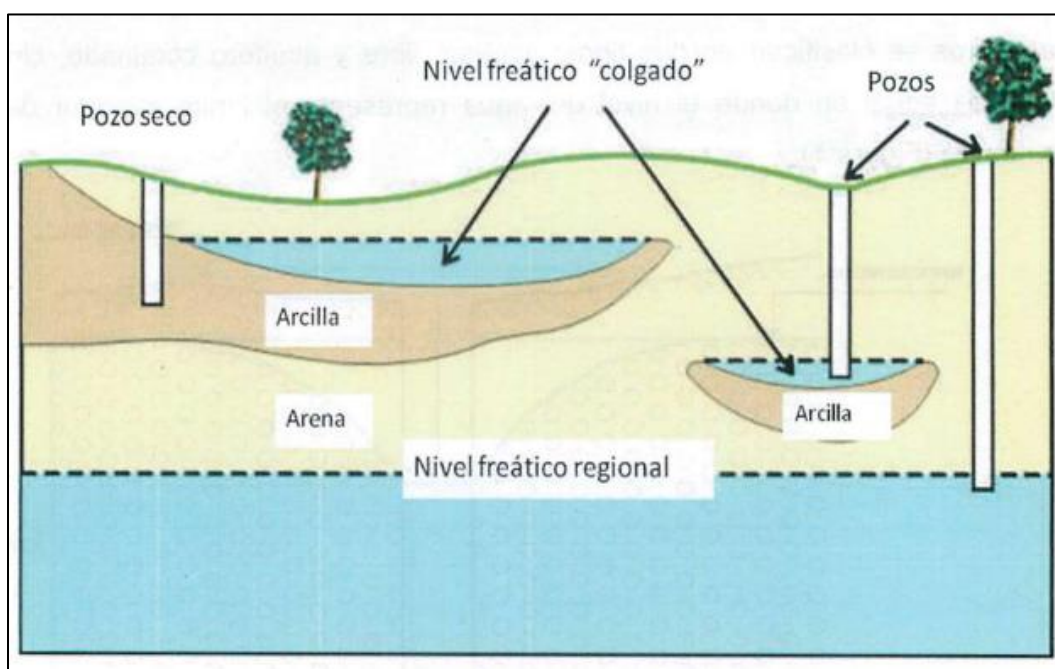
Figura 54. Balance Superficial (1970-2024) en la región de estudio.

## II.4. Hidrogeología

### II.4.1 Medición de los niveles estáticos

La dificultad para estudiar el comportamiento del agua subterránea radica en que ésta se encuentra por debajo de la superficie del terreno y no se puede observar directamente, en comparación con el agua superficial. Bajo esta limitación se puede decir que el agua subterránea “no se puede ver, pero si se puede medir”, y es a partir de los principios hidrológicos que gobiernan su ocurrencia, movimiento y calidad, que se pueden generar predicciones sobre su comportamiento (CONAGUA, 2015).

En ocasiones, el nivel en los acuíferos libres se puede presentar como del “tipo colgado” o regional, Figura 55. El nivel “colgado” es aquel que descansa sobre una capa de baja permeabilidad, la cual, a su vez, se ubica dentro de la zona no saturada. En los acuíferos regionales el agua se desplaza hacia la zona saturada hasta alcanzar el nivel regional del acuífero. La mayor parte del agua subterránea se integra al nivel regional, aunque en algunas ocasiones, se transporte a través de diferentes capas antes de alcanzar este nivel final (CONAGUA, 2015).



*Figura 55. Distribución de niveles "colgados" de agua subterránea con respecto al nivel regional de un acuífero libre. Fuente: CONAGUA, 2015.*

La única forma de medir el nivel en un acuífero es mediante una perforación que permita acceso directo desde la superficie del terreno de agua subterránea. En general, las mediciones del nivel se realizan a través de pozos existentes, excavaciones del terreno que alcancen el nivel del agua y piezómetros construidos exclusivamente para este propósito. La construcción de piezométricos es costosa, y en general debe rendirse a un mínimo indispensable.

Los piezómetros son dispositivos especialmente contruidos para medir la carga hidráulica a una profundidad. La mayoría de las redes de monitoreo están compuestas por pozos, ya que éstos permiten la extracción del agua y determinar su calidad.

Existen diversos dispositivos para registrar la profundidad del nivel del agua subterránea, como se muestra en la Tabla 19.

*Tabla 19. Técnicas de medición del nivel de agua subterránea. Fuente: CONAGUA, 2015.*

| <b>Tipo de medición</b>         | <b>Interferencias / limitaciones</b>                                               |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cinta Métrica Metálica</b>   | Presencia de escurrimiento de agua en el interior del pozo / profundidad del nivel |
| <b>Sonda Eléctrica</b>          | Fallas en el cable / presencia de hidrocarburos en agua                            |
| <b>Transductor “datalogger”</b> | Cambios bruscos de temperatura, deriva electrónica                                 |

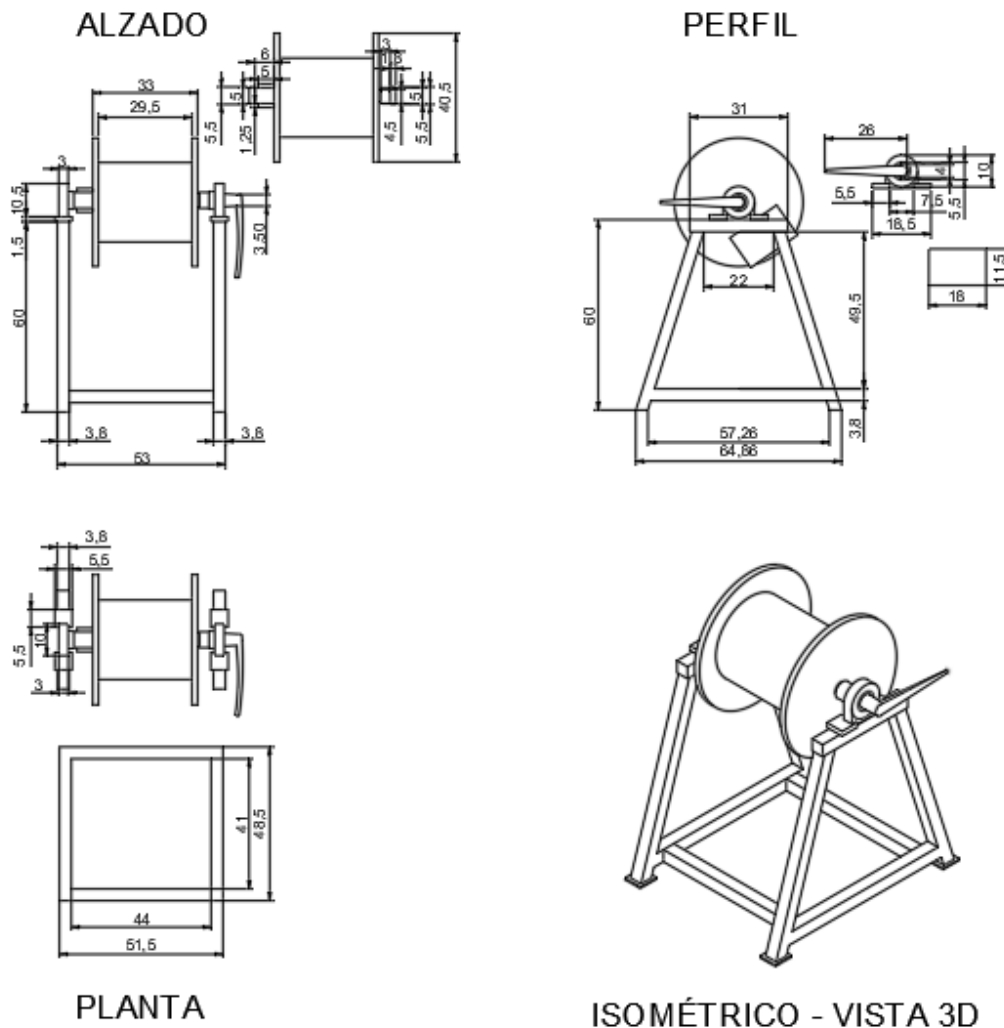
En este proyecto se buscó realizar una actualización intensiva de los niveles estáticos del acuífero de San Luis Potosí, para los niveles someros o en norias era una tarea relativamente sencilla, niveles entre 5 a 30 m, donde se utilizó para su medición una sonda eléctrica convencional.

Sin embargo, los niveles estáticos del acuífero profundo que son lo que se encuentran a profundidades mayores a los 100 m por pequeños orificios por el ademe del pozo es más compleja la medición y con el propósito de realizarlo de la mejor manera se creó una herramienta capaz de sostener y enrollar el cable eléctrico utilizado para la medición, teniendo en cuenta que es una práctica que lleva años realizándose, en la que perder cable es menos costoso que perder un tramo de sonda o tener que pagar grúas para poder desenredarla.

En la Figura 56, se muestra el equipo que se creó basado en ideas de otros tipos de sondas piezométricas.

## DISEÑO DE SONDA PARA MEDIR NIVELES ESTRUCTURA METALICA Y CABLE DE 14 "

DIBUJO: FERNANDA LIZETH BRIANO LOPEZ  
ELABORÓ LA ESTRUCTURA: NOE BRAVO CERDA



*Figura 56. Diseño de sonda para medir niveles.*

En la Figura 57, se muestra la medición con sonda de nivel convencional para pozos (sonda Solinst Modelo 101). En este caso se midió un pozo que ya no produce, el cual se habilitó como pozo de observación y se le colocó una estructura metálica en la parte superior. Esta estructura es circular y tiene tuercas para que se abra con una llave especial garantizando su protección. En proyectos anteriores, se habían instalado divers en estos pozos; sin embargo, no se encontraron todos los pozos de observación.



*Figura 57. Medición de nivel, con sonda de nivel para pozo convencional.*

En la Figura 58, se muestra la medición con la sonda hechiza en su estructura, realizando la medición de un pozo de agua subterránea, donde no se encontró el nivel de agua, porque el mismo pozo presentaba diversos tramos donde se atoraba el cable.



*Figura 58. Medición de nivel, con sonda de nivel creada.*

De los pozos que se pudieron medir, así como las norias se realizaron (Figura 59), donde se ubica cada uno de ellos.

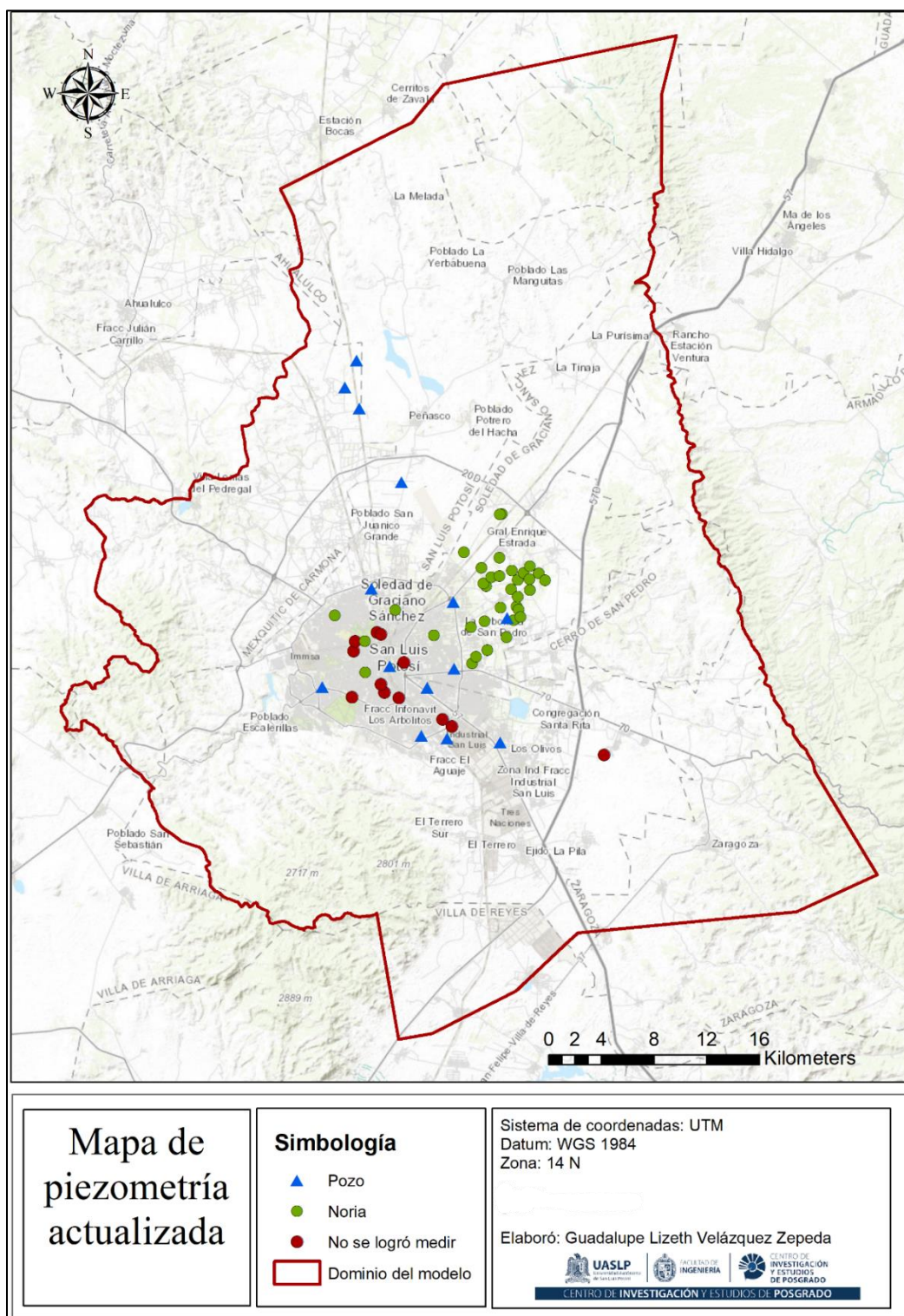


Figura 59. Medición de niveles, piezometría actualizada

## II.4.2 Sistemas de flujo de agua subterránea

### Acuífero somero

Las equipotenciales de nivel estático de agua subterránea de los años 2004 y 2006 evidencian la recarga de agua proveniente de la Sierra de San Miguelito (SSM) hacia el centro de la cuenca, Figura 60.

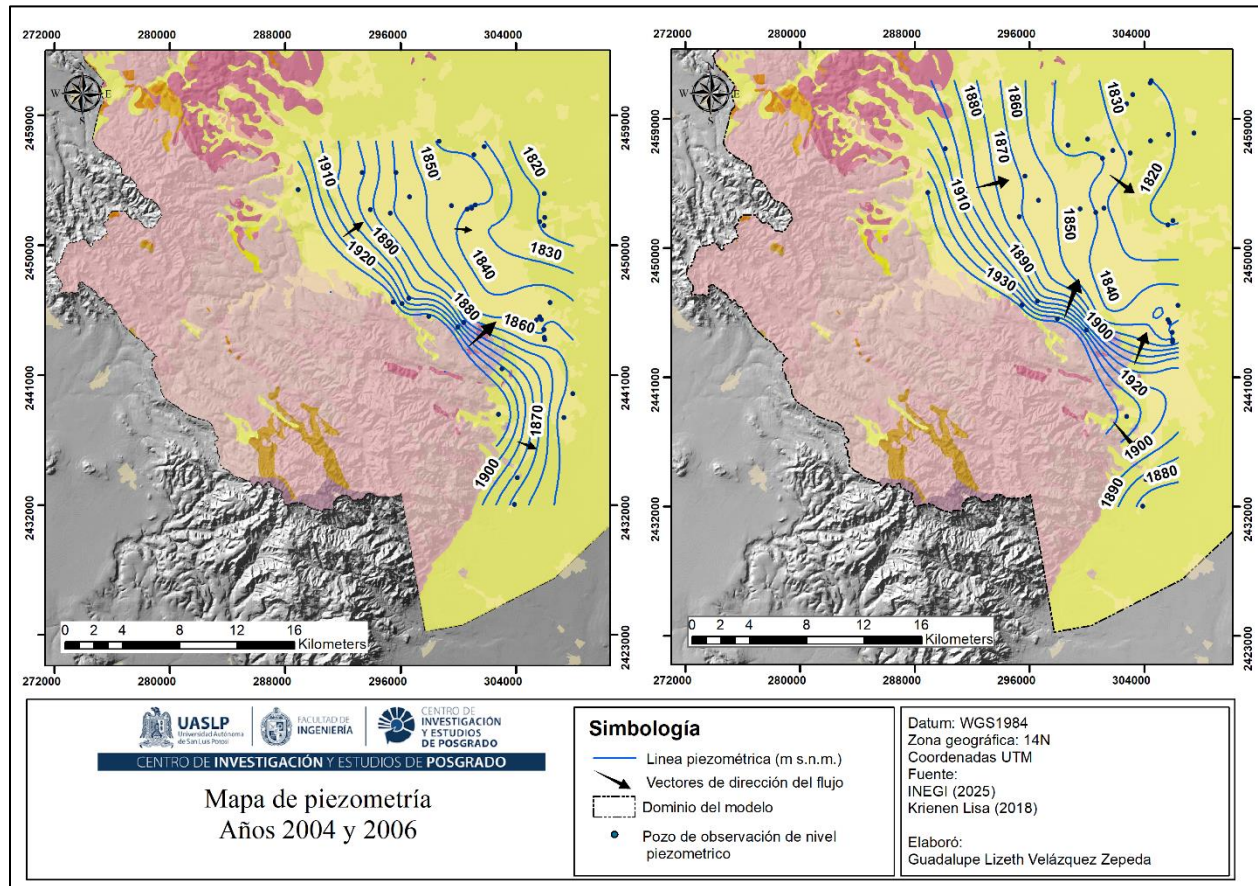


Figura 60. Mapa de piezometría años 2004 y 2006, acuífero somero (Fuente: Krien, 2018; Modificados: Velazquez, 2026) .

Actualización de niveles para el acuífero somero, se muestra en la Figura 61, el mapa de equipotenciales de valores estáticos y dinámicos del nivel de agua subterránea para el año 2024 y 2025; para el año 2024 una parte de los niveles que se encontraron fueron niveles dinámicos, puesto que la bomba de agua se encontraba en funcionamiento. En el caso de los niveles para el año 2025, todos fueron estáticos. Se observa cómo el nivel de agua va en descenso a la parte noroeste del acuífero.

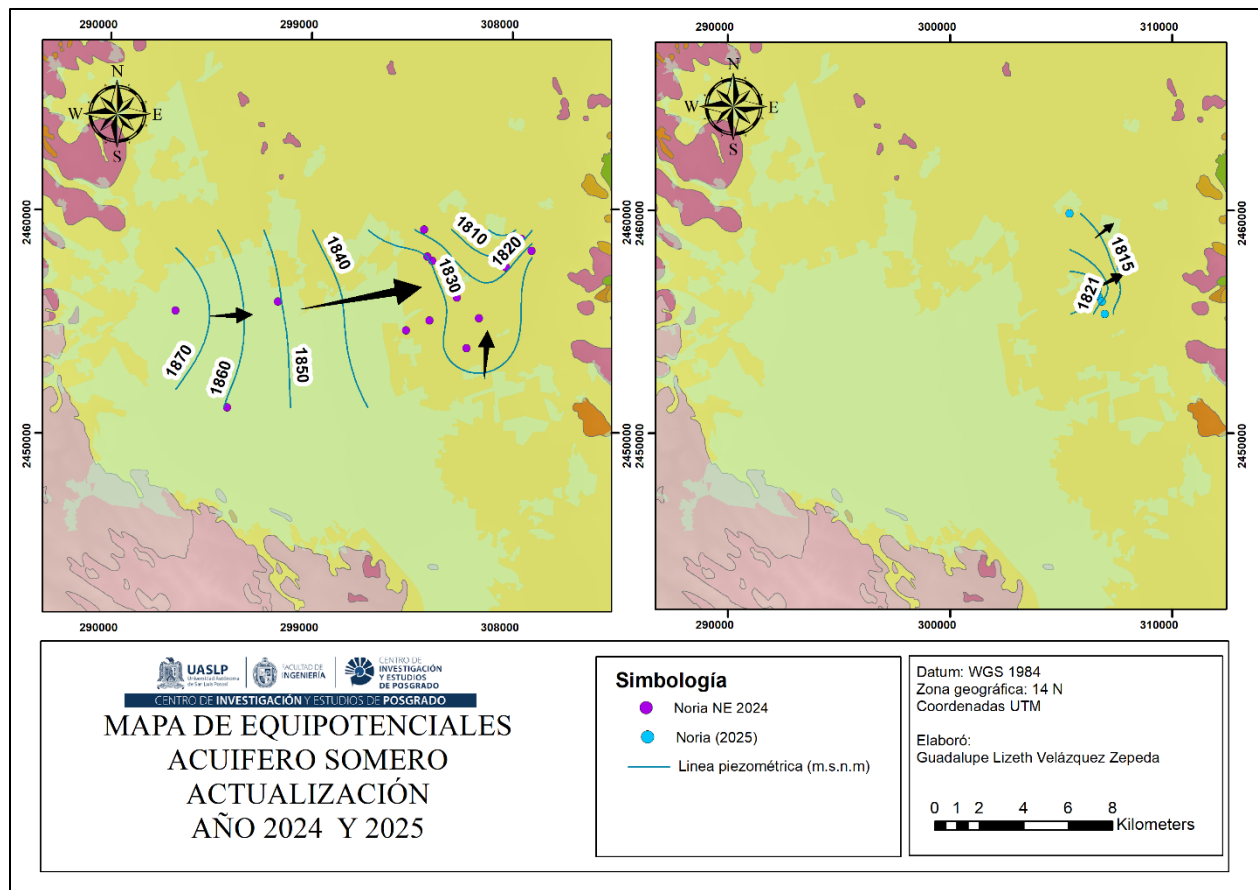


Figura 61. Mapa de actualización de equipotenciales del acuífero somero de los años 2024 y 2025.

### Acuífero profundo

Las características hidrogeológicas del acuífero profundo se representan espacialmente con ayuda de los niveles estáticos de los años 2005 y 2007, los cuales se muestran en la Figura 62, respectivamente. El flujo general está dirigido hacia la extracción de agua debajo de la zona urbana.

El flujo lateral ocurre desde la recarga de la montaña de la SSM en el oeste, que está definida como la principal zona de recarga.

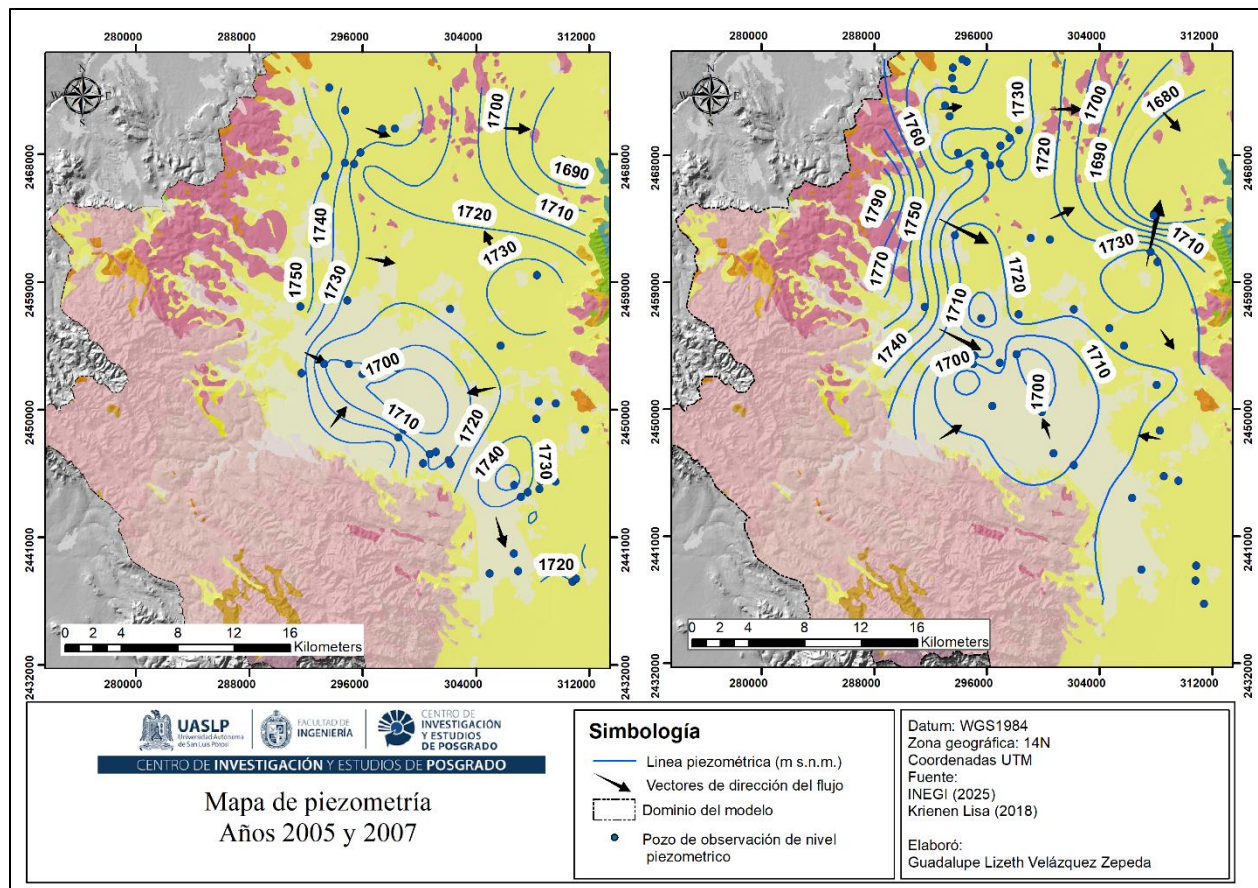


Figura 62. Mapa de piezometría, años 2005 y 2007, acuífero profundo.

Actualización de niveles para el acuífero profundo, la Figura 63, muestra los mapas de equipotenciales de valores estáticos de los años 2024 y 2025. Como se observa para el año 2024 se tomaron los niveles de la parte noroeste de la cuenca, considerando 5 pozos profundos, de los cuales se observan niveles desde los 1739 a 1696.74 m, dando una diferencia de 42.26 m. Para el año 2025, se observan niveles desde los 1723.45 a 1681.83 m, dando una diferencia de 41.62 m.

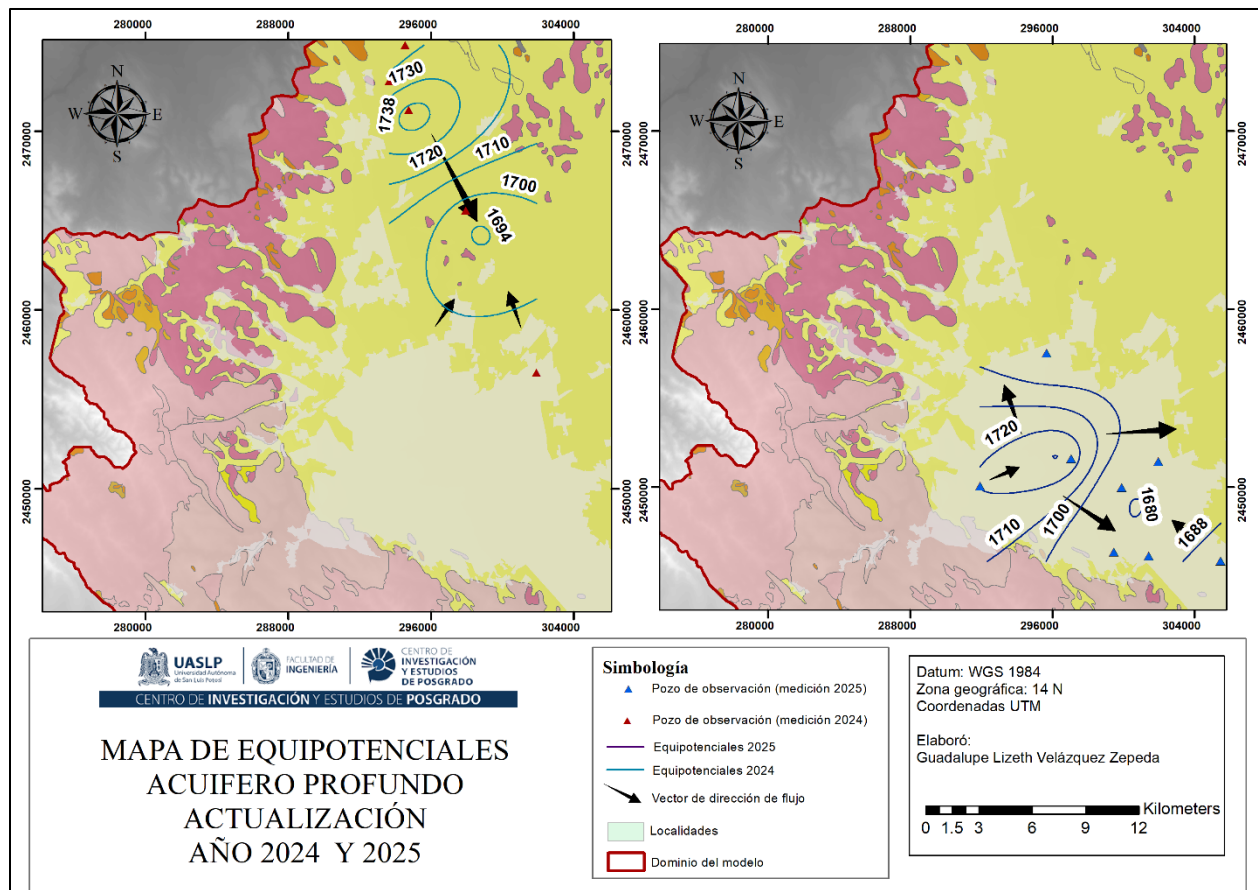


Figura 63. Mapa de equipotenciales actualizados del acuífero profundo año 2024 y 2025.

### II.4.3 Interacción entre el acuífero somero y profundo

Es importante mencionar la interrelación entre ambos acuíferos, se considera como caudal permeable ( $Q_{\text{permeable}}$ ) de acuerdo con Heiming (2016) proveniente de la capa cS y la filtración existente al este y al norte. El cálculo del caudal lo realizó Cardona (2007) donde basado en el cambio del gradiente hidráulico y los valores de conductividad cuantificó un caudal ( $Q_{\text{fuga}}$ ) de **6.3 Hm<sup>3</sup>/a** en el área de 300 km<sup>2</sup>.

Sabinfosistem (2005) reporta una percolación ( $Q_{\text{fuga}}$ ) de **28.5 Hm<sup>3</sup>/a**, sin distinguir entre infiltración y fuga.

Adicionalmente, Heiming (2016) menciona que en los bordes de la SSM y el área urbana de SLP, las cargas hidráulicas muestran una diferencia de 80 a 120 m. En consecuencia, una capa separadora o estructura tiene que existir. Introduce para modelación dos nuevas unidades hidrogeológicas, una capa separadora y una permeable. La primera establece la diferencia entre las cargas hidráulicas entre ambos acuíferos y puede ser explicada geológicamente por lentes de sedimento fino existentes en los conglomerados “Halcones” con baja permeabilidad. La capa permeable fue introducida de manera lateral continua entre la capa separadora y la capa del acuitardo (Figura 64).

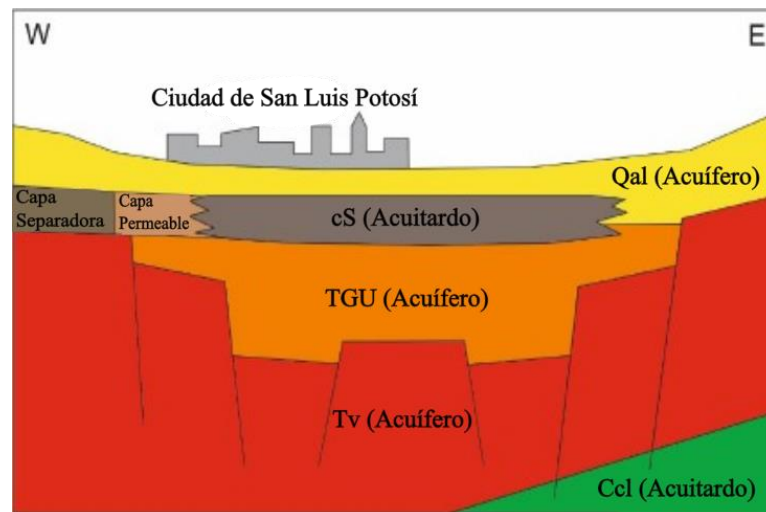


Figura 64. Esquema de las capas en la cuenca de SLP (Fuente: Heiming, 2016; Modificada: Velázquez, 2025)

#### II.4.4 Extracción de agua mediante pozos de bombeo

Uno de los parámetros más importantes de la modelación es la extracción de agua subterránea por medio del bombeo; lo mejor sería poder contabilizar el caudal de extracción de todos los pozos de la región de estudio. Sin embargo, por la cantidad de pozos que son, la escasez de medidores en los pozos y la falta de registros, se usó en este caso la información del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) del año 2024, aunque no es una información cien por ciento confiable, es lo mejor que se tiene.

La Tabla 20, muestra los volúmenes concesionados y a partir del primer año de registros en 1994, la Figura 65, nos representa mejor estos saltos con respecto al tiempo, desde los inicios de extracciones de agua subterránea (CONAGUA, 2024).

Tabla 20. Volúmenes concesionados 1994-2024. Fuente: REPDa (2024).

| Año  | Volumen (Hm <sup>3</sup> /a) | Volumen acumulado (Hm <sup>3</sup> /a) |
|------|------------------------------|----------------------------------------|
| 1994 | 2.57                         | 2.57                                   |
| 1995 | 5.67                         | 8.24                                   |
| 1996 | 3.88                         | 12.12                                  |
| 1997 | 2.65                         | 14.77                                  |
| 1998 | 8.42                         | 23.19                                  |
| 1999 | 9.77                         | 32.97                                  |
| 2000 | 4.51                         | 37.47                                  |
| 2001 | 0.91                         | 38.39                                  |
| 2002 | 0.72                         | 39.11                                  |
| 2003 | 1.16                         | 40.27                                  |
| 2004 | 0.61                         | 40.88                                  |
| 2005 | 1.72                         | 42.60                                  |
| 2006 | 0.61                         | 43.21                                  |
| 2007 | 1.60                         | 44.82                                  |
| 2008 | 0.62                         | 45.43                                  |
| 2009 | 1.27                         | 46.70                                  |
| 2010 | 0.04                         | 46.75                                  |
| 2011 | 1.92                         | 48.66                                  |
| 2012 | 0.82                         | 49.48                                  |
| 2013 | 2.04                         | 51.52                                  |
| 2014 | 1.21                         | 52.73                                  |
| 2015 | 0.76                         | 53.49                                  |
| 2016 | 0.56                         | 54.04                                  |
| 2017 | 46.59                        | 100.63                                 |
| 2018 | 1.78                         | 102.41                                 |
| 2019 | 2.83                         | 105.24                                 |
| 2020 | 2.84                         | 108.08                                 |
| 2021 | 0.70                         | 108.78                                 |
| 2022 | 0.12                         | 108.89                                 |
| 2023 | 0.40                         | 109.30                                 |
| 2024 | 0.69                         | 109.99                                 |

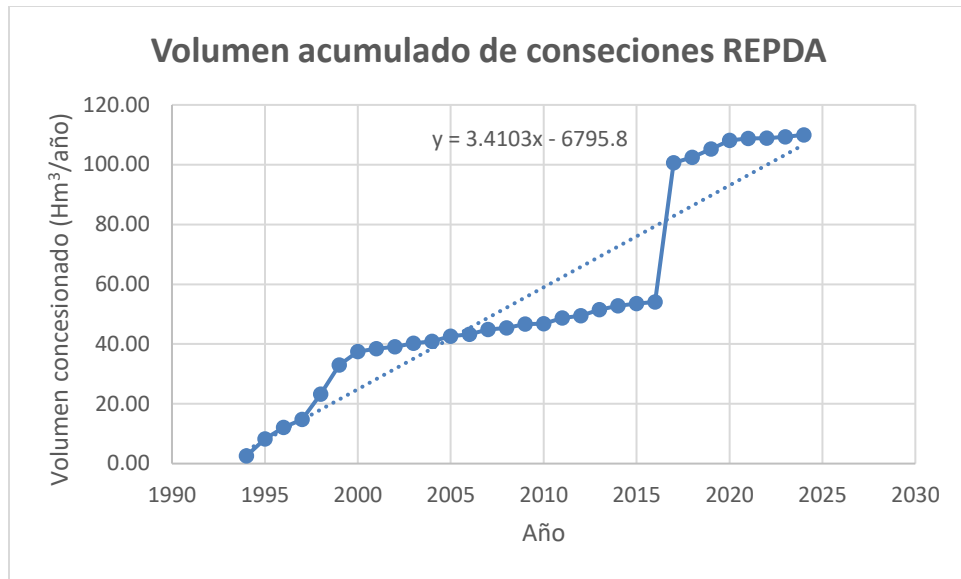


Figura 65. Volumen acumulado de concesiones. Fuente: REPDA, 2024.

Así mismo, se puede observar en la Figura 66, la ubicación de los pozos de bombeo registrados en el REPDA.

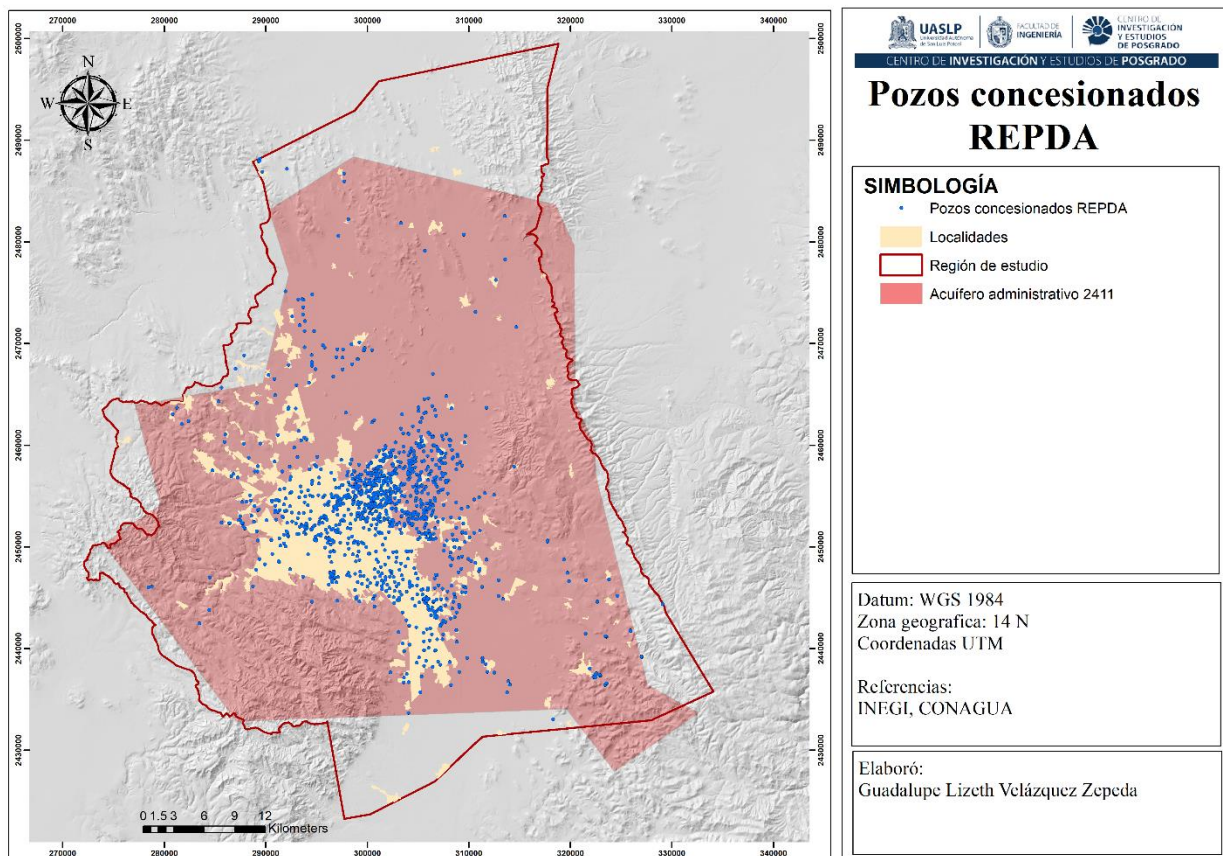


Figura 66. Mapa de concesiones. Fuente: REPDA, 2024.

Para la implementación del modelo numérico se utilizó la información de bombeo en m³/d, considerando los valores anuales que se extraen, se dividieron en 365 días y se le asignó esta

cantidad a cada año de cada pozo a partir del año de registro. Para la implementación del balance se considera este caudal de extracción ( $Q_{ext}$ ) de **109.99 Hm<sup>3</sup>/a.**

Podemos apreciar en la Figura 67 que se tienen diferentes volúmenes de extracción de agua y que en las zonas de rojo con mayor volumen de extracción concesionado coincide con las zonas de mayor temperatura.

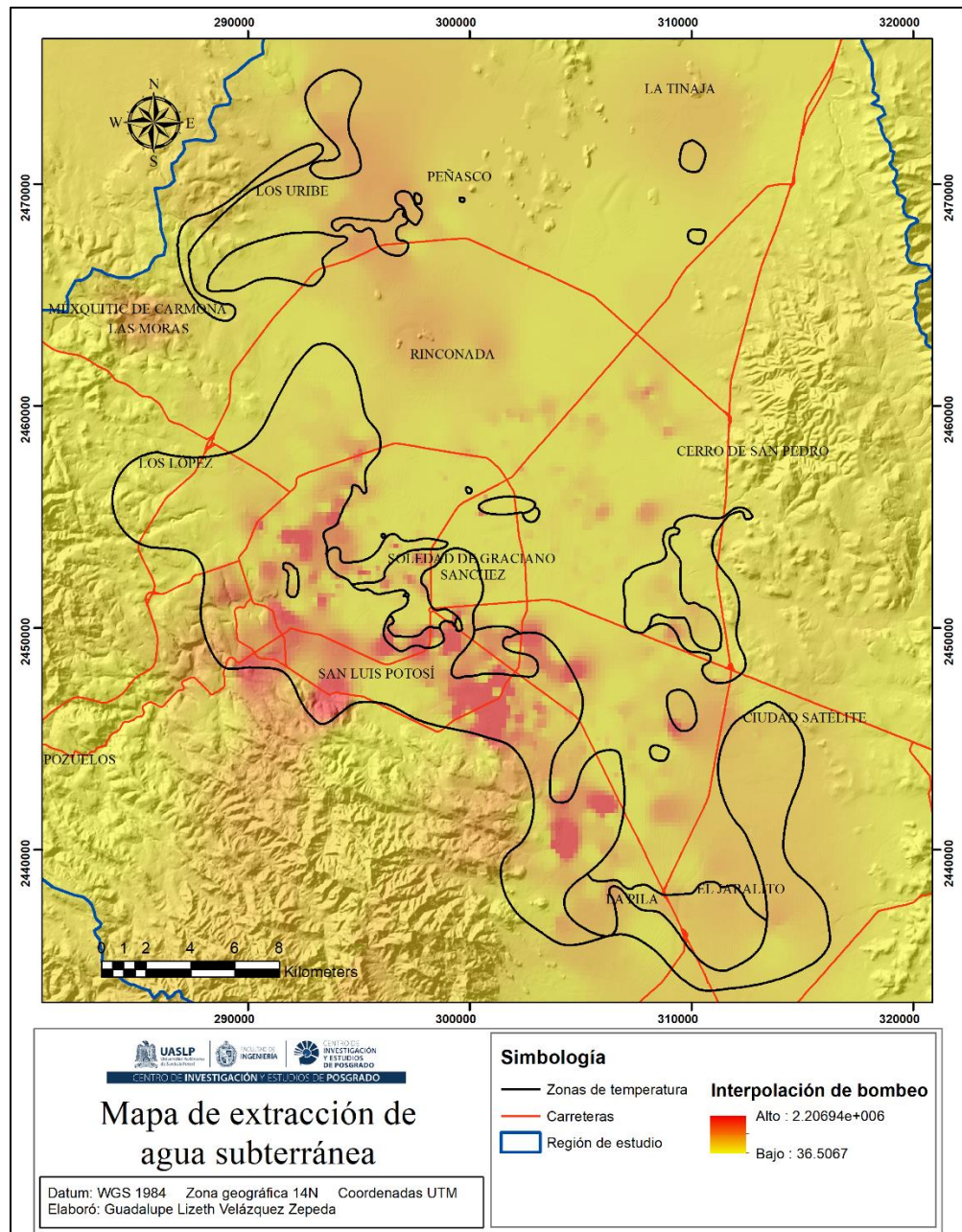


Figura 67. Extracción por bombeo REPDA (2024) - Zonas de temperatura.

## II.4.5 Recarga de agua subterránea

### *Infiltración potencial de la precipitación*

La estimación de la infiltración potencial ( $Q_{inf}$ ) se realizó mediante el balance superficial. Acorde con las ecuaciones del subcapítulo II.3.5 se tienen los siguientes mapas de precipitación, temperatura y evapotranspiración. El balance superficial se realizó en el software *ArcMap 10.5*.

$$Q_{inf} = P - E_{tr} - E$$

donde:

$P$  = Precipitación ( $\text{mm a}^{-1}$ )

$E_{tr}$  = Evapotranspiración ( $\text{mm a}^{-1}$ )

$E$  = Escorrentía ( $\text{mm a}^{-1}$ )

### Precipitación y Temperatura

Esta información procede de 26 estaciones meteorológicas de la CONAGUA del periodo 1970-2024, de las cuales se consideró su valor promedio anual por el periodo mencionado, de aquí se realizaron mapas de isolíneas con el método de interpolación de Función Base Radial (RBF).

La Figura 68 muestra la distribución espacial de la precipitación y la temperatura para la cuenca y la zona de modelación. Se observa que la mayor precipitación se encuentra en la SSM y la Sierra de Cerro de San Pedro (SCSP), así como la Sierra de Álvarez (SA); en estas áreas la precipitación excede los 400 mm/a. En la zona centro la precipitación ronda los 350 mm/a. Por el método de isoyetas la precipitación promedio de la cuenca es de 403.35 mm/a (1970-2024).

La distribución espacial de la temperatura indica una temperatura máxima de 21°C en la porción centro-oeste de la cuenca y una temperatura en la mayor parte de la cuenca de 18°C. La temperatura promedio por el método de isoyetas fue de 17.96°C.

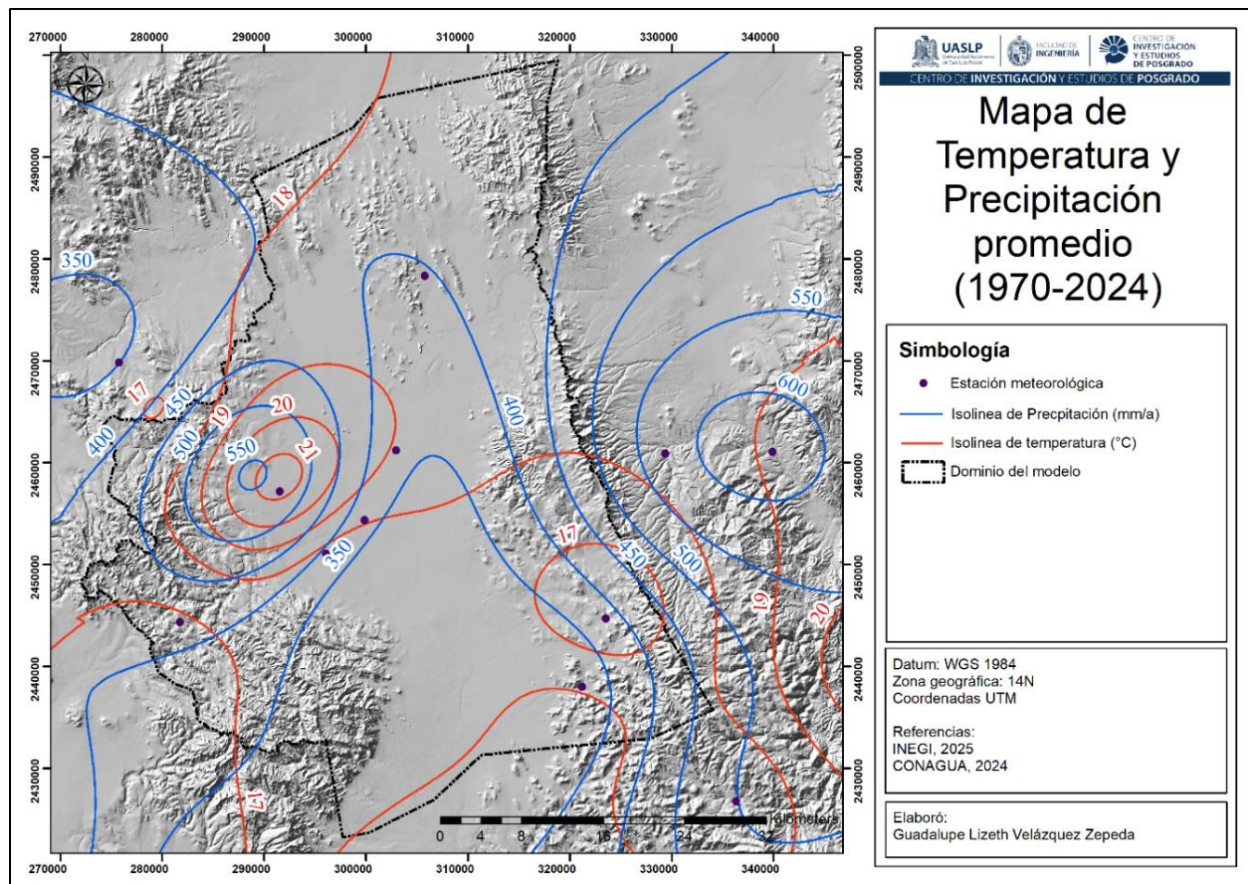


Figura 68. Mapa de temperatura y precipitación promedio (1970-2024)

### Evapotranspiración

Los datos espaciales de precipitación y temperatura fueron utilizados como valores de entrada para el cálculo de la evapotranspiración con la ecuación del método de Turc descrito en el capítulo II.3.4.1. En la Figura 69, se aprecia que la distribución espacial de la evapotranspiración es similar a la de la precipitación, teniendo valores superiores a los 400 mm/a en las sierras y valores entre 300-350 mm/a en la zona centro de la cuenca. La evapotranspiración promedio calculada fue de 393.48 mm/a.

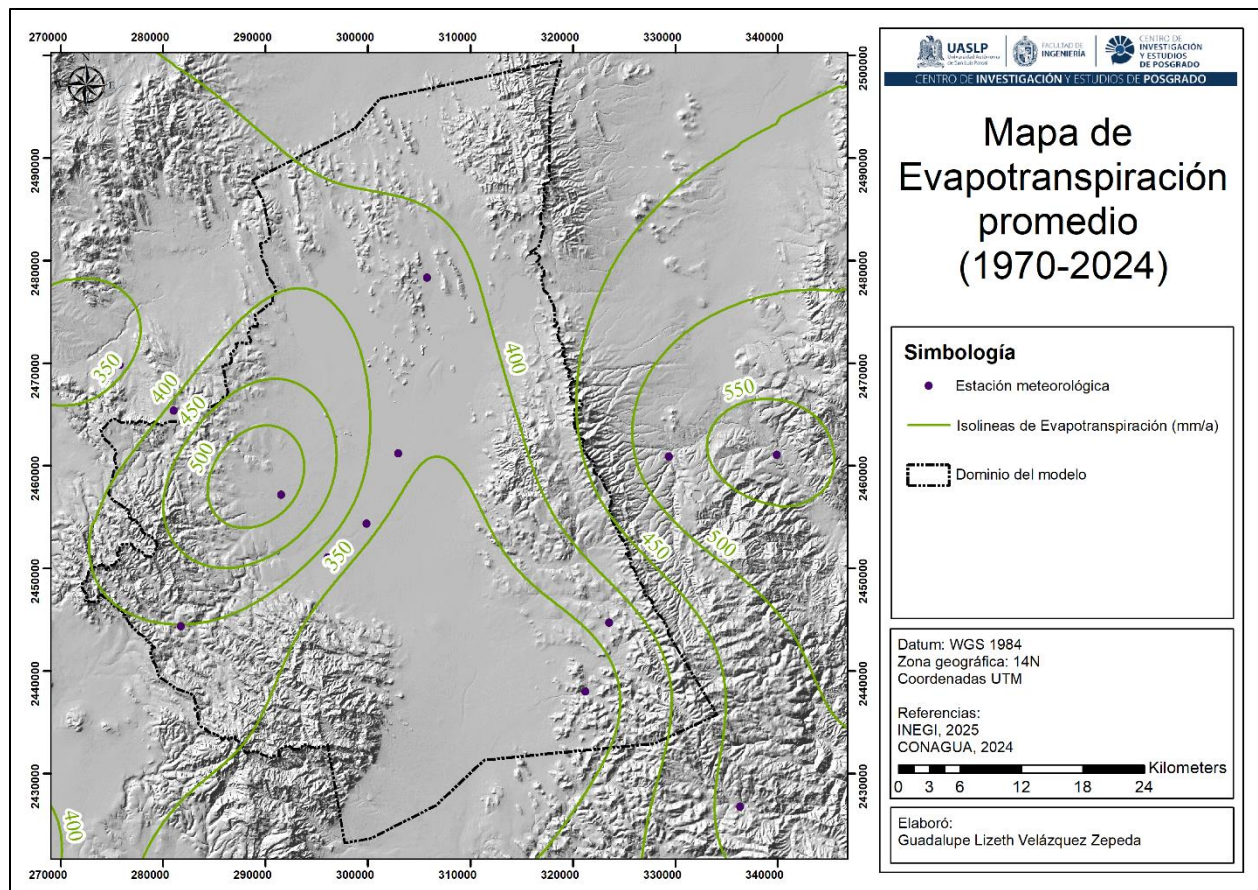


Figura 69. Mapa de evapotranspiración promedio (1970-2024).

### Escorrentía

Al considerarse una cuenca cerrada, no se consideran escorrentías superficiales que interfieran en el cálculo, según lo describe Heimig (2016). Así mismo, como se define en el apartado anterior, el método de Turc contiene la escorrentía misma, por ende, no se debe considerar.

### Infiltración

En la Figura 70, Mapa de la infiltración ( $Q_{inf}$ ) muestra las zonas de mayor recarga potencial según el balance espacial de la cuenca para el periodo de 1970-2024. Las zonas de mayor infiltración se encuentran en las áreas de mayor precipitación que en este caso coinciden con las sierras.

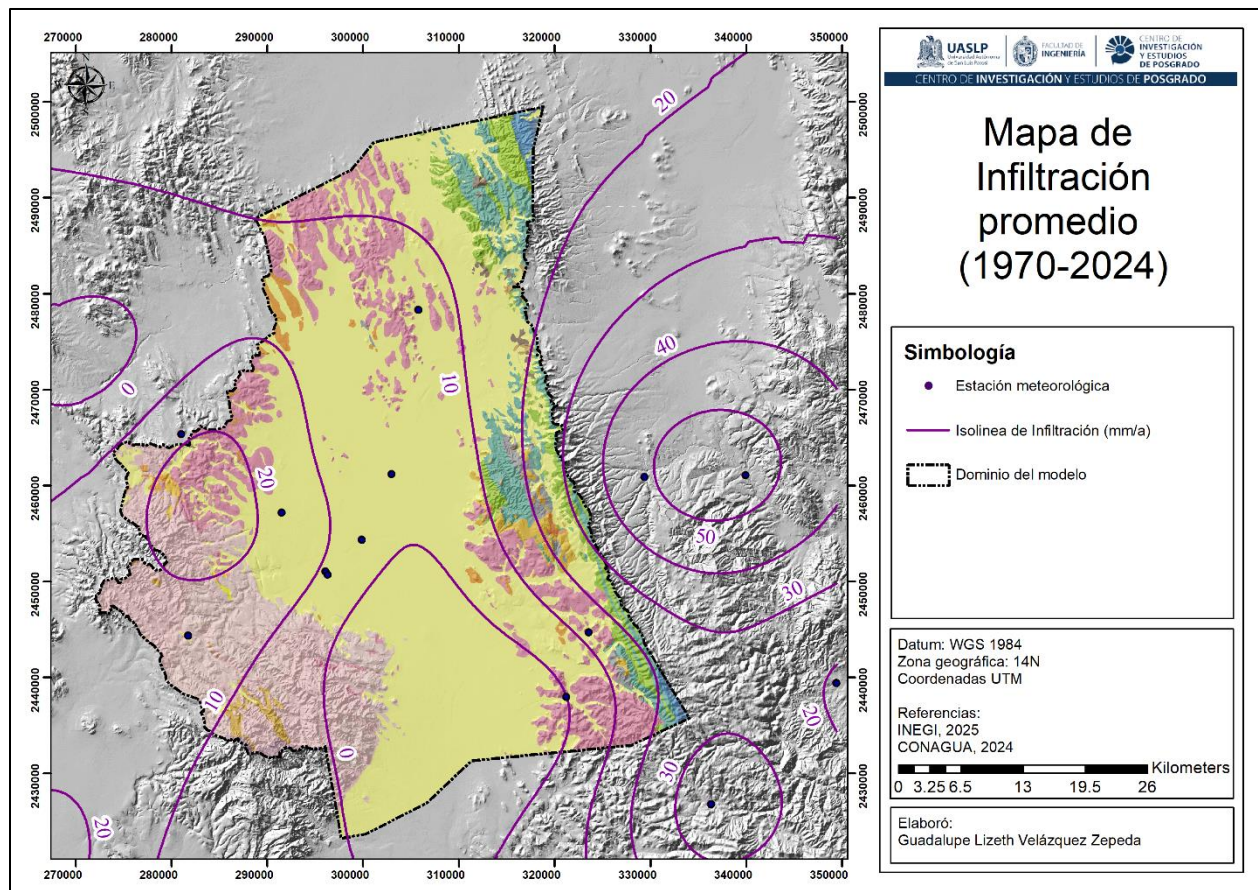


Figura 70. Mapa de infiltración promedio (1970-2024).

En este mapa se puede observar cómo el rango de infiltración varía de 30-20 mm/a. Teniendo un valor aproximado de 14.38 mm/a para la SSM. La infiltración promedio del área de dominio corresponde a 9.87 mm/a, sin embargo, se debe considerar que no todo lo que se infiltra recarga y que no es un valor anual sino promedio para el periodo 1970-2024.

El caudal de infiltración corresponde a un valor para toda el área de la cuenca, se considera que debe estar en el área de infiltración o zona exterior a la zona urbana, en el modelo de Heiming (2016) se considera un área de modelación de  $634 \text{ km}^2$ , excluyendo el área de la zona urbana de  $114 \text{ km}^2$ , dando un área resultante de  $520 \text{ km}^2$ .

$$Q_{inf} = 0.006 \frac{m}{a} (520 \text{ km}^2) = 3.12 \frac{Hm^3}{a}$$

A nivel de cuenca se tiene un promedio de 10.64 mm/a de infiltración, siguiendo el ejemplo de Heiming (2016), tenemos:

$$Q_{inf} = 0.01064 \frac{m}{a} (511.34 \text{ km}^2) = 5.44 \frac{Hm^3}{a}$$

Aunque se presenta de esta manera a nivel de cuenca, realmente solo se va a trabajar esta infiltración en las áreas de SSM y SCSP, con un valor de 9.87 mm/a, como dato más conservador.

### ***Recarga artificial de agua subterránea (Recarga urbana)***

La recarga artificial de agua subterránea ( $Q_{art}$ ) revela la cantidad de agua que se infiltra por las fugas de la red de abastecimiento urbano ( $Q_{urb}$ ).

Se consideró el volumen extraído de agua subterránea para los usos, urbano, industrial, servicios, doméstico y otros, como se muestra en la Tabla 21, de los datos del REPDA (2024).

*Tabla 21. Caudal de extracción por tipo de uso urbano.*

| USO                   | Q (m³/a)             | Q Hm³/a      |
|-----------------------|----------------------|--------------|
| <b>PÚBLICO URBANO</b> | 64,940,919.84        | 64.94        |
| <b>INDUSTRIAL</b>     | 11,869,852.19        | 11.87        |
| <b>SERVICIOS</b>      | 3,779,993.80         | 3.78         |
| <b>DOMÉSTICO</b>      | 21,633.80            | 0.02         |
| <b>OTROS</b>          | 6,112,721.26         | 6.11         |
| <b>TOTAL</b>          | <b>86,725,120.89</b> | <b>86.73</b> |

Se contempló un 30 % de infiltración por fugas, descrito por (Sabinfosistem, 2005), teniendo como resultado la ecuación:

$$Q_{urb} = \left[ \sum (Q_{urbano} + Q_{industrial} + Q_{servicios} + Q_{domestico} + Q_{otros}) \right] [0.30]$$

$$Q_{urb} = \left[ 86.73 \frac{Hm^3}{a} \right] [0.30] = 26.02 \frac{Hm^3}{a}$$

### ***Recarga artificial de agua subterránea (Recarga agrícola)***

La cantidad de flujo de retorno agrícola se estimó en el reporte de (Sabinfosistem, 2005). Menciona una cantidad de  $3.61 \text{ hm}^3\text{a}^{-1}$ , relacionándola con un área de  $623 \text{ km}^2$ .

$$Q_{agri} = \frac{V_{agri}}{A} = \frac{3.61 \times 10^{15} \text{ mm}^3/a}{623 \times 10^{12} \text{ mm}^2} = 5.8 \text{ mm/a}$$

En este caso se consideraron todas las áreas que el INEGI (2024) tiene consideradas como zonas agrícolas de las cartas topográficas 1:50,000, dentro del dominio del modelo, resultó en  $386.98 \text{ km}^2$  considerando estos valores y la siguiente ecuación, tenemos un resultado de  $6 \text{ mm/a}$ .

$$Q_{agri} = \frac{V_{agri}}{A} = \frac{3.61 \times 10^{15} \text{ mm}^3/a}{386.98 \times 10^{12} \text{ mm}^2} = 6 \text{ mm/a}$$

Considerando el volumen de extracción de agua para uso agrícola, teniendo en cuenta que se fuga en promedio un 10 % y considerando el valor de la Tabla 22.

Tabla 22. Caudal de extracción para cada uso agrícola

| USO                | M3/A                 | HM3/A        |
|--------------------|----------------------|--------------|
| <b>AGRÍCOLA</b>    | 22,825,469.82        | 22.83        |
| <b>ACUICULTURA</b> | 121000               | 0.12         |
| <b>PECUARIO</b>    | 270554               | 0.27         |
| <b>TOTAL</b>       | <b>23,217,023.82</b> | <b>23.22</b> |

$$Q_{agri} = \left[ \sum (Q_{agrícola} + Q_{acuicultura} + Q_{pecuario}) \right] [0.10]$$

$$Q_{agri} = \left[ 23.22 \frac{Hm^3}{a} \right] [0.10] = 2.322 \frac{Hm^3}{a}$$

Considerando el área de 386.98 km<sup>2</sup> se llega un Q<sub>agri</sub> = 6 mm/a, concuerda con el método anterior.

## II.4.6 Entradas y Salidas de flujo subterráneo

### *Entradas por flujo subterráneo vertical.*

El flujo regional representa el flujo principal del acuífero profundo, de acuerdo con Carrillo Rivera et al. (1996), cerca del 70% de la extracción de agua subterránea extraída del acuífero profundo proviene de este. El flujo regional es inducido y soportado por un flujo excedente subterráneo vertical. Se origina en las rocas volcánicas (Carrillo-Rivera et al. 2002).

El cálculo del caudal del flujo regional es  $Q_{reg}$

$$Q_{reg} = Q_{ext} * 0.70$$
$$Q_{reg} = \left(129 \frac{Hm^3}{a}\right) (0.70) = 90.3 \frac{Hm^3}{a}$$

En la Figura 67, se pueden apreciar las distintas zonas de temperatura termal, donde se considera que se encuentra el flujo regional vertical.

Considerando el caudal de extracción de la información oficial del REPDA (2024), de  $Q_{ext}= 109.99 Hm^3/a$ , tenemos un caudal de flujo vertical.

$$Q_{reg} = Q_{ext} * 0.70$$
$$Q_{reg} = \left(109.99 \frac{Hm^3}{a}\right) (0.70) = 76.993 \frac{Hm^3}{a}$$

### *Entradas por flujo subterráneo lateral.*

El flujo lateral ( $Q_{in}$ ) se presenta en las sierras y se infiltra hasta el acuífero somero. Proveniente de la recarga de la zona de roca volcánica. Cardona (2007) calculó un valor de 40 mm/a para este valor. Heimig (2016) considera un volumen de 22.1  $Hm^3$  en un área de 250  $km^2$ ; sin embargo, no debe considerarse la zona de la SA al ser un tipo de roca calcaria.

$$Q_{lateral} = \text{Área} * \text{infiltración} = 250 \times 10^6 m^2 (0.0221 m/a) = 5.53 \frac{Hm^3}{a}$$

En este caso se consideró una entrada por flujo lateral únicamente por el acceso de la SSM, de la siguiente magnitud.

$$Q_{lat-SSM} = 462.84 \times 10^6 m^2 (0.040 m/a) = 18.51 \frac{Hm^3}{a}$$

***Salidas por flujo subterráneo lateral.***

Se considera en Heiming (2016) un flujo lateral de salida en la zona norte, donde se consideran dos pozos de observación, CNA-11-403 y CNA-11-696, el caudal de salida  $Q_{NE}$  se aproxima con la ecuación:

$$Q_{NE} = ikA = (0.004)(1.5 \times 10^{-5} m/s)(2.4 \times 10^6 m^2) = 0.144 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{NE} = (0.144 \frac{m^3}{s})(3.15 \times 10^7 \frac{s}{a}) = 4.5 \frac{Hm^3}{a}$$

#### II.4.7 Modelo hidrogeológico

Modelo únicamente con el balance subterráneo, se presenta en la Tabla 23 el balance hidrológico subterráneo de la cuenca, así como en la Figura 71.

Tabla 23. Balance hidrológico subterráneo.

| Acuífero somero           |          | Hm <sup>3</sup> /a | Fuentes       |
|---------------------------|----------|--------------------|---------------|
| Flujo de entrada          | Qinf     | 5.44               | Datos propios |
|                           | Qagri    | 2.32               | Datos propios |
|                           | Qurb     | 26.02              | Datos propios |
| Flujo de salida           | Q fuga   | 28.50              | Heiming, 2016 |
|                           | Qextr    | 7.00               | Heiming, 2016 |
| Cambio del almacenamiento |          | -1.72              |               |
| Acuífero profundo         |          |                    |               |
| Flujo de entrada          | Qfuga    | 28.5               | Heiming, 2016 |
|                           | Qlat SSM | 18.51              | Datos propios |
|                           | Q reg    | 76.993             | Datos propios |
| Flujo de salida           | Qextr    | 109.99             | Datos propios |
|                           | Q NE     | 4.5                | Heiming, 2016 |
| Cambio del almacenamiento |          | 9.51               |               |

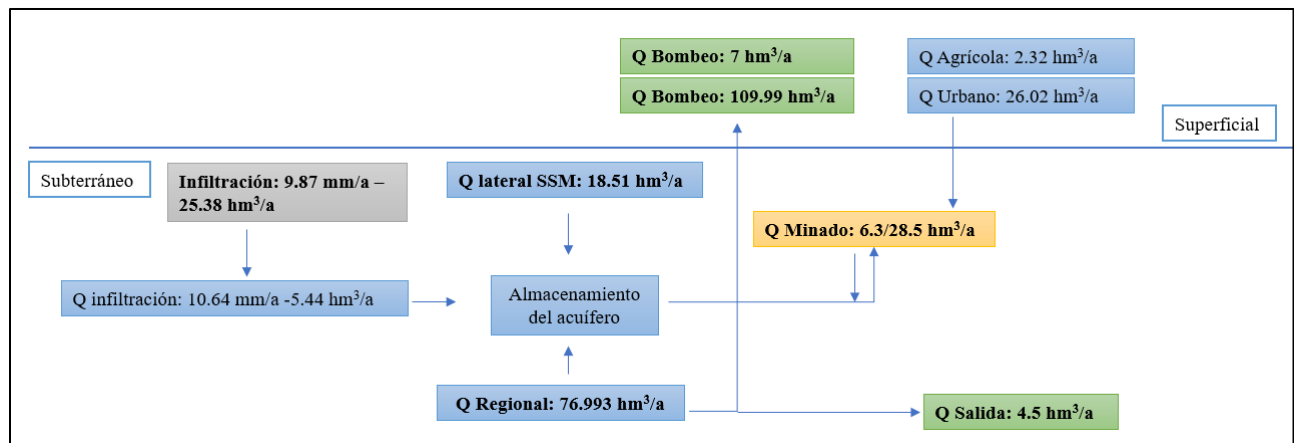


Figura 71. Balance hidrológico subterráneo.

## II.5. Balance hídrico superficial - subterráneo

Para la ecuación general de balance se establece que las entradas deben ser iguales a las salidas.

$$Q_{in} = Q_{out}$$

Para el balance superficial las entradas corresponden a la precipitación y las salidas son escurrimiento, evapotranspiración e infiltración.

La ecuación del balance subterráneo se tiene como entradas a la recarga vertical, entradas por flujo subterráneo horizontal, recarga inducida; las salidas son las extracciones de agua subterránea y las salidas de flujo subterráneo.

La ecuación de balance hídrico superficial y subterráneo general queda definida por Krienen (2018) como:

$$\Delta S = Q_p + Q_{in} + Q_{art} - Q_{out} - Q_{ext}$$

donde:

$\Delta S$ = Cambio de almacenamiento

$Q_p$  = Recarga potencial

$Q_{in}$ = Entrada de flujo subterráneo

$Q_{art}$ = Recarga de agua artificial

$Q_{out}$ = Salida de flujo subterráneo

$Q_{ext}$ = Extracción de agua subterránea

A continuación, se presenta el balance promedio final de la zona de estudio, Figura 72.

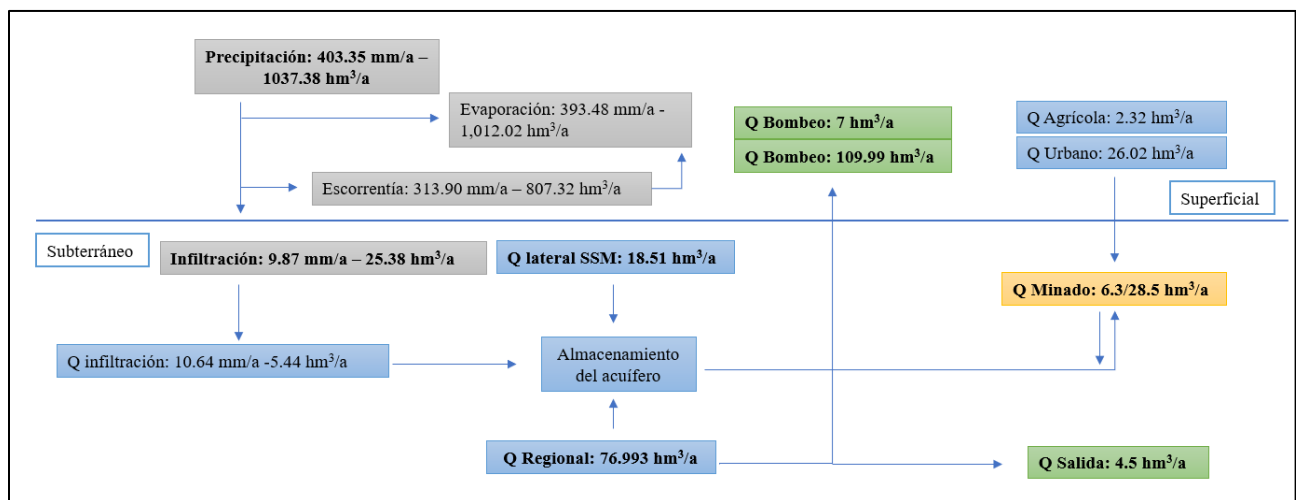


Figura 72. Balance hídrico superficial y subterráneo.

## II.6. Modelo conceptual

Un modelo conceptual por lo menos debe incluir información sobre las fronteras, estratigrafía, dirección y elevación del nivel freático, fuentes de aprovechamiento y una estimación del balance hídrico superficial-subterráneo. Además de toda aquella información que le sirva de complemento, como el análisis hidrogeoquímico.

En la Figura 73, se muestra el modelo conceptual de la cuenca de San Luis Potosí, considerando las entradas y salidas de agua subterránea, así como el balance superficial y los sistemas de flujo.

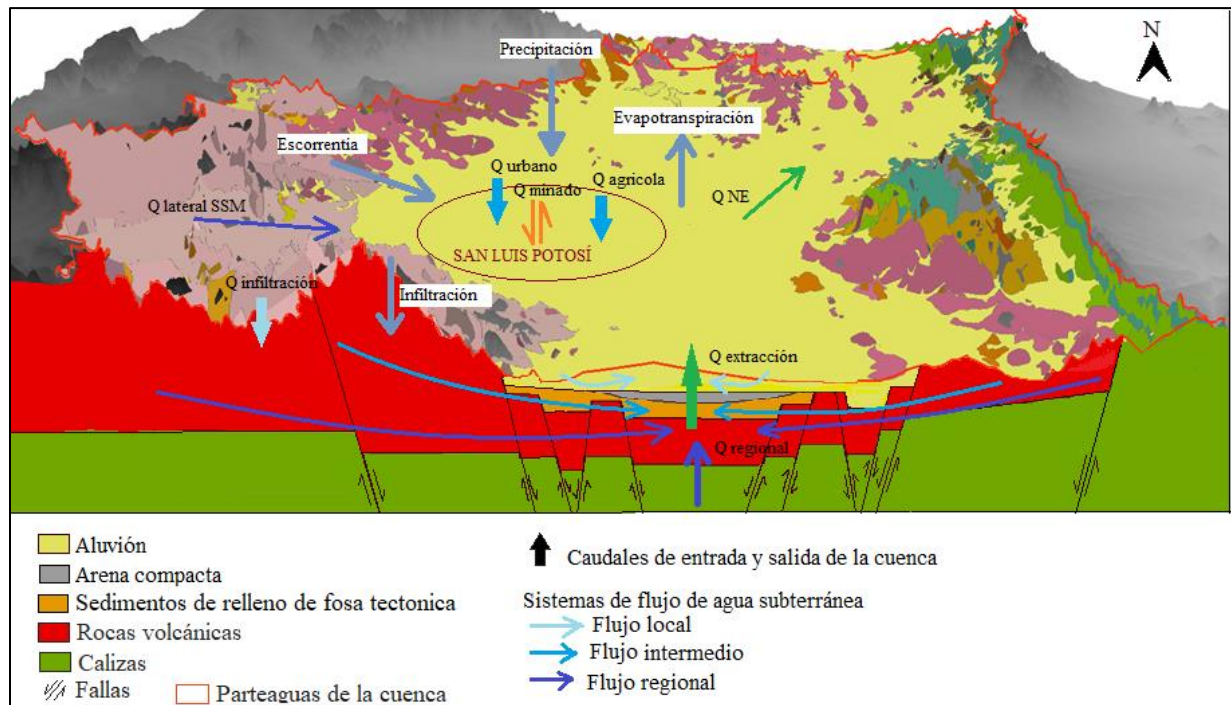


Figura 73. Modelo conceptual de la cuenca de San Luis Potosí. (Fuente: Krienen, 2018; Modificado: Velázquez, 2025)

### III. Implementación del modelo numérico del flujo de agua subterránea

En la Tabla 24, se observa la comparativa con respecto a otros modelos previos que se han realizado en el acuífero de San Luis Potosí.

Tabla 24. Comparativa entre modelos previos.

| Características del modelo                                         | Kohn Ledesma                             | López Álvarez                                     | Heiming                                                    | Krienen                                                                             | Velazquez         |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                                                                    | 2009                                     | 2012                                              | 2016                                                       | 2018                                                                                | 2026              |
| Programa                                                           | MODFLOW 3.1                              | MODFLOW 4.1                                       | FEFLOW 7.0                                                 | FEFLOW 7.0                                                                          | FEFLOW 7.0        |
| Tipo de ecuación                                                   | Diferencias finitas                      | Diferencias finitas                               | Elemento finito                                            | Elemento finito                                                                     | Elemento finito   |
| Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )                               | 1802.3                                   | 1051.36                                           | 634                                                        | 2158.15                                                                             | 2571.91           |
| Considera la morfología de la cuenca                               | área rectangular, excluyendo las sierras | Área rectangular, considera solo la parte central | zona de la parte central de la cuenca, solo la zona urbana | 1901, zona urbana de 105                                                            | sí                |
| Capas                                                              | 7                                        | 2                                                 | 22                                                         | 22                                                                                  | 12                |
| Profundidad                                                        | 1100                                     |                                                   |                                                            | 1350                                                                                | 20                |
| Columnas                                                           | 90                                       | 30                                                |                                                            |                                                                                     |                   |
| Renglones                                                          | 82                                       | 34                                                |                                                            |                                                                                     |                   |
| Espacio (m)                                                        | 500                                      | 1000                                              | 200                                                        |                                                                                     |                   |
| Total, de celdas/elementos                                         | 51660                                    | 2040                                              | 533588                                                     | 533588                                                                              | 7726320           |
| Balance hídrico                                                    | sí                                       |                                                   | sí                                                         | sí                                                                                  | si                |
| Días de modelación                                                 | 3,650                                    |                                                   |                                                            | 730                                                                                 | 11,428            |
| Escenarios predictivos: tasas de crecimiento poblacional           | sí                                       | sí                                                |                                                            |                                                                                     |                   |
| Escenarios de remediación: disminución de extracción y reubicación | sí                                       |                                                   |                                                            |                                                                                     |                   |
| Cambio climático y extracción constante                            |                                          |                                                   |                                                            | sí                                                                                  |                   |
| cambio climático e incremento de la extracción                     |                                          |                                                   |                                                            | sí                                                                                  |                   |
| Escenarios de régimen constante                                    |                                          | sí                                                |                                                            |                                                                                     | sí                |
| Incremento de extracción                                           |                                          |                                                   |                                                            |                                                                                     | sí                |
| Recarga por precipitación                                          |                                          | sí                                                | sí                                                         | si                                                                                  |                   |
| Recarga artificial considerada                                     |                                          | sí                                                | sí                                                         | si                                                                                  |                   |
| Flujo vertical ascendente                                          |                                          | No, lo considera de manera lateral                | Sí, lo considera en una zona específica                    | Sí, se considera una zona de la parte del basamento del modelo, en dos intensidades | sí                |
| Datos de extracción del REPDA                                      |                                          | no                                                | no                                                         | no                                                                                  | sí                |
| Interconectividad entre acuíferos                                  |                                          | no                                                | sí                                                         | si                                                                                  | sí                |
| Fecha de calibración                                               | 1995 y 2005                              | 1995 y 2007                                       | 2006 y 2007                                                | 2004,2006, 2005 y 2007                                                              | 2005, 2007 y 2024 |
| Modelación en estado estacionario                                  |                                          | si                                                | si                                                         | si                                                                                  |                   |
| Modelación en estado transitorio                                   | si                                       | si                                                |                                                            | si                                                                                  | si                |

Así mismo en la Figura 74, se puede apreciar la diferencia visual del dominio de modelos en comparación con el modelo actual. Cabe señalar que el modelo de Kohn Ledesma (2009) fue uno de los primeros modelo numéricos aplicados en un programa de computo como fue su caso de Visual MODFLOW.

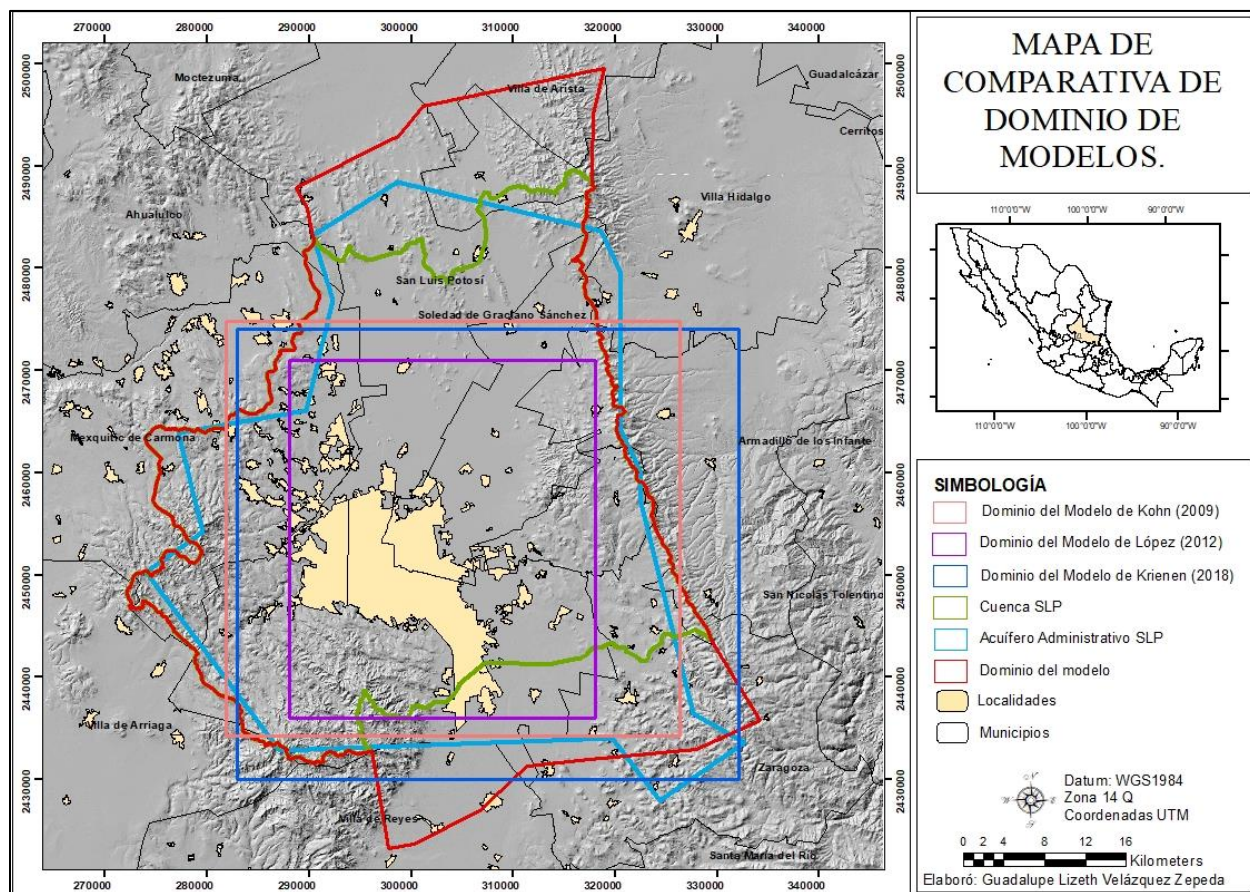


Figura 74. Mapa comparativo de dominios respecto a los modelos previos.

### III.1. Diseño del modelo numérico

#### III.1.1 Dominio de modelación

Para la implementación del modelo numérico se utilizó el software *FEFLOW 7.0*, el cual usa el análisis de elementos finitos. En la definición del área de modelación en planta (Figura 10), los espesores se determinaron a partir de las secciones geológicas propuestas por Cardona (2007). Dichas secciones fueron escaladas en su elevación y se ajustaron a su elevación real con base en el modelo digital de elevaciones (MDE). Posteriormente, la información resultante se organizó en una hoja de Excel, de manera que el software pudiera interpretarla correctamente para su incorporación al modelo. En el modelo también se consideraron las fallas geológicas descritas en Ruiz Torres (2015), las cuales se colocaron en el programa por medio de un archivo shape y se redefinió la malla en esas zonas, en la Figura 14; se aprecian las fallas y las unidades hidrogeológicas implementadas.

#### III.1.2 Discretización espacial

La discretización espacial del modelo se realizó mediante la generación automática de malla “Triangle”, que permite obtener prismas triangulares, resultando en una malla de 643,860 elementos con un área promedio de 0.048 km<sup>2</sup> aproximadamente 4.8 ha, asignándole a cada pozo un nodo. La base del modelo se definió en la elevación 20 m.s.n.m. La máxima altitud del terreno representada en el modelo es de 2,781.9 m.s.n.m. y la mínima es de 1,660.54 m.s.n.m. en la superficie. A continuación, la Figura 75 muestra la discretización espacial en planta, en la Figura 76, se muestra un corte transversal indicando las elevaciones hasta la zona del basamento. En la Figura 77, se representa el modelo en 3D.

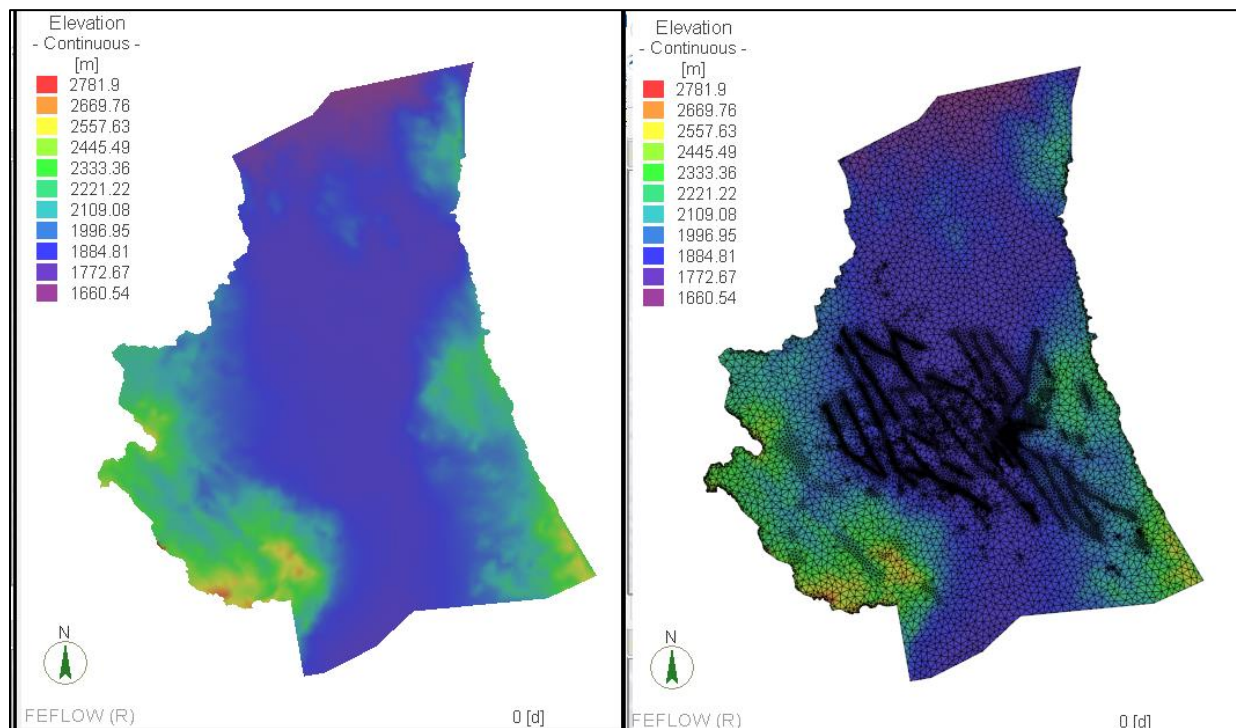


Figura 75. Planta de la discretización espacial. Elaborada mediante FEFLOW.

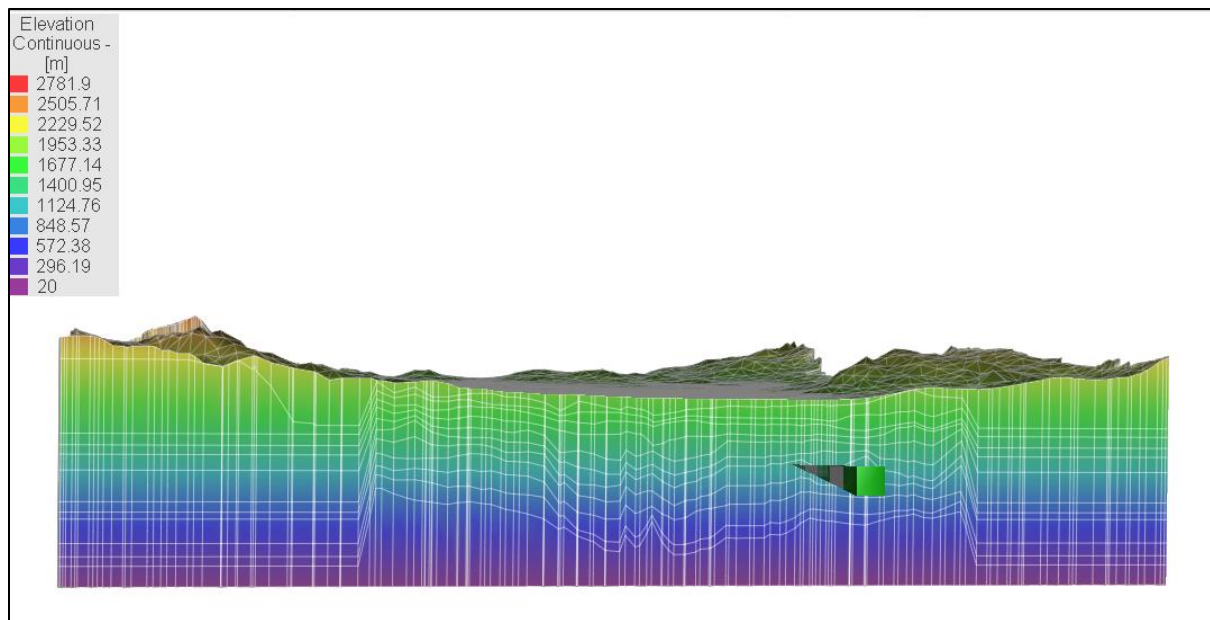


Figura 76. Corte transversal, mostrando las capas del modelo y sus elevaciones. Elaborado mediante FEFLOW.

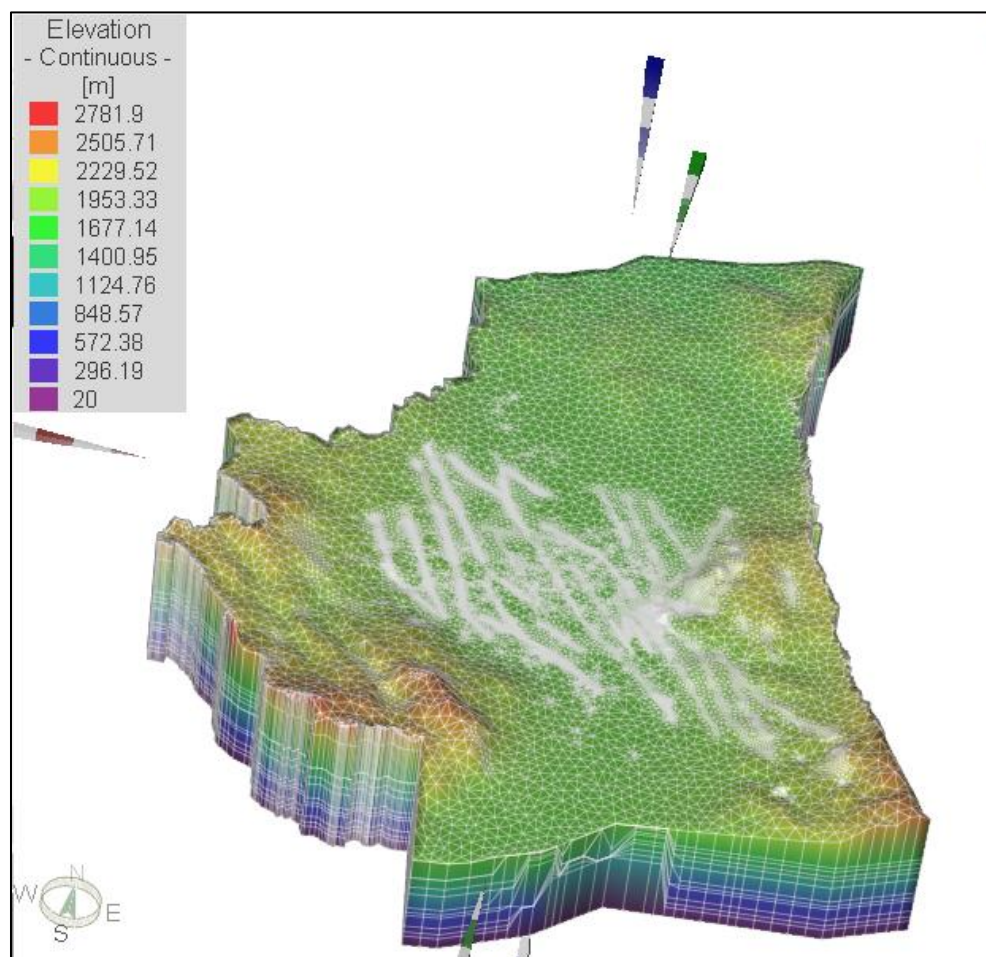


Figura 77. Identificación de las capas y sus elevaciones. Elaborado mediante FEFLOW.

La Figura 78 nos muestra el diseño por elevaciones del modelo, considerando 12 capas, 13 superficies de terreno, se observa que cada capa tiene diferentes espesores.

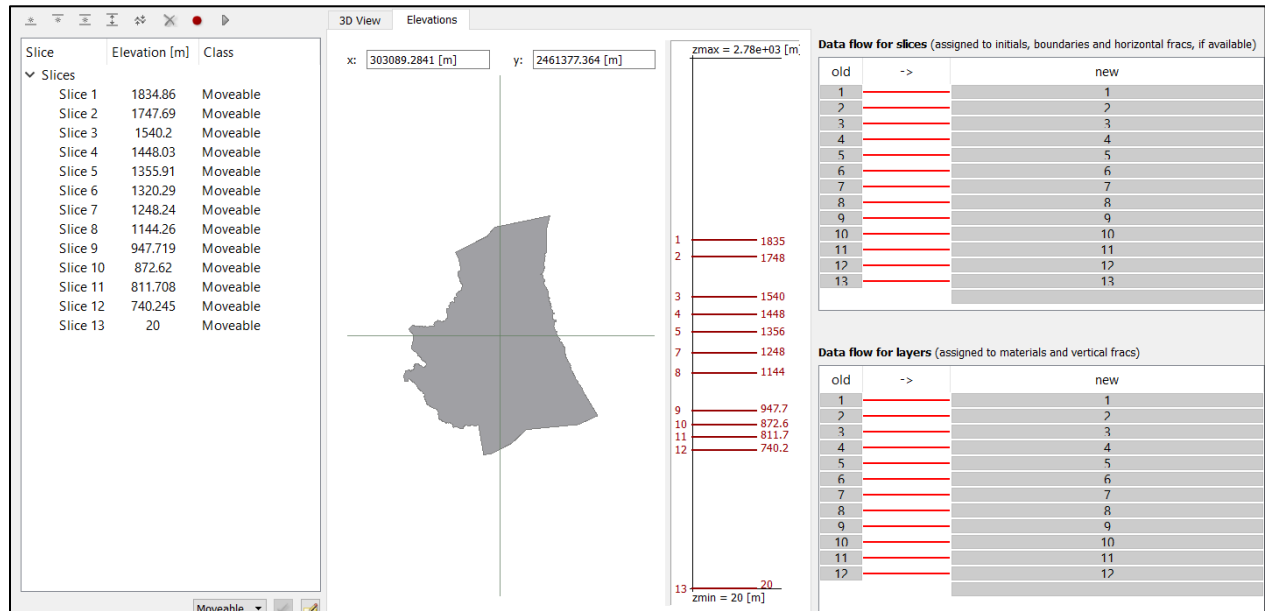


Figura 78. Nombramiento de cada superficie y capa generada. Elaborado en FEFLOW.

### III.1.3 Discretización temporal

El periodo de modelación en estado transitorio fue del 01 de enero de 1994 al 24 de abril de 2025 (11428 días de modelación, 31 años aproximadamente). Se consideró el año 1994, porque es el primer año en el que se tuvieron registros de bombeo por el REPDA.

Para las fechas de calibración corresponden las mediciones de niveles estáticos disponibles: 2005 (4,196 días), 2007 (4,926 días) y 15 de septiembre de 2024 (11,207 días). Se calibró el modelo comparando las cargas hidráulicas medidas en campo con las calculadas con el programa.

La fecha de validación de la calibración fue en el 24 de abril de 2025 al día 11,428.

Los escenarios futuros del flujo de agua subterránea fueron proyectados para el año 2040 (día 16,793) y 2060 (día 24,098).

### III.1.4 Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas que se implementaron van acordes con las descritas en la Tabla 2, son i) Qal - medio granular, ii) Cs - capa impermeable, iii) TGU – medio granular no diferenciado, iv) Tv - rocas volcánicas y v) Ccl - calizas (Figura 79).

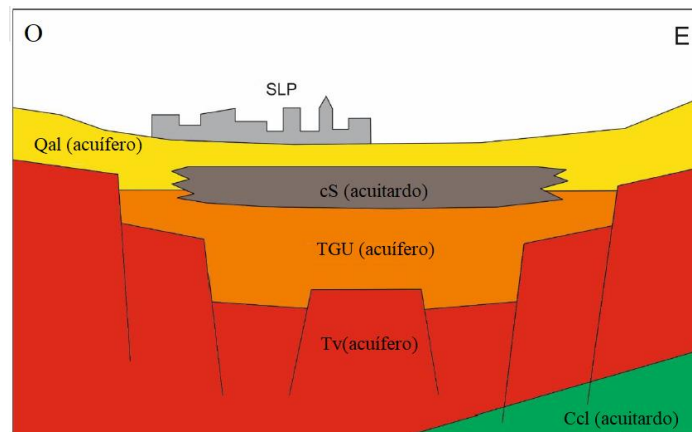


Figura 79. Sección tipo de Unidades hidrogeológicas (Fuente: Heiming,2016; Modificado: Velázquez, 2026).

Para cada medio se definió la conductividad hidráulica ( $K$ ) en  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ; el coeficiente de almacenamiento específico ( $S_s$ ) y la porosidad total ( $n$ ); esta información proviene principalmente de Krienen (2018). En la Figura 80, se aprecian las distintas conductividades hidráulicas iniciales del modelo.

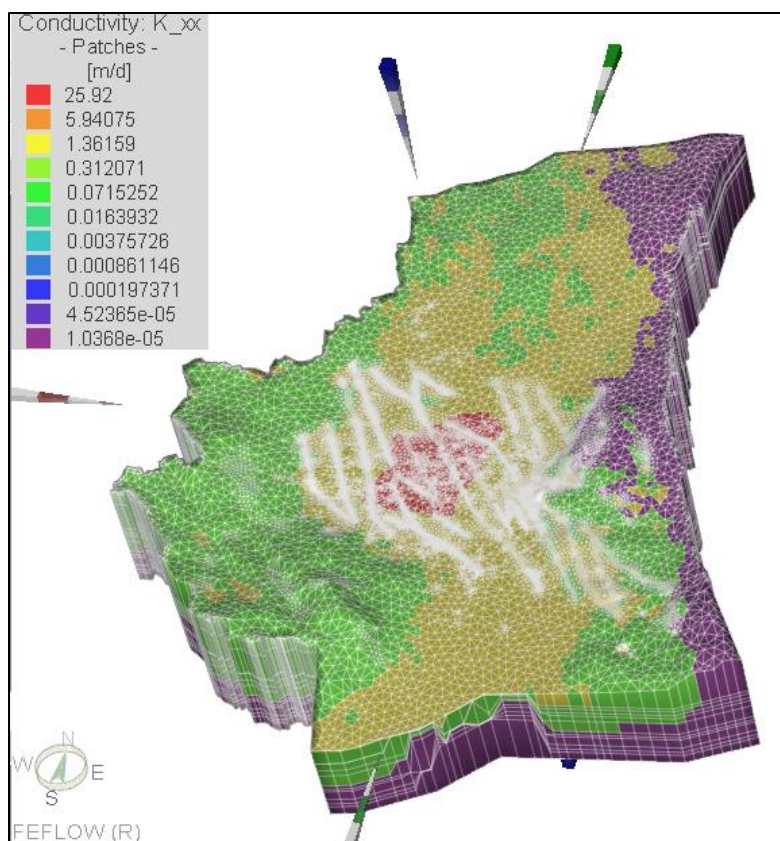


Figura 80. Conductividades hidráulicas en x (Kxx), vista en 3D. Elaborado en FEFLOW.

La Tabla 25 muestra los valores iniciales del modelo.

Tabla 25. Propiedades iniciales del modelo.

| UH             | Kh (Kxx, Kyy) (m/d) |          | Kv (kzz) (m/d) |          | Ss(1/m)  |          | Ne   |
|----------------|---------------------|----------|----------------|----------|----------|----------|------|
| Qal            | 8.64E-02            | 8.64E+00 | 8.64E-03       | 8.64E-01 | 2.00E-05 |          | 0.20 |
| Qal-Somero     |                     | 2.59E+01 |                | 2.59E+00 | 2.00E-05 |          | 0.20 |
| TGU            | 1.47E-01            | 1.81E+00 | 1.47E-02       | 1.81E-01 | 1.00E-05 | 1.20E-03 |      |
| Cs             | 1.73E-04            | 8.64E+00 | 1.73E-05       | 8.64E-01 | 8.00E-05 |          | 0.10 |
| Tv             | 8.64E-06            | 8.64E-01 | 6.91E-03       | 8.64E+02 | 1.00E-05 | 1.00E-04 | 0.10 |
| Tv-Zona termal | 1.73E-01            | 6.05E+00 | 1.73E-02       | 6.05E-01 | 1.00E-05 |          | 0.15 |
| Ccl            | 1.04E-05            |          |                | 1.04E-06 | 8.00E-05 |          | 0.01 |

### III.1.5 Condiciones de frontera

Para la implementación de entradas de agua al modelo, se definieron diferentes zonas de recarga como son i) recarga artificial, ii) recarga por infiltración y iii) recarga por flujo vertical ascendente.

En la Figura 81, se muestran las entradas por recarga artificial que corresponden a las entradas por fugas de las zonas de población, irrigación agrícola y la infiltración proveniente de la precipitación en la SSM.

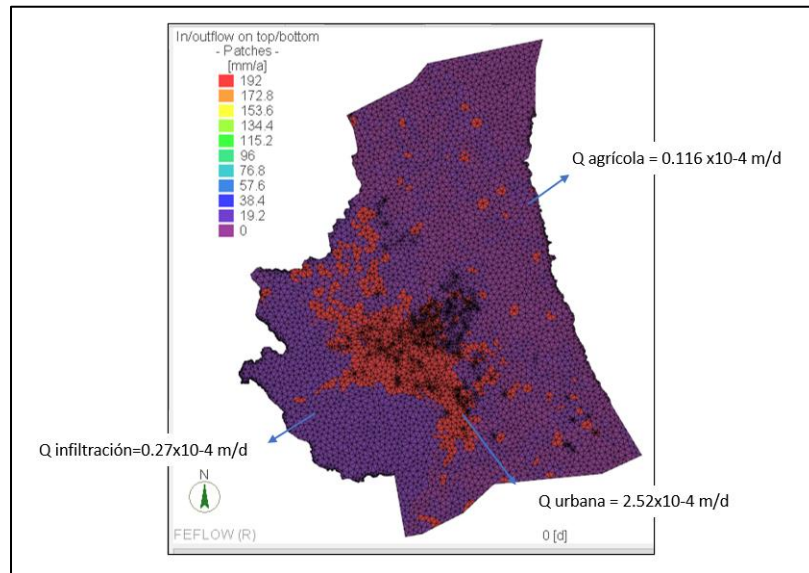


Figura 81. Recarga en la superficie. Elaborado en FEFLOW.

En la Figura 82, se muestran las entradas de flujo vertical ascendente colocadas en las zonas de mayor temperatura; se colocaron en la capa 9 para indicar que ascienden desde las rocas volcánicas fracturadas.

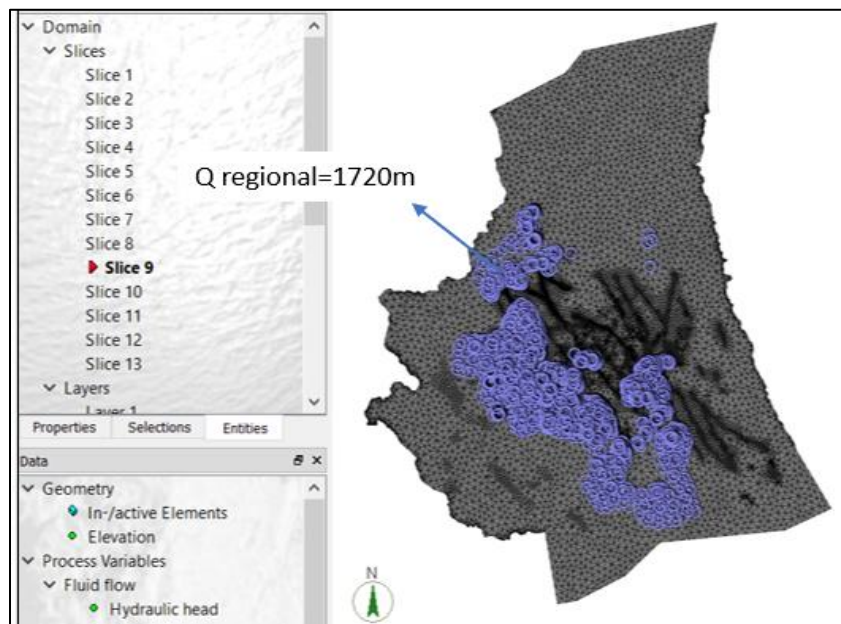
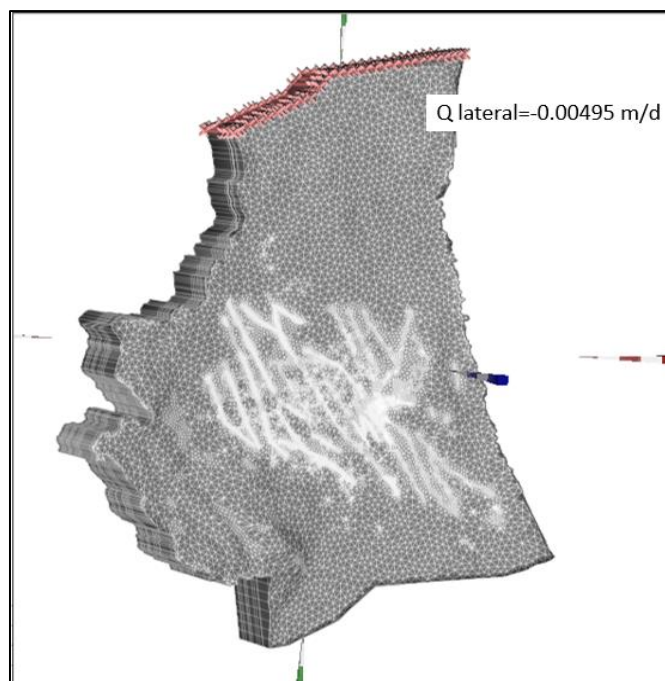


Figura 82. Flujo vertical ascendente. Elaborado en FEFLOW.

### III.1.6 Entradas y salidas de agua subterránea

#### Entradas de agua subterránea

Así como condiciones de entrada de carga variable de flujo lateral por la Sierra de San Miguelito y la zona norte, condición de borde de Neuman, Figura 83.



*Figura 83. Condición de borde de Neuman*

#### Extracción de agua subterránea

En la Figura 84, se muestran las concesiones de agua subterránea registradas por el REPDA hasta el año 2024, considerando las coordenadas oficiales de la página, así como sus caudales de extracción registrados. En este aspecto se tuvo que trabajar el archivo de datos dejando solo una única coordenada para pozos en números enteros, puesto que programa acepta para la malla coordenadas decimales, pero a la hora de colocar nodos de pozos solo considera el valor entero y marca errores, se trabajó un solo pozo cuando la coordenada entera era la misma, así como los pozos que compartían coordenadas, se sumó su caudal base de extracción y se consideró según el año de registro que se tenía de cada uno. Inicialmente se tenía un archivo con 1,542 pozos, realizando las observaciones anteriores, se agruparon en 1,289 pozos. Aun con todo este proceso, el programa no reconoció algunos volúmenes de extracción, en este caso se colocaron en el pozo más cercano, en el apéndice se muestra una tabla con esta información.

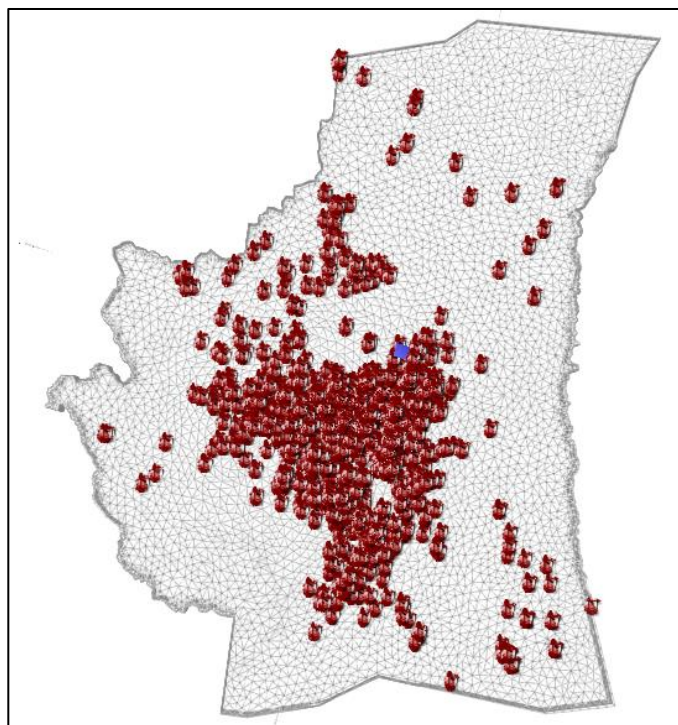


Figura 84. Ubicación de los pozos de extracción de aguas subterráneas.

### III.1.7 Pozos de observación

En la Figura 85, se muestra el modelo con los pozos de observación para el año 2005, respecto al modelo digital de elevaciones empleado. Provenientes de la Krienien (2018), se consideraron los años 2005 y 2007, usando 43 y 46 respectivamente. Así como la actualización de niveles realizada en 2024 y 2005 con 5 pozos cada año.

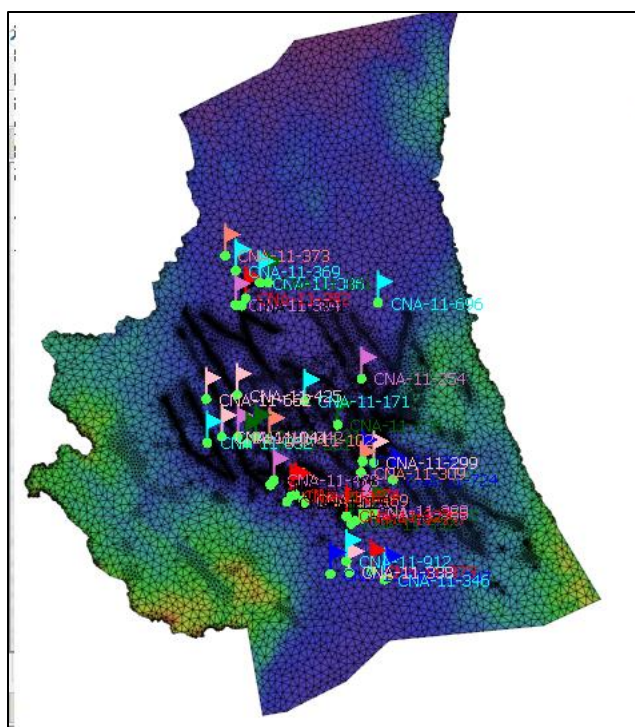
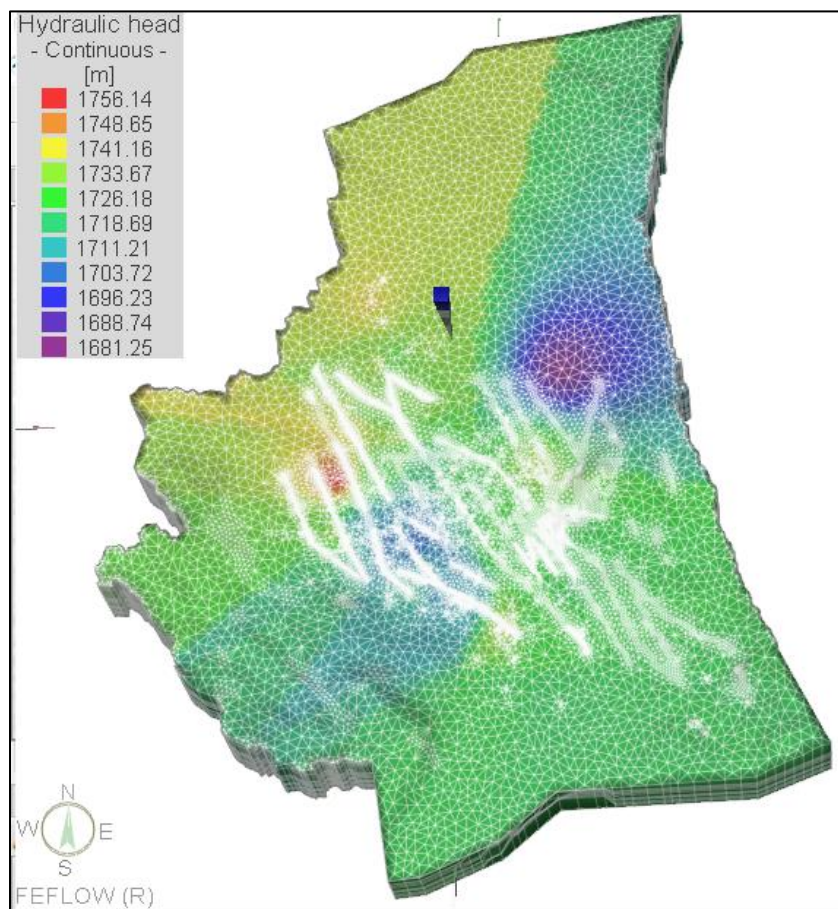


Figura 85. Pozos de observación, año 2005.

### III.1.8 Piezometría inicial

Para el proceso de calibración se definieron como condición inicial las cargas hidráulicas de los pozos de observación del censo realizado en el año 2005, Figura 86, se implementó con el método de interpolación del inverso de la distancia.



*Figura 86 Cargas hidráulicas iniciales del modelo (Año 2005).*

### III.2. Calibración del modelo numérico

La calibración nos permite encontrar la combinación de parámetros que permita una buena representación de los valores de carga hidráulica medidos en el tiempo, y que al mismo tiempo sea coherente con lo descrito en el modelo conceptual (Mex Meneses, 2023). Constituye la parte fundamental del proceso de modelación, puesto que demuestra que el modelo es capaz de representar la realidad simplificada.

Mex Meneses (2023) menciona que, para la evaluación de la calidad de la calibración en términos de la carga hidráulica, se utilizó el error cuadrático medio (RMSE), cuya expresión que lo define es:

$$RMSE = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)^2 \right]^{0.5}$$

Donde

$h_m$  = carga hidráulica modelada

$h_s$  = carga hidráulica medida

El RMSE es un parámetro que indica la cantidad de error que existe entre dos conjuntos de datos, en este caso, los simulados y los medidos. Sin embargo, para comparar el nivel de calibración de diferentes modelos numéricos, es necesario realizar una normalización del RMSE, el cual queda definido por:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{h_{mmax} - h_{min}}$$

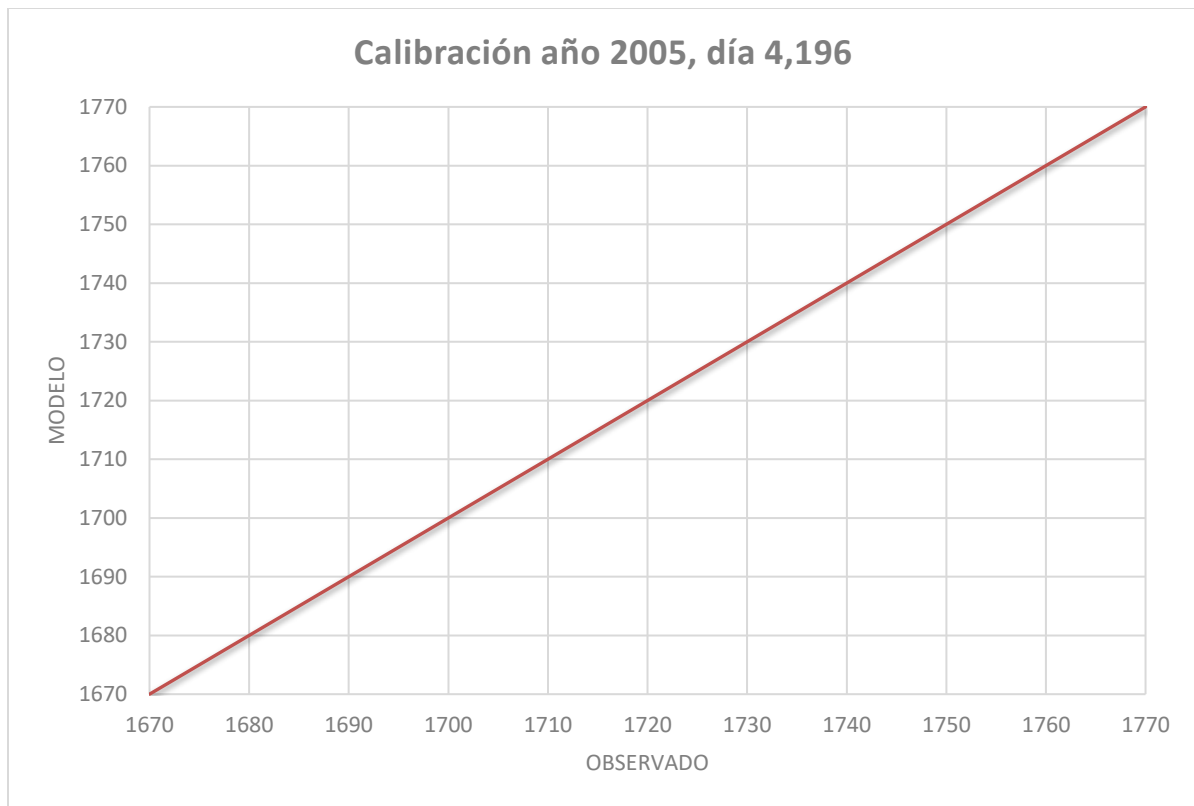
El proceso de calibración buscó un valor de NRMSE por debajo del 10% con el objetivo de que el 90% de los pozos estudiados representara en buena medida la realidad (Mex Meneses, 2023).

#### III.2.1 Cargas hidráulicas

Para las fechas de calibración, corresponden a las mediciones de niveles estáticos disponibles, 30 de junio de 2005 (4,196 días), 2007 (4,926 días), 15 de septiembre de 2024 (11,207 días) y las mediciones del 24 de abril de 2025 (11,428 días) para validarlo; es decir, para confirmar si el modelo calibrado es capaz de simular el año 2025, sin manipular los parámetros.

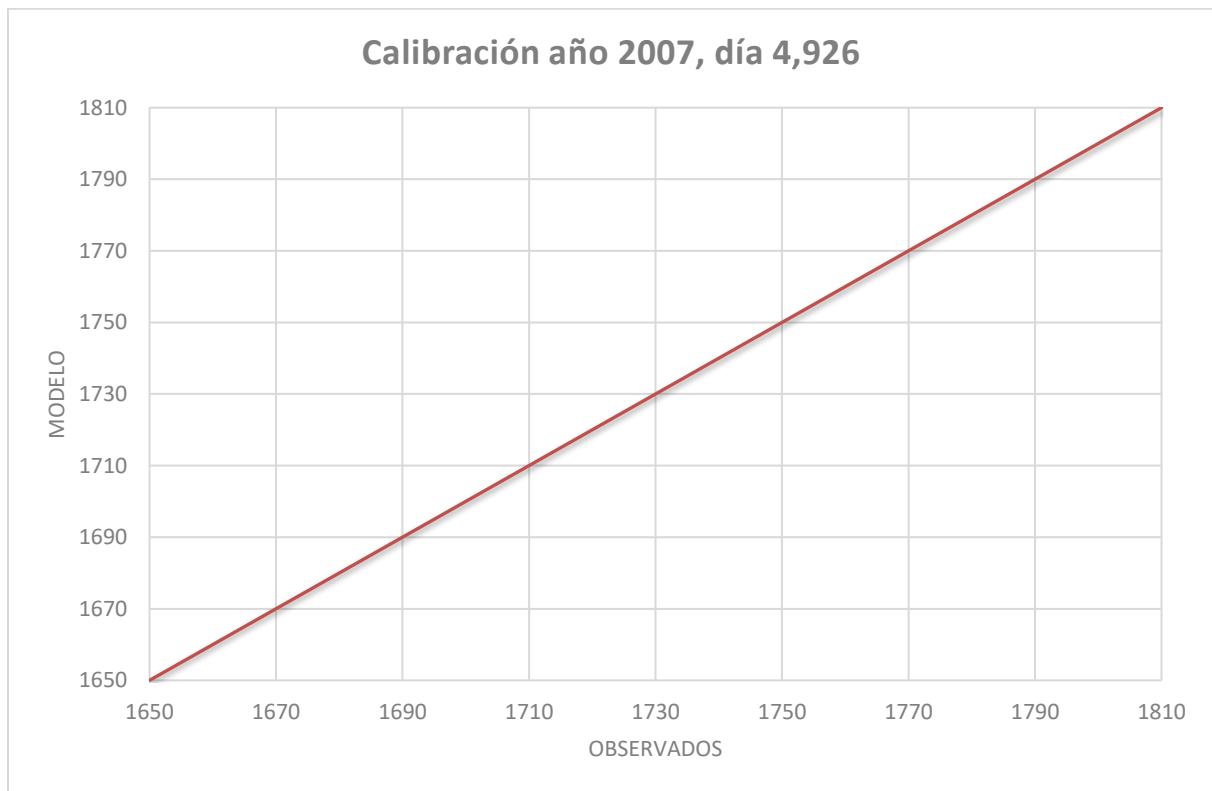
A continuación, se presentan las gráficas de calibración, donde se muestran en el eje horizontal los valores de carga hidráulica observados y en el eje vertical los valores simulados, para un modelo calibrado se esperaría que ambos conjuntos de datos ajustaran una recta de 45°.

En la Figura 87, se encuentra la calibración para el año 2005, siendo el día 4,196, podemos observar que no se encuentra en su estado óptimo, se tiene un NRMSE de 10.48 % y un error absoluto de 6.09 m.



*Figura 87. Calibración para el año 2005, día 4,196.*

Para el año 2007, día 4,926, se tiene un NRMSE de 10.30 % y un error de 9.04 m, como se aprecia en la Figura 88.



*Figura 88. Calibración para el año 2007, día 4,926.*

En la Figura 89, se muestra que es el más alejado el año 2024, día 11,207, con un NRMSE de 44.99 % y un error de 14.64 m.

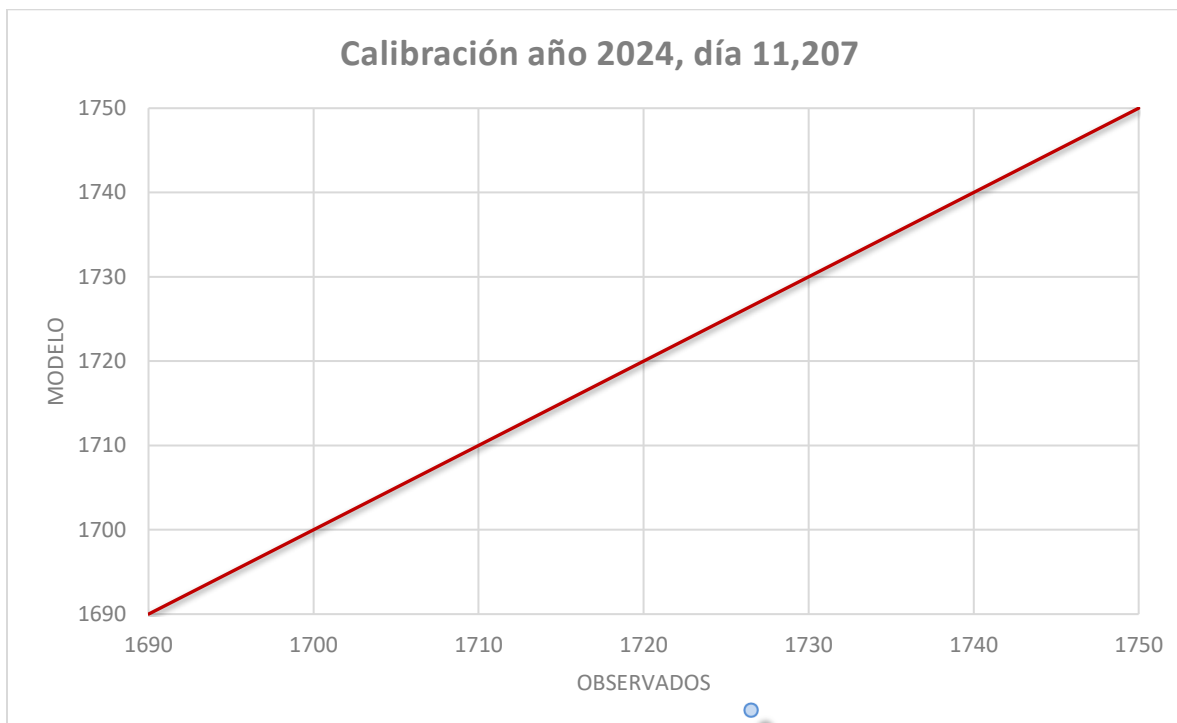


Figura 89. Calibración año 2024, día 11,207.

### III.2.2 Balance hídrico

Se considera que el proceso de calibración es la comparación entre los volúmenes estimados manualmente y los modelados por el software FEFLOW; esto con el fin de tener certeza de que se tuviera congruencia con el modelo conceptual, los resultados se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Balance hídrico en modelo transitorio, 2025

| Concepto   | Balance<br>(A)     | Modelo<br>(B)      | B/A  |
|------------|--------------------|--------------------|------|
|            | hm <sup>3</sup> /d | hm <sup>3</sup> /d | %    |
| Extracción | 0.31               | 0.29               | 0.94 |
| Recarga    | 0.43               | 0.42               | 0.97 |

### III.2.3 Modelo calibrado

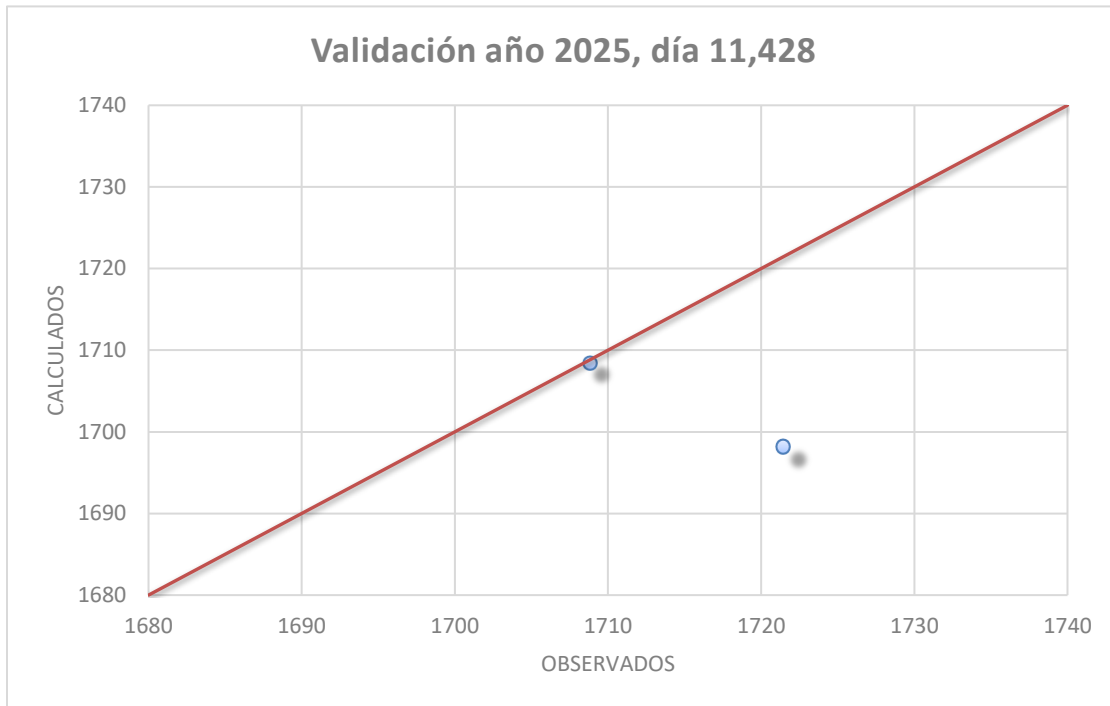
En la Tabla 27, se encuentran los valores de la conductividad para el modelo calibrado, podemos apreciar diferentes rangos por los cambios entre capas.

*Tabla 27. Propiedades de los medios geológicos calibrados.*

| UH                    | Kh (Kxx, Kyy) (m/d) |          | Kv (kzz) (m/d) |          | Ss(1/m)  |          | ne   |
|-----------------------|---------------------|----------|----------------|----------|----------|----------|------|
| <b>Qal</b>            | 8.64E-02            | 1.73E+00 | 8.64E-04       | 1.00E-01 | 2.00E-05 |          | 0.20 |
| <b>Qal-Somero</b>     |                     | 2.59E+01 |                | 2.59E+00 | 2.00E-05 |          | 0.20 |
| <b>Cs</b>             |                     | 1.73E-06 |                | 8.00E-05 | 8.00E-05 |          | 0.10 |
| <b>TGU</b>            |                     | 2.00E-02 |                | 1.47E-02 | 1.00E-04 | 1.20E-03 |      |
| <b>Tv</b>             | 1.50E-01            | 8.64E-01 | 6.91E-03       | 8.64E-02 | 1.00E-03 | 1.00E-04 | 0.10 |
| <b>Tv-Zona termal</b> | 1.47E-01            | 1.73E-01 | 5.00E-06       | 1.73E-02 | 1.00E-04 |          | 0.15 |
| <b>Tv – Fallas</b>    |                     | 1.73E-01 |                | 1.00E-01 |          |          |      |
| <b>Cdl</b>            |                     | 1.04E-05 |                | 1.04E-06 | 8.00E-05 |          | 0.01 |

### III.2.4 Validación y análisis de sensibilidad

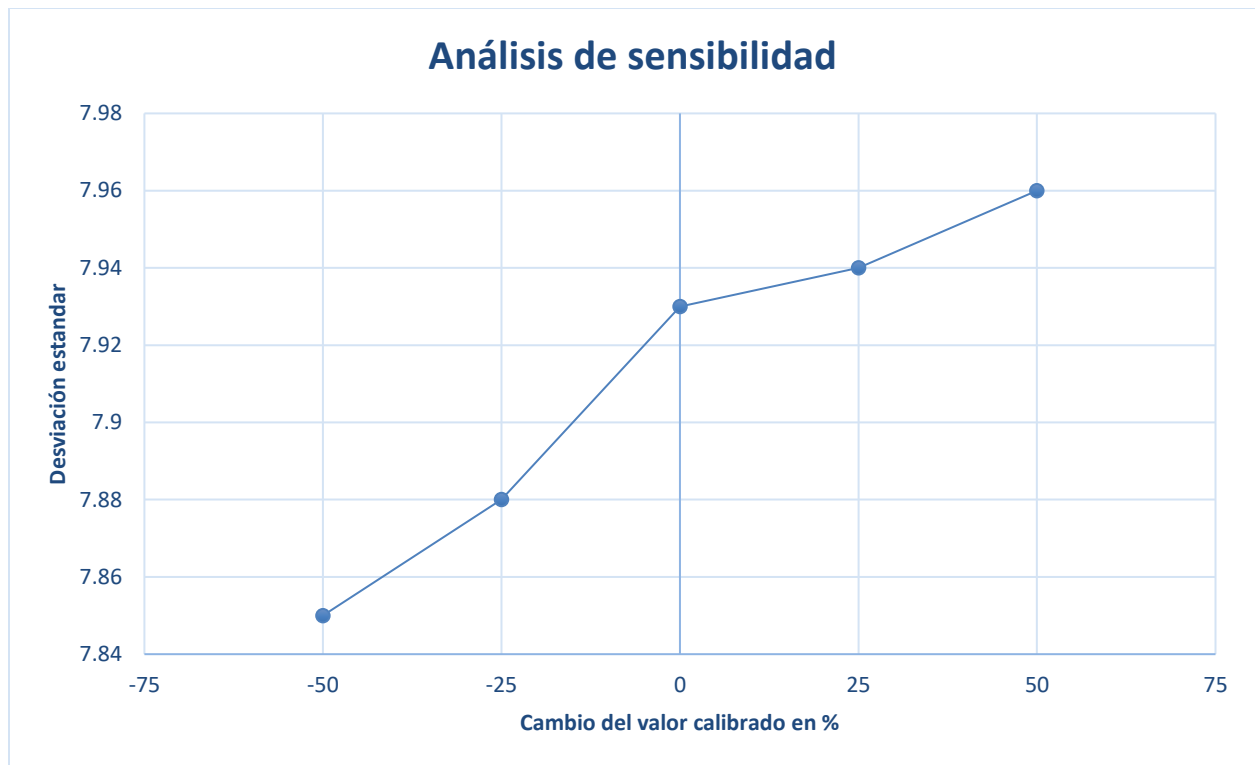
Para el proceso de validación se utilizó el año 2025, Figura 90, con un NRMS de 89.24 %, con un error de 31.09 m.



*Figura 90. Validación del modelo numérico, año 2025, día 11,428.*

El análisis de sensibilidad nos permite estudiar el comportamiento de las salidas del modelo ante la manipulación de los parámetros de entrada. Calibrado el modelo para los años 2005, 2007 y 2024; validado para el año 2025, se realizaron distintas corridas del modelo para evaluar la respuesta de este ante cambios en los valores de la conductividad hidráulica.

Se modificaron los valores de conductividad hidráulica mostrados en la Tabla 27, incrementándolos desde 25%, 50% y disminuyéndolos en la misma medida del valor original calibrado, seguidamente se evaluó el comportamiento del modelo en términos de la desviación estándar, en la Figura 91, se aprecia el comportamiento del modelo.



*Figura 91. Análisis de sensibilidad en porcentaje con respecto a la desviación estándar*

Se obtuvo que, al incrementar y disminuir los valores de la conductividad hidráulica en  $z$ , el modelo responde a la manipulación de los parámetros de entrada.

## IV. Evaluación ante escenarios futuros de aprovechamiento de agua subterránea

La implementación de un modelo numérico permite alimentarlo con información para conocer en el futuro las respuestas de los sistemas de flujo de agua subterránea de la región de estudio y así poder proponer alternativas. Con el modelo calibrado se desarrollaron dos escenarios futuros, con los que se pretende predecir el estado de los sistemas de flujo para el año 2040 y 2060; para poderlo comparar así con el modelo de Krienen (2018), esto supone 14 y 34 años más.

### IV.1. Modelación de escenarios futuros

#### IV.1.1 Escenario 1: Condiciones de extracción constante

En este escenario se utilizó el modelo resultado de la calibración, el cual cuenta con una extracción de agua subterránea estimada a partir de los aprovechamientos existentes, considerando que en el acuífero no se cuenta con disponibilidad según CONAGUA y no se permiten más concesiones. Se mantuvieron constantes el caudal de extracción, la recarga al acuífero y la entrada y salida de los flujos de agua subterránea para los años del escenario futuro.

#### IV.1.2 Escenario 2: Esquema de aprovechamiento en aumento tendencial

La información del REPDA (2024) nos permitió definir los pozos que se encuentran dentro del área de modelación, teniendo un total de 1,289 pozos de bombeo que se encuentran concesionados. Se considera el incremento tendencial siguiendo de la información del REPDA (2024), la tendencia de los años 2017 al 2024 (Figura 92), se presenta la ecuación de los caudales de extracción,  $y = 1.328x - 2576.5$ , considerando que en este periodo la pendiente es más constante.

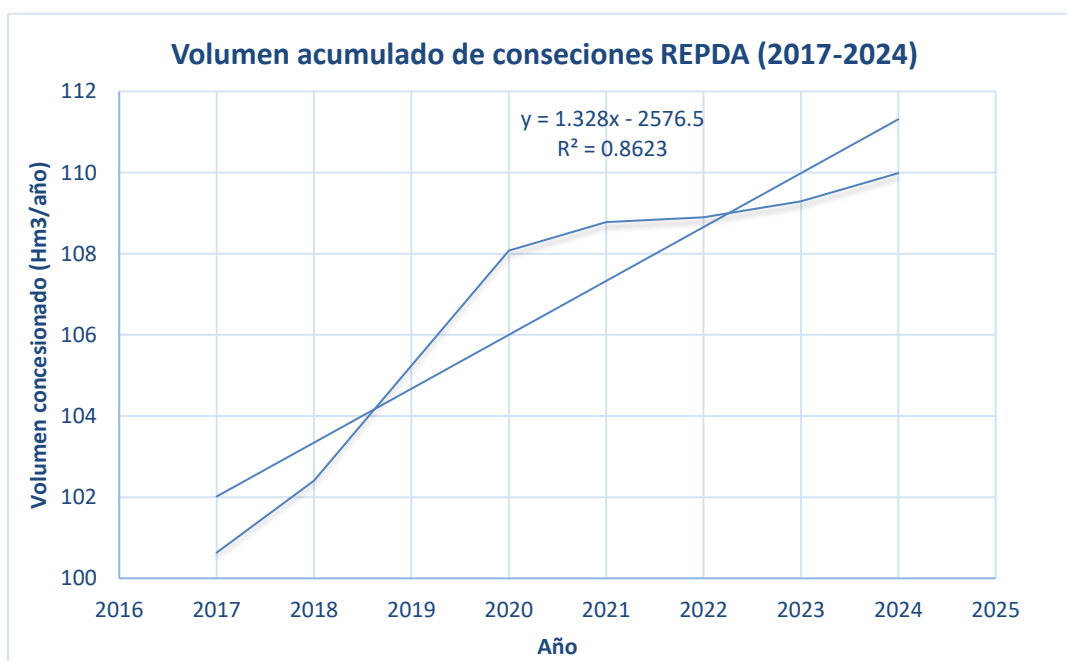


Figura 92. Volumen de extracciones acumulado del REPDA (periodo: 2017 al 2024)

## IV.2. Resultados de los escenarios futuros

### IV.2.1 Escenario 1. Resultado

Para el escenario número uno, la Figura 93, indica que los niveles de agua subterránea fluctúan entre 1680 y 1880 m.s.n.m. con diferentes direcciones.

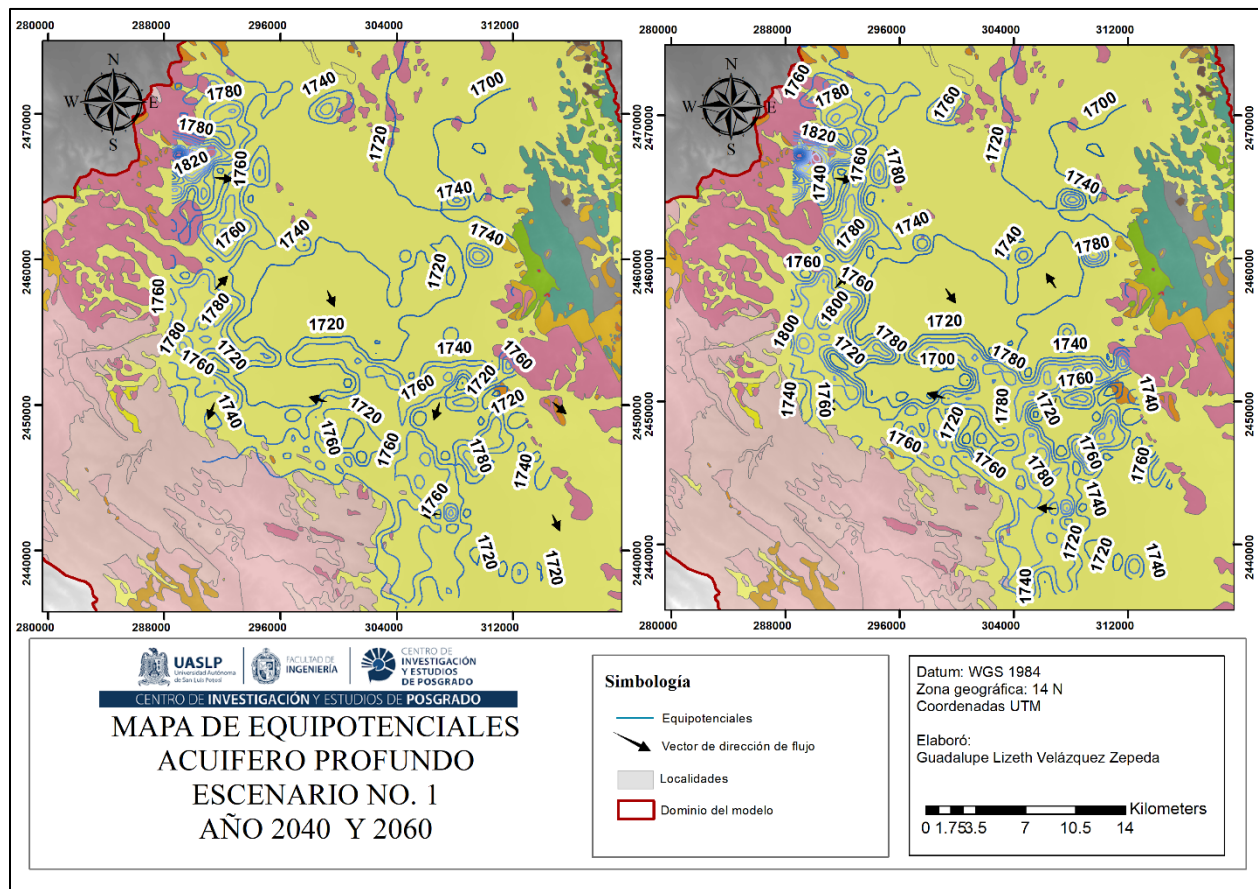


Figura 93. Equipotenciales Escenario 1, año 2040 y 2060

En la Figura 94, se aprecia que los abatimientos van de los 20 a los 50 m respecto a 2040 y 2060 en zonas muy específicas, sin embargo, se observa que existe un incremento general en el nivel que llega hasta los 70 m, en zonas particulares, considerando un nivel sin cambios en casi toda la parte central norte. Se observa que en las zonas de temperatura es donde se encuentra un incremento del nivel de agua, lo que indica que se ve influida por las entradas de flujo regional o condiciones de frontera lateral y vertical ascendente.

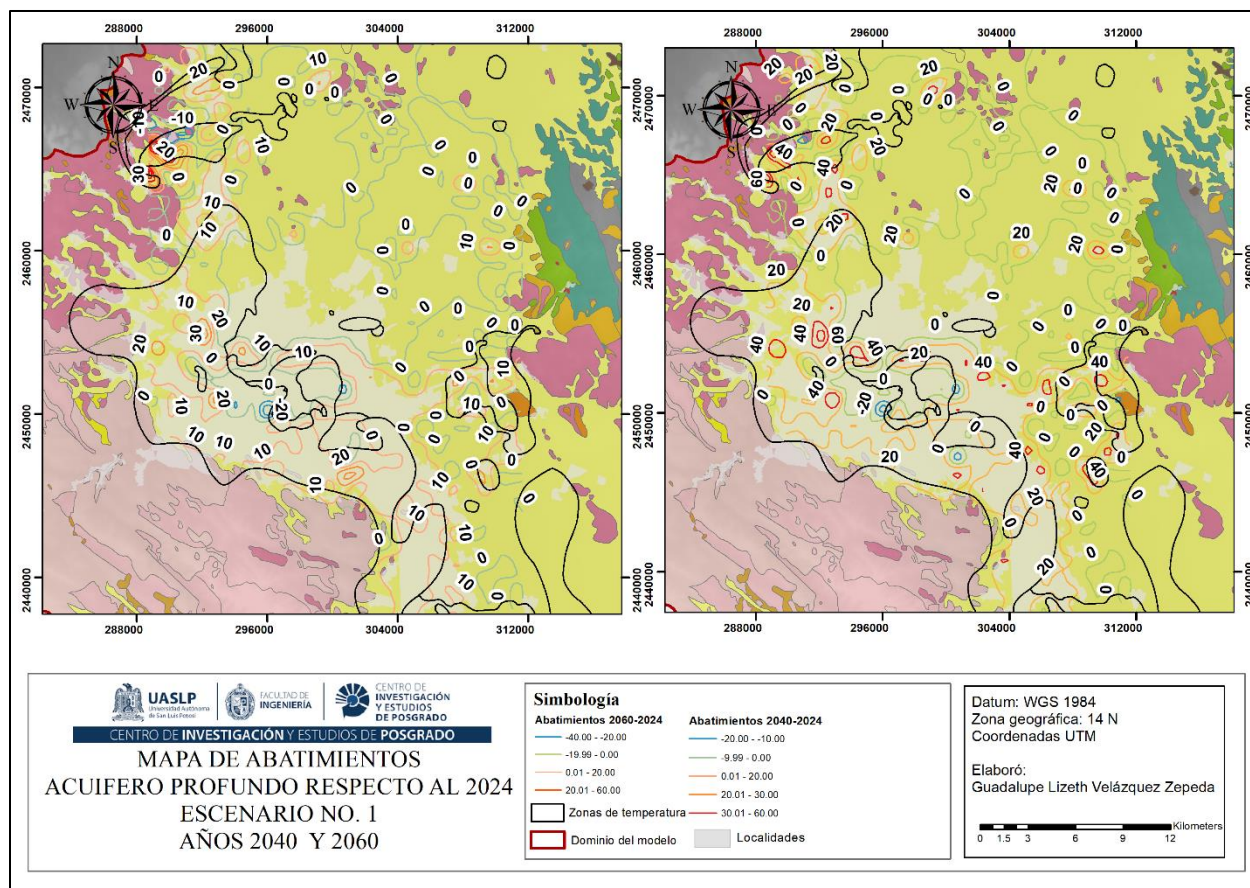


Figura 94. Abatimientos escenario 1, respecto al 2024, años 2040 y 2060

En la Tabla 28, el balance muestra que la extracción no cambió significativamente y que en las entradas por recarga se incrementó; esto se puede confirmar por la falta de información sobre el volumen de flujo regional que se presenta en la cuenca.

Tabla 28. Balance escenario 1.

| BALANCE ESCENARIO 1 |                    |                    |      |
|---------------------|--------------------|--------------------|------|
| Concepto            | Balance (A)        | Modelo (B)         | B/A  |
|                     | hm <sup>3</sup> /d | hm <sup>3</sup> /d | %    |
| Extracción          | 0.40               | 0.30               | 0.75 |
| Recarga             | 0.43               | 0.50               | 1.15 |

#### IV.2.2 Escenario 2. Resultado

La evaluación del escenario número dos, en la Figura 95, se observa que los niveles de agua subterránea van desde los 1680 a los 1880 m.s.n.m. para el año 2040; para el 2060 los niveles van de 1680 a 1900 m.s.n.m., con dirección de flujo variable.

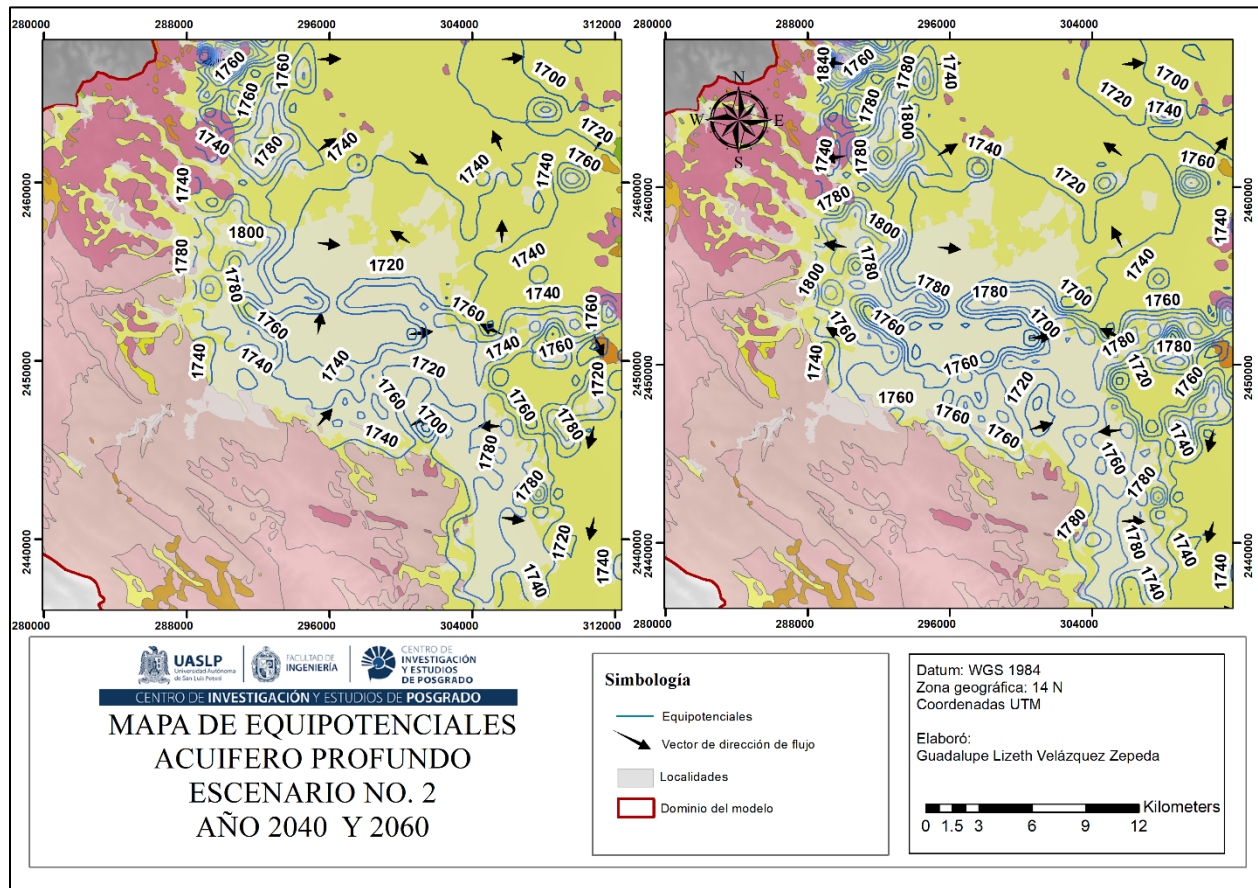


Figura 95. Equipotenciales Escenario no. 2 años 2040 y 2060.

En la Figura 96, se aprecia que los abatimientos van de los 40 m en ambos años en zonas muy específicas; sin embargo, se observa que existe un incremento general en el nivel que va de los 30 a los 60 m, en zonas particulares, considerando un nivel sin cambios en casi toda la parte central norte. Se observa que en las zonas de temperatura es donde se encuentra un incremento del nivel de agua, lo que indica que se ve influida por las entradas de flujo vertical ascendente; lo que contrasta con el descenso de niveles que se presenta, lo que nos indica que es necesario mejorar las entradas de flujo así como las extracciones.

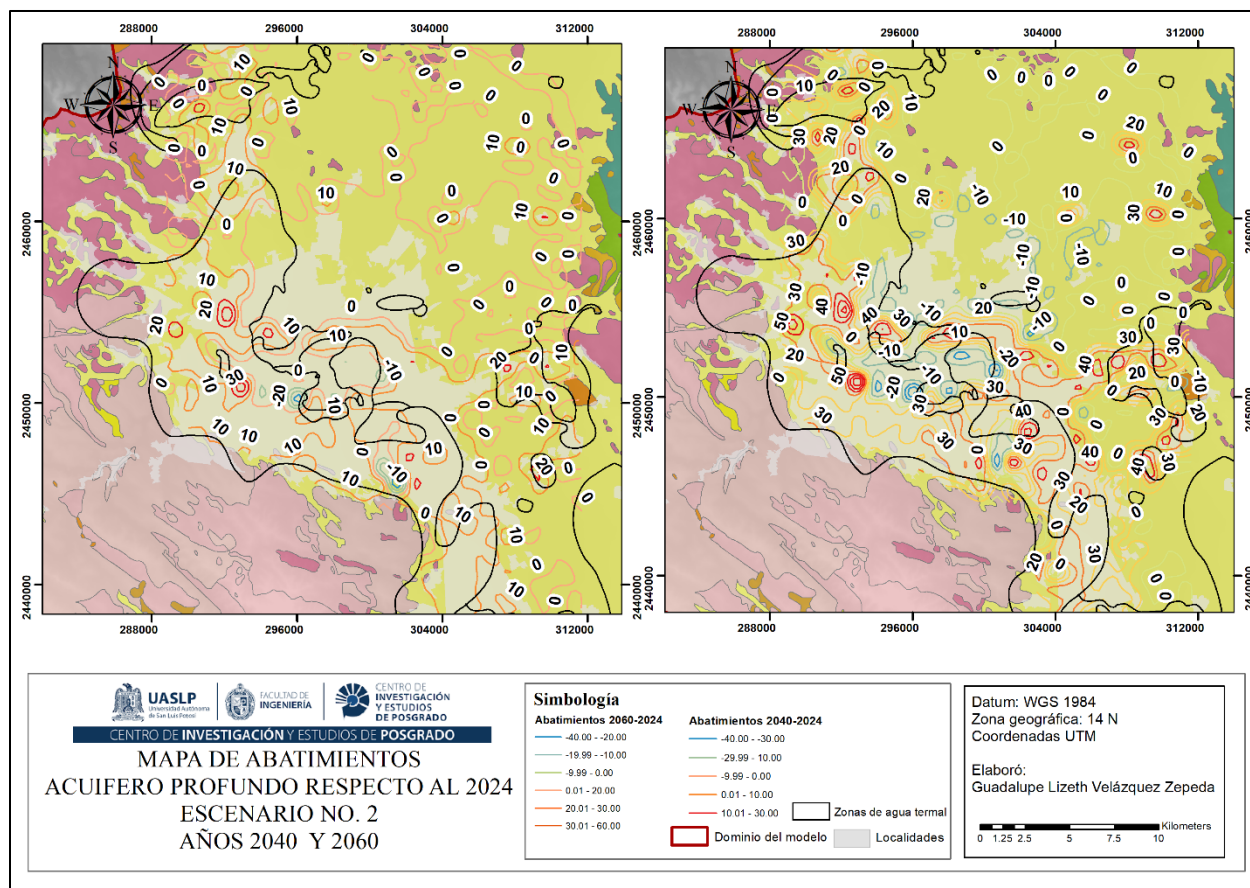


Figura 96. Abatimiento en el escenario no. 2, respecto al 2024, años 2040 y 2060.

En la Tabla 29, el balance muestra un aumento en la extracción, así como en la recarga.

Tabla 29. Balance escenario 2.

| BALANCE ESCENARIO 2 |                    |                    |      |
|---------------------|--------------------|--------------------|------|
| Concepto            | Balance (A)        | Modelo (B)         | B/A  |
|                     | hm <sup>3</sup> /d | hm <sup>3</sup> /d | %    |
| <b>Extracción</b>   | 0.40               | 0.47               | 1.17 |
| <b>Recarga</b>      | 0.43               | 0.59               | 1.36 |

## **V. Propuestas de estrategias de gestión sostenible**

Definir que son las estrategias de gestión sostenible de un acuífero o de las aguas subterráneas, que se dividen en tres ejes, mejorar la calidad de la información, el aprovechamiento sostenible y mejorar la calidad de agua.

### **V.1. Mejora la calidad de la información**

A continuación, se presenta una serie de estrategias que surgieron con base en la implementación del modelo:

- Es fundamental mejorar la calidad de la información generada, establecer programas periódicos para la obtención de datos en campo y laboratorio, procurando tener mínimo dos muestreos anuales.
- Realizar campañas de medición de parámetros fisicoquímicos de manera periódica y consistente, junto con la comprensión de la hidrogeoquímica y el monitoreo continuo de la calidad del agua subterránea, permitirá a las dependencias y organismos contar con mayor certeza sobre la calidad del recurso hídrico. Asimismo, de ser posible, se recomienda informar y explicar a la población la calidad del agua que se extrae, en función con el uso que se le da.
- Contar con un acervo de información digital accesible, así como con bases de datos de los sistemas de información geográfica (SIG) debidamente actualizadas, con el propósito de que dicha información pueda ser administrada y actualizada de manera continua y eficiente.
- Realizar investigaciones de carácter multidisciplinario, principalmente a escala regional, con la finalidad de fortalecer la comprensión y mejorar la gestión del agua de la cuenca y de los sistemas de flujo de agua subterránea.
- Considerar la teoría de los sistemas de flujo gravitacionales como un elemento fundamental en la gestión del agua, ya que la administración actual no la incorpora como base en los estudios de disponibilidad de agua del acuífero, no define zonas de recarga y descarga, no distingue entre los diferentes sistemas de flujo. Por ello, resulta necesario establecer una normativa que los contemple, así como promover la implementación de modelos numéricos como herramientas para una gestión más eficiente del recurso hídrico.
- Generar modelos que contemplen los procesos del ciclo hidrológico de manera completa, considerando el agua superficial y subterránea. El agua que recarga el acuífero en parte es la precipitación que se infiltra; un correcto balance permite disminuir la incertidumbre respecto a los volúmenes y permite comprender lo que sucede con el agua superficial. Esto puede considerarse en los planes de desarrollo urbano.
- Compilar la información de censos de aprovechamiento con información más completa, que permita conocer las características particulares del pozo, tipo de pozo, caudales, construcción, tiempos de funcionamiento, uso del agua, nivel de agua, etc. Identificar y formalizar los pozos que sean requeridos para tener una red actualizada de extracciones.

- Instalar medidores totalizadores de flujo para definir los caudales de extracción de los pozos, actualizar con esta información el censo. Colocar en los pozos de monitoreo medidores automáticos de niveles diarios cargados a un sistema de información digital que permita su utilización.
- Realizar pruebas de bombeo, con la finalidad de mejorar el conocimiento de los parámetros hidráulicos en toda la cuenca. En los recorridos en campo se encontraron ciertos pozos que a su lado tenían pozos deshabilitados los cuales podrían utilizarse como pozos de observación para la realización de pruebas de bombeo. Tales como los pozos M52 y M134.
- Las estrategias anteriores se encaminan a una generación continua y completa de información hidrológica, hidrogeoquímica e hidrogeológica, de tal manera que pueda utilizarse en la actualización de los modelos de flujo de agua subterránea, lo que permite hacerlos más robustos y poder tener proyecciones más precisas.
- Mejorar la estrategia de monitoreo de niveles de acuerdo con las visitas en campo se recopiló una serie de pozos que por su distribución espacial son de ayuda para un monitoreo constante. Aunque algunos de ellos no se realizó la visita de campo, se sugiere realizar la visita y evaluar su viabilidad. Cabe señalar que otros de los pozos sí son pozos de observación, habilitados con este propósito. En la Figura 97, se puede apreciar la diferencia de medir entre un pozo con línea guía y otro en el que no. Considerando la posibilidad de colocar medidores automáticos, se recomienda hacerlo en pozos de observación, debido a que los que tienen guía esta se comprime con la guía e imposibilita la medición, en las que esta se encuentra en el mismo sitio que los cables de las bombas sumergibles se enreda el cable en ellos evitando llegar al nivel o extraer el cable. En las de bomba vertical es más complicado porque la mayoría estaban en mal estado tirando agua o aceite, lo que afecta la medición. En la Figura 98, se muestran los pozos y la Tabla 30 no indica las ubicaciones y nombres de los mismos.



Figura 97. Comparativa entre las mediciones de niveles.

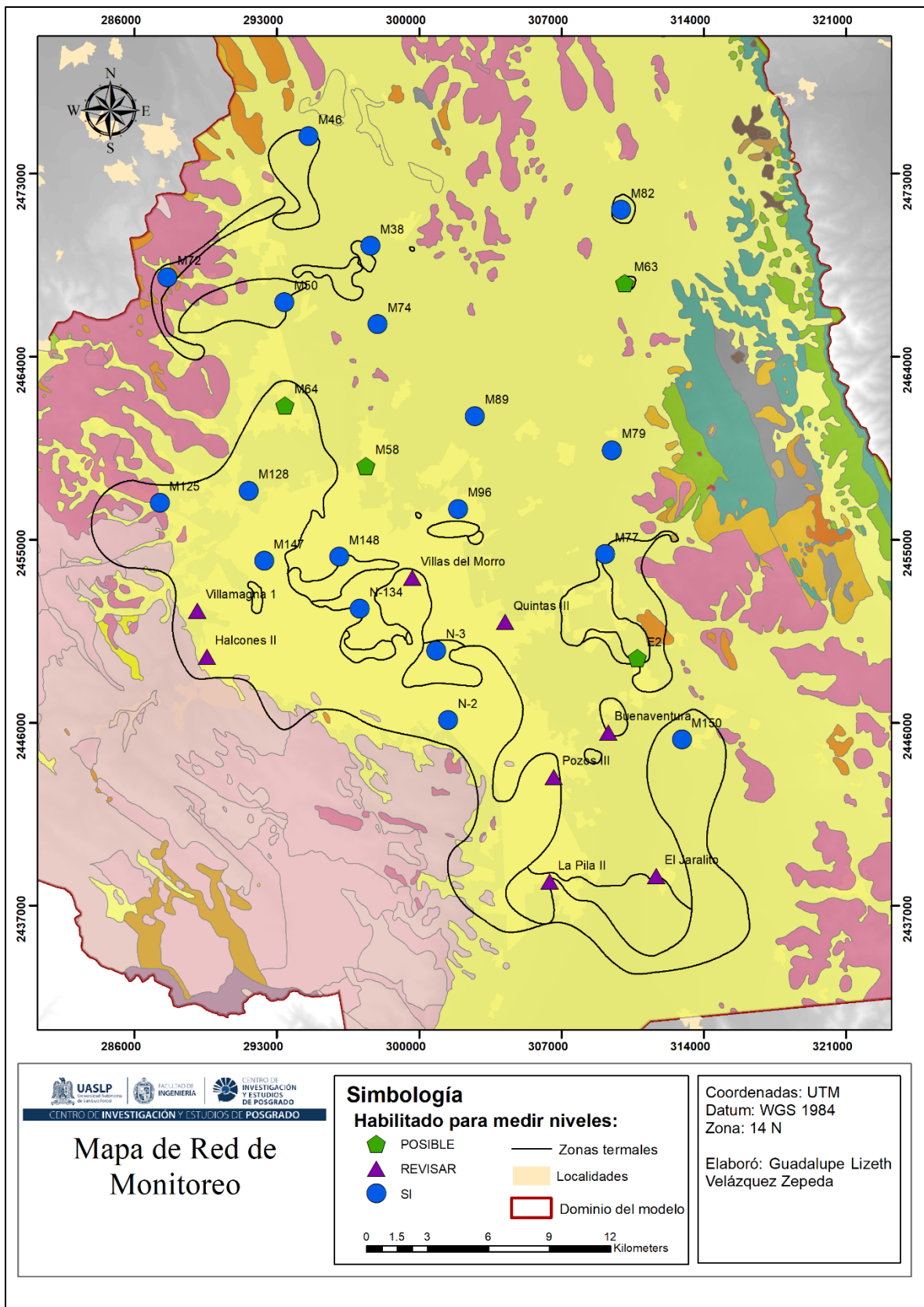


Figura 98. Mapa de red de monitoreo del muestreo 2024 - 2025.

Tabla 30. Red de monitoreo de pozos, muestreo 2024-2025.

| NO. | NOMBRE           | X      | Y       | HABILITADO |
|-----|------------------|--------|---------|------------|
| 1   | E2               | 310747 | 2449170 | POSIBLE    |
| 2   | M38              | 297612 | 2469444 | SI         |
| 3   | M46              | 294559 | 2474834 | SI         |
| 4   | M50              | 293378 | 2466676 | SI         |
| 5   | M58              | 297396 | 2458618 | POSIBLE    |
| 6   | M63              | 310127 | 2467612 | POSIBLE    |
| 7   | M64              | 293421 | 2461602 | POSIBLE    |
| 8   | M72              | 287626 | 2467901 | SI         |
| 9   | M74              | 297966 | 2465589 | SI         |
| 10  | M77              | 309158 | 2454279 | SI         |
| 11  | M79              | 309498 | 2459386 | SI         |
| 12  | M82              | 309943 | 2471216 | SI         |
| 13  | M89              | 302756 | 2461067 | SI         |
| 14  | M96              | 301925 | 2456500 | SI         |
| 15  | M125             | 287252 | 2456805 | SI         |
| 16  | M128             | 291631 | 2457400 | SI         |
| 17  | M147             | 292384 | 2453950 | SI         |
| 18  | M148             | 296090 | 2454154 | SI         |
| 19  | M150             | 312934 | 2445172 | SI         |
| 20  | N-2              | 301436 | 2446120 | SI         |
| 21  | N-3              | 300853 | 2449541 | SI         |
| 22  | N-134            | 297078 | 2451593 | SI         |
| 23  | Villas del Morro | 299683 | 2453135 | REVISAR    |
| 24  | Quintas III      | 304251 | 2450957 | REVISAR    |
| 25  | El Jaralito      | 311673 | 2438463 | REVISAR    |
| 26  | La Pila II       | 306444 | 2438191 | REVISAR    |
| 27  | Halcones II      | 289578 | 2449246 | REVISAR    |
| 28  | Buenaventura     | 309329 | 2445527 | REVISAR    |
| 29  | Pozos III        | 306648 | 2443335 | REVISAR    |
| 30  | Villamagna 1     | 289110 | 2451517 | REVISAR    |

## **V.2 Aprovechamiento sostenible**

Para garantizar un modelo sostenible del uso del agua en la región se debe considerar como un conjunto complejo y dinámico de factores que involucran la gestión. Para lograrse un aprovechamiento sostenible, se requiere una combinación de estrategias, acciones, cambios de paradigmas, legislación y costumbres en la población y los entes públicos, académicos y privados, así como la vigilancia constante para el cumplimiento de éstas.

Algunas de las propuestas en el caso del San Luis Potosí son:

- Utilizar el modelo actual (sujeto a constante actualización) como una herramienta para la gestión del aprovechamiento de agua subterránea con una perspectiva de sostenibilidad.
- Definir por zonas el tipo de uso que se le da al agua; actualmente, se busca dotar a la población de los pozos inmediatos a esta. Sin embargo, se deben considerar los parámetros de calidad de agua y el caudal de estos pozos. Por ello, es fundamental estudiar las zonas de mejor calidad y realizar proyectos factibles económica y socialmente.
- Restauración de un Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) que colabore en la vigilancia y cumplimiento de las concesiones. Integrado por usuarios del agua subterránea y de diferentes áreas, con el fin de tener un enfoque multidisciplinario.
- Implementar programas informativos y educativos de la importancia del agua subterránea, su calidad, el aprovechamiento consciente y responsable del agua y las afectaciones a la salud que implica su deficiente tratamiento.
- En el caso de los sitios agrícolas, priorizar las concesiones en zonas con menores abatimientos, realizar programas de restauración de cuencas que apoyen la infiltración en zonas de recarga. Mejorar los sistemas de abastecimiento y riego, tecnificando las unidades de cultivo donde se requiera, evitando el uso de agua sin tratar para el riego y la infiltración de la misma.
- Mejorar los sistemas de abastecimiento público e industrial, evitando fugas y desperdicio de agua, lo que disminuirá el minado de agua al subsuelo y su contaminación.
- Tener un acervo de información de las obras de recarga implementadas y ejecutar nuevas obras para aumentar la infiltración en zonas donde sea factible. Estableciendo un calendario de monitoreo, así como el presupuesto para realizarlo, buscando que las comunidades aledañas participen.

### **V.3 Mejorar la calidad del agua**

Como ya lo han mencionado diversos autores en sus recomendaciones, es de suma importancia tomar cartas en el asunto del agua residual y su interacción con el agua subterránea, así como en el tratamiento del agua subterránea que se extrae de las zonas termales y presenta contaminación por F<sup>-</sup> y As. Algunas de las recomendaciones que se reiteran son:

- Tratamiento eficiente de las aguas residuales, realizando estudios técnicos y económicos adecuados, modificando la forma convencional de saneamiento y reúso.
- Mejorar los sistemas de saneamiento y colectores de aguas residuales, de ser posible, cambiarlos por sistemas más eficientes y naturales de bajo mantenimiento.
- Tener un control de la calidad en el agua aplicada a los cultivos irrigados con agua residual, evitar que se utilice cuando no se encuentra en los límites permisibles.
- Cierre adecuado de los pozos deficientemente contruidos o abandonados.
- Instalación de sistemas de reutilización y tratamiento del agua en zonas industriales.

## Conclusiones

Los objetivos del estudio comprendieron 1) establecimiento del modelo conceptual con la información, 2) implementación y validación del modelo, 3) desarrollo de los escenarios futuros y, finalmente, 4) la evaluación de los resultados, así como sus propuestas.

Previamente, se recopiló toda la información necesaria para elaborar el modelo conceptual, lo cual presentó un trabajo arduo debido a que la mayoría de la información no se encontraba digitalizada o contaba con la calidad requerida. En este proceso, se digitalizó la información del REPDA correspondiente a los aprovechamientos, así como el mapa de geológico. En cuanto a la información de las estaciones meteorológicas, fue necesario realizar un tratamiento previo de los datos para su correcta utilización.

La recopilación de la información en campo también conllevó mucho esfuerzo, debido a la distribución tan extendida de los pozos y la accesibilidad a ellos por parte de los dueños y de las condiciones del entorno. En ocasiones se caminaban grandes distancias para llegar a pozos inexistentes o ya en desuso, en otras se impedía el acceso y en muchos casos la recopilación de los niveles fue imposible.

El trabajo de laboratorio fue consistente, se trabajaba a la par que el muestreo con la finalidad de que las muestras no estuvieran tanto tiempo refrigeradas y que los resultados fueran lo más representativos de las condiciones del sitio. Con los resultados de toda esta información se estableció el modelo conceptual, que si bien es una réplica del previamente establecido por Krienen (2018), este contempla los resultados de los datos hidrogeoquímicos, una reinterpretación de la geología y un balance hídrico actualizado.

Como parte del objetivo dos, se implementó el modelo numérico considerando la geología, las fallas geológicas, las unidades hidroestratigráficas correspondientes a sus propiedades, con el modelo de elevaciones, siguiendo la morfología de la cuenca y aplicando los resultados obtenidos del muestreo hidrogeoquímico (en este caso las zonas de agua termal). Se realizaron los balances hídricos para definir los volúmenes de entrada. Así mismo, se alimentó el modelo con los datos históricos de bombeo registrados en el REPDA; en la implementación de los balances hidrológicos a nivel de la cuenca se consideraron la entrada vertical ascendente de flujo regional y la recarga artificial.

Se aprecia que se consideraron más variables que en modelos anteriores, como se mencionó en la Tabla 24; para cumplir con el objetivo se realizó la calibración del modelo considerando los datos de los años 2005, 2007, 2024 y se validó con el 2025; si bien en los primeros años resultó en una calibración con un 90% de similitud, en los siguientes años disminuye el valor por la falta de datos para la calibración, resultando la validación con un 11% de similitud. Se realizó el análisis de sensibilidad considerando cambios en la conductividad hidráulica vertical (z) de todo el modelo y se aprecia en la Figura 91, como este es sensible a los cambios.

Para el objetivo tres, se desarrollaron dos escenarios futuros, en el primero se implementó una extracción constante, considerando los valores del año 2025. En el segundo se realizó un incremento siguiendo la tendencia del periodo 2017-2024 con un 1.3 % anual, considerando que a pesar de que el acuífero se encuentra en veda se siguen proporcionando concesiones. Ambos

escenarios se implementaron para los años 2040 y 2060. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que no son concluyentes debido al incremento de nivel por la entrada de flujo vertical y lateral de las cuales se desconoce su caudal y almacenamiento. Sin embargo, en ambos se aprecia un abatimiento (entre 20 y 50 m) en la zona centro de la zona metropolitana.

Es importante recalcar que este estudio colaboró para tener información sobre la calidad del agua subterránea para uso y consumo humano siguiendo la norma 127, se corrobora la contaminación geogénica proveniente del flujo regional. Es importante resaltar que las concentraciones se irán incrementando a medida que lo haga la extracción de agua subterránea.

Respecto a los balances hídricos se aprecia que, aunque el volumen de extracción se incremente, mientras se desconozca la dinámica de funcionamiento del flujo vertical ascendente proveniente del flujo regional, así como los volúmenes que realmente se infiltran al acuífero, será muy complicado tener un modelo que represente fielmente la realidad. Otro factor a considerar es la incertidumbre de los datos del REPDA, pues si bien son datos oficiales, se apreció en campo como en ciertos pozos se extraía mucho más respecto a lo que se tenía registrado.

Con base en la experiencia del proceso de este estudio se plantearon diferentes estrategias que se mencionaron en el capítulo anterior; a continuación, se mencionan algunas recomendaciones particulares para la continuación de este modelo.

### **Limitaciones del modelo**

Aunque se trabajó arduamente en este estudio, algunas variables no se lograron concretar de la manera esperada, en este caso fueron:

- La condición de frontera del modelo. Existe un debate respecto a la forma de establecer la entrada de flujo vertical regional del modelo. Como se mencionó, se aplicó una condición de frontera constante de 1720 m; sin embargo, en los escenarios futuros se observa que este valor no representa adecuadamente la realidad, conforme disminución de los niveles que se presentan en la zona metropolitana.
- La entrada de flujo lateral del modelo. Existe una gran incertidumbre respecto al comportamiento del flujo, así como su ubicación y caudal. Esta condición se aplicó en la zona norte del modelo, con un valor inicial de 0.00495 m/d.
- La veracidad del volumen de extracción. En principio, no se cuenta con datos correspondientes a años previos a 1994. Además, el REPDA maneja una base de datos desactualizada y, como se mencionó, no fue posible visitar cada uno de los pozos ni medir el caudal de los más de 1,000 que se tienen registrados. Sin embargo, en los que se pudo realizar la medición y cuyas coordenadas coincidían con las del pozo registrado, se llevó a cabo una comparativa, identificándose que el volumen de agua extraído es mayor al establecido en la concesión.
- Los balances hídricos superficiales. Aunque se trabajó el balance de forma completa y para un periodo consistente de años, persiste la incertidumbre respecto al caudal de infiltración, debido a la falta de información sobre las áreas de infiltración y a la heterogeneidad de la cuenca.

- Los balances hídricos subterráneos. Se consideraron porcentajes provenientes de estudios previos; sin embargo, sería pertinente realizar un análisis actualizado para corroborar si estos se han mantenido constantes o si, por el contrario, se han incrementado.
- Las mediciones de niveles para la calibración del modelo. Para la calibración de los años 2024 y la validación de 2025, únicamente se consideraron 5 pozos para cada año, lo cual representa una limitación importante y contribuye a la deficiencia del proceso de calibración del modelo.
- Un amplio rango de valores de conductividad hidráulica. Debido a la falta de información de niveles en los años recientes, se consideró un rango muy amplio de conductividades. Asimismo, la ausencia de información reciente sobre las propiedades de las unidades hidrogeológicas contribuyó a esta incertidumbre.

## **Recomendaciones**

Cabe resaltar que este modelo constituye el preámbulo de un proceso de mejora continua, ya que permite visualizar el panorama general a una escala regional. En este sentido, resulta relevante implementar mejoras tanto en la generación de información como en los procesos de gestión.

En este contexto, se resalta la importancia de mejorar las estimaciones del balance hídrico subterráneo, así como realizar un mayor número de pruebas que permitan comprender la dinámica de las entradas de flujo vertical ascendente. Asimismo, podría plantearse como un caso de estudio la velocidad a la que se está extrayendo el agua de las zonas termales y la edad a la que corresponde dicho recurso.

Otro aspecto relevante a revisar son los niveles piezométricos de los pozos. Es importante resaltar que, al contar con información de pozos adecuadamente distribuidos en el espacio, el modelo presentaría una mayor confiabilidad en la simulación de escenarios futuros. Por el momento los resultados no son concluyentes debido a las limitaciones previamente mencionadas.

En este trabajo se identificó la dificultad para obtener información por parte de las dependencias encargadas del control de las aguas subterráneas en el país, así como la escasa actualización de dicha información. Incluso, algunos registros de pozos del REPDA no correspondían al territorio nacional y únicamente se dispone de datos a partir de 1994.

Otro punto relevante es que, aunque el acuífero se encuentra bajo veda, no se han restringido las concesiones; por el contrario, los datos disponibles muestran la asignación de nuevas concesiones de manera anual.

Durante el trabajo de campo se identificó la imposibilidad de medir los niveles de agua en diversos pozos. En algunos casos, el estado antiguo y obsoleto de las estructuras impedía siquiera intentar la medición; en otros, pozos que ya no se encontraban en uso carecían de un cierre o inhabilitación adecuados, lo que permite la entrada de contaminantes y representa un riesgo potencial a la población.

## Referencias

- Aguirre García, G. J. (2022). Acciones precautorias para el acuífero de San Luis Potosí: Efectivización de derechos humanos, considerando los conocimientos de los afectados ambientales [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Almazan Tovar, O. G. (2015). Índices de calidad del agua y vulnerabilidad acuífera de un sistema hidrogeológico: Caso valle de San Luis Potosí. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Almazan Tovar, O. G. (2021). La percepción remota y la simulación numérica para la caracterización y manejo integral de acuíferos [Tesis de doctorado]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Amuzurrutia-Valenzuela, D., Aguirre-Salado, C., & Sánchez-Díaz, G. (2015). ¿Hacia dónde crecerá la ciudad de San Luis Potosí (México) después de 2009? EURE, 41(124), 113–137.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). Fundamentos de hidrología de superficie. LIMUSA.
- Barboza Gudiño, J. R., Aguillón Robles, A., Almaguer Rodríguez, J. de L., Barajas Araujo, F., Borselli, L., Díaz Bravo, B. A., García Arreola, M. E., Guevara Betancourt, R. E., Labarthe Hernández, G., López Doncel, R. A., Ocampo Díaz, Y. Z. E., Rodríguez Sedano, L. A., Padilla Sánchez, L., Sarocchi, D., Saucedo Girón, R., Torres Hernández, J. R., Torres Rivera, S., Torres Sánchez, S. A., & Tristán González, M. (2025). Geología del estado de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Camargo Castro, E. M. (2021). Análisis espacio-temporal de la calidad de agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí [Tesis de maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.
- Campos Aranda. (1998). Procesos del ciclo hidrológico (Universidad Autónoma de San Luis Potosí). Universitaria Potosina.
- Campos Aranda, D. F. (2010). Introducción a la Hidrología Urbana.

- Cardona, A., Banning, A., Carrillo-Rivera, J. J., Aguillón-Robles, A., R. Rüdé, T., & Aceves de Alba, J. (2018). Natural controls validation for handling elevated fluoride concentrations in extraction activated Tóthian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. Springer.
- Cardona Benavides, A. (2007). Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la mesa central: Reacciones, procesos y contaminación [Tesis de doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Carrillo Rivera, J. J., & Cardona, A. (2016). Chapter 50 Control of Deteriorating Water Quality in Extracted Boreholes by Flow Systems Definition. En Geostatistical and Geospatial Approches for the Charcterization of Natural Resources in the Environment. Capital Publishing Company.
- CONAGUA. (2015). Manual de monitoreo piezométrico de acuíferos.
- CONAGUA. (2019). Estadísticas del Agua en México, 2019.
- CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero San Luis Potosí (2411), estado de San Luis Potosí.
- CONAGUA. (2021). Estadísticas del Agua en México 2021.
- CONAGUA. (2024). Consulta a la base de datos del REPDA.  
<https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx>
- CONAGUA. (2025). Información Estadística Climatológica.  
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- DOF. (1993). NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos sanitarios para el muestro de agua para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua publicos y privados. Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2001a). NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua—Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas—Método de prueba

- (Canela a la NMX-AA-036-1980). Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2001b). NMX-AA-072-SCFI-2001. Análisis de agua—Determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas—Método de prueba (Canela a la NMX-AA-072-1981). Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2001c). NMX-AA-073-SCFI-2001. Análisis de agua—Determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas—Método de prueba (Canela a la NMX-AA-073-1981). Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2001d). NMX-AA-077-SCFI-2001. Análisis de aguas—Determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (Canela a la NMX-AA-077-1982). Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2001e). NMX-AA-079-SCFI-2001. Análisis de aguas—Determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas—Método de prueba (Canela a la NMX-AA-079-1986). Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua-Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas—Método de prueba (Canela a la NMX-AA-034-SCFI-2001). Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2016). NMX-AA-008-SCFI-2016. Análisis de agua- Medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba- Canela a la NMX-AA-008-SCFI-2011. Diario Oficial de la Federación.
- DOF. (2022). NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Diario Oficial de la Federación.
- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Beldemar Méndez, A., Mendoza Reséndiz, A., Arganis Juárez, M. L., & Carrizosa Elizondo, E. (2008). Manual del modelo para pronóstico de escurrimiento. UNAM.
- García, E. (2001). Distribución de la precipitación en la república mexicana. INEGI.
- Grupo Banco Mundial. (2024). Agua.

- <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview#:~:text=Alrededor%20de%20200%20millones%20de,b%C3%A1sicas%20para%20lavarse%20las%20manos>
- Grupo Universitario del Agua. (2025). Agenda hídrica, de la Zona Metropolitana de San Luis Potosí, Región Centro. UASLP.
- Heiming, A. (2016). Numerical modeling with vertical flow component of the deep aquifer in the graben of San Luis Potosí, Mexico. RWTHAACHEN.
- Hergt, T. (2009). DISEÑO DE REDES DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA DE LOS SISTEMAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL ACUÍFERO 2411 “SAN LUÍS POTOSÍ”: HACIA UN MANEJO SUSTENTABLE. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Hernández Constantino, N. A. (2020). Evaluación de la disponibilidad y demanda de agua, en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí [Tesis de maestría].
- IMCO. (2023). Aguas en México, ¿Escasez o mala gestión? Instituto Mexicano para la Competitividad A. C.
- IMPLAN. (2018). Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de San Luis Potosí, SLP PDUCP-SLP 2050.
- INEGI. (2004). Guía para la interpretación de cartografía.
- INEGI. (2017). Guía para la interpretación de cartografía Uso del Suelo y Vegetación.
- INEGI. (2021). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional). <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250s7gw.html>
- INEGI. (2024a). Usa la estadística y la geografía para descubrir México. Dinámica de la población. Cuéntame de México Sección educativa. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/poblacion/dinamica.aspx?tema=me&e=24>
- INEGI. (2024b). Usa la estadística y la geografía para descubrir México. Número de habitantes. [https://cuentame.inegi.org.mx/descubre/conoce\\_tu\\_estado/tarjeta.html?estado=24](https://cuentame.inegi.org.mx/descubre/conoce_tu_estado/tarjeta.html?estado=24)

INIFAP, & CONABIO. (1995). Edafología.

<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/eda251mgw.html>

Interapas. (2013). Gestión del agua en la zona metropolitana de San Luis Potosí, Cerro de San Pedro y Soledad de Graciano Sánchez 2013.

INTERAPAS. (2024). Informe anual 2024.

Jarquín Yáñez, L. del C. (2019). Polimorfismos genéticos asociados a enfermedades óseas y fluorosis dental en población expuesta a flúor a través del agua de consumo [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Jovanovic, N., DB Bugar, R., Tredoux, G., Sumaya, I., Bishop, R., & Marinus, V. (2017, enero 1). Hydrogeological modelling of the Atlantis aquifer for management support to the Atlantis Water Supply Scheme. 43(1).

Kohn Ledesma, I. A. (2009). Modelo de flujo del acuífero de San Luis Potosí, SLP [Tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Krienen, L. (2018). Understanding deep groundwater flow systems to contribute to a sustainable use of the water resource in the Mexican Altiplano [Tesis de doctorado]. RWTH Aachen.

Lillo, J. (2003). Peligros geoquímicos: Arsénico de origen natural en las aguas.

López Álvarez, B. (2012). Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

López Álvarez, B. (2021). Agua subterránea, un recurso oculto. El caso del acuífero del Valle de San Luis Potosí.

Mex Meneses, J. E. (2023). Evaluación de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante la implementación de un modelo numérico en la región centro-sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Moore, J. E., Zaporozec, A., & Mercer, J. W. (2005). Una introducción al Agua Subterránea

- (Folleto Técnico No. 128). Instituto de Geología, UASLP.
- Morán Ramírez, J., Almazan Tovar, O. G., & Ramos Leal, J. A. (2020). El agua en el Valle de San Luis Potosí. Glosa, Revista de Divulgación, 8(14), 31–33.
- Padilla Díaz, J. (2024). Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera, Zacatecas como herramienta de actualización y mejora [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Price, M. (2007). Agua Subterránea. LIMUSA, NORIEGA EDITORES.
- Rangel Sánchez, N. E. (2020). Optimización dinámica aplicada al acuífero de la zona conurbada de San Luis Potosí [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ruiz Torres, C. A. (2015). Estudio magnetométrico para la identificación de las estructuras en el subsuelo del Valle de San Luis Potosí, S.L.P. [Trabajo recepcional]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Sabinfosistem. (2005). Actualización hidrogeológica de los acuíferos de Ceballos y Oriente Aguanaval, Estado de Durango, Villa de Arista y San Luis Potosí, Estado de San Luis Potosí, Estado de SLP. [Reporte interno solicitado por CONAGUA]. CONAGUA.
- UNESCO. (2022). Aguas subterráneas, Hacer visible el recurso invisible.

## **Apéndice digital**

A continuación, se presenta un índice del apéndice del presente trabajo.

1. Balance hídrico superficial.
  - 1.1. Estaciones meteorológicas
  - 1.2. Precipitación
  - 1.3. Temperatura
  - 1.4. Balances hídricos superficiales (1970-2024)
2. Balance hídrico subterráneo
  - 2.1. Extracciones de agua subterránea del REPDA
  - 2.2. Recarga
  - 2.3. Balance hídrico subterráneo
3. Hidrogeoquímica
  - 3.1. Datos de campo
  - 3.2. Datos de laboratorio
  - 3.3. Interpretación
4. Geología
  - 4.1. Digitalización de la geología
  - 4.2. Unidades hidrogeológicas
  - 4.3. Fallas
5. Piezometría
  - 5.1. Medición de niveles
  - 5.2. Equipotenciales
6. Implementación en FEFLOW
  - 6.1. Modelo calibrado
  - 6.2. Escenario 1
  - 6.3. Escenario 2