



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

**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**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

Jorge Elohin Mex Meneses

Asesor:

Dr. Hermann Rocha Escalante

San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2023





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

**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**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestro en Tecnología y Gestión del agua

Presenta:

Jorge Elohin Mex Meneses

Asesor:

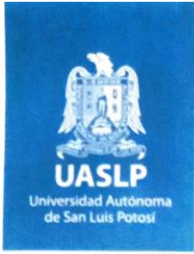
Dr. Hermann Rocha Escalante

Comité Tutorial:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Dr. Rodolfo Cisneros Almazán





16 de marzo de 2023

**ING. JORGE ELOHIN MEX MENESES
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hermann Rocha Escalante**, *Asesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 16 de marzo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“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”

Introducción.

1. Estado del arte sobre modelación numérica de acuíferos
2. Características del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.
3. Estudio hidrológico y balance hídrico
4. Evaluación de la variabilidad climática
5. Implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas
6. Evaluación ante los escenarios actual y futuros
7. Recomendaciones sobre el manejo de extracciones

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E

**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR.**



www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn.

“UASLP, más de un siglo educando con autonomía”

Agradecimientos

A Dios por permitirme la experiencia de cursar una maestría tan lejos de casa y por nunca dejarme solo.

A Jessica por ser mi compañera de vida, por su apoyo incondicional, paciencia y comprensión durante esta etapa, muchas gracias.

Al Dr. Hermann por su apoyo en la revisión del documento, por las retroalimentaciones y por su ayuda con los trámites de titulación.

Al Dr. Cardona por sus sabios consejos aportados para la mejora del documento.

Al Dr. Cisneros por su aportación a la mejora del documento desde su perspectiva.

A la empresa DHI Water & Environment por facilitarme la licencia del software FEFLOW para la elaboración del modelo.

Al antes CONACYT, por la beca número 804940 otorgada durante estos dos años.

A la Comisión Nacional del Agua Dirección Local San Luis Potosí por proporcionarme información sobre las estaciones climatológicas y la base de datos del REPDA.

Dedicatoria

Este trabajo lo dedico con mucho orgullo y respeto a todas las personas se identifican como parte de la comunidad indígena Maya, en especial para aquellos que tristemente han sufrido algún tipo discriminación.

A Jessica por siempre creer en mis capacidades, por nunca dejarme solo y acompañarme en esta aventura.

A mi Madre por siempre darme su amor incondicional.

A mi Padre por inculcarme desde pequeño el hábito del estudio.

A chata y taco, por ser la alegría del hogar aún en los peores días.

Tabla de contenido

Introducción.....	9
Problemática	12
Justificación.....	13
Hipótesis	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	16
Metodología	16
1.- Estado del arte sobre modelación numérica de acuíferos	19
1.1 Aspectos teóricos de la modelación numérica de sistemas de flujo subterráneo	20
1.1.1 Método de diferencias finitas (DF)	22
1.1.2 Método de elemento finito (EF)	23
1.2 Aplicación de los modelos numéricos a nivel nacional y mundial	24
1.3 Modelo numérico previo en la región de estudio.....	28
2.- Características del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.	31
2.1 Localización	32
2.1.1 Situación administrativa	32
2.1.2 Localización geográfica.....	32
2.1.3 Delimitación de la Región Centro-Sur	32
2.2 Clima	35
2.3 Fisiografía	37
2.4 Geomorfología	41
2.5 Hidrología superficial.....	43
2.6 Edafología.....	47
2.7 Usos del suelo y vegetación.....	49
2.8 Geología regional.....	51
2.9 Estratigrafía.....	54
2.9.1 Granito Peñón Blanco (Tgr)	54

2.9.2 Andesita-Limolita (TRs Ji A-Lm) Formación Nazas.....	54
2.9.3 Caliza (Jo Cz) Formación Zuloaga.....	55
2.9.4 Caliza-Limolita (Jkt Cz-Lm) Formación La Caja	55
2.9.5 Andesita (Kbe A)	56
2.9.6 Andesita-Areniscas (Kbe A - Ar)	56
2.9.7 Riolita (Kbe R).....	57
2.9.8 Arenisca-Lutita (Kbe Ar-Lu).....	57
2.9.9 Caliza-Lutita (Kv Cz-Lu)	58
2.9.10 Caliza - Lutita (Kvh-Cz-Lu)	58
2.9.11 Caliza - Lutita (Kapa-Cz-Lu).....	58
2.9.12 Caliza - Lutita (Kbev Cz-Lu) Formación Taraises.....	59
2.9.13 Caliza (Khb Cz) Formación Cupido	59
2.9.14 Caliza-Limolita (Kap Cz-Lm) Formación La Peña	60
2.9.15 Caliza - Lutita (KaceCz-Lu) Formación Cuesta del Cura	60
2.9.16 Caliza-Limolita (Kt Cz-Lm) Formación Indidura.....	61
2.9.17 Arenisca-Lutita (Kse Ar-Lu) Formación Caracol.....	61
2.9.18 Conglomerado Polimíctico (Tpae Cgp)	62
2.9.19 Conglomerado polimíctico (Teo Cgp) Conglomerado Zaragoza	62
2.9.20 Brecha Volcánica Riolítica-Toba Riolítica (To BvR-TR)	62
2.9.21 Riolita-Toba Riolítica (To R-TR) Panalillo.....	63
2.9.22 Arenisca-Conglomerado Polimíctico (Tpl Qpt Ar- Cgp).....	63
2.9.23 Basalto-Toba Basáltica (Qpt B-TB) Formación Las Joyas	64
2.9.24 Aluvión (Qhoal)	64
2.9.25 Lacustre (Qhola)	64
2.10 Marco Hidrogeoquímico	65
2.10.1 Condición de Electroneutralidad	68
2.10.2 Familias de agua.....	71
2.10.3 Diagrama Stiff	75
2.10.4 Diagrama Piper	77
2.10.5 Diagrama Mifflin	79
2.10.6 Diagrama Wilcox	79

3.- Estudio hidrológico y balance hídrico	82
3.1 Estudio hidrológico superficial	83
3.1.1 Precipitación media anual	83
3.1.2 Temperatura media anual	87
3.1.3 Evapotranspiración real anual.....	89
3.1.4 Escorrentía.....	91
3.1.5 Infiltración.....	97
3.2 Estudio hidrológico subterráneo	99
3.2.1 Pozos de monitoreo	99
3.2.2 Censo de aprovechamientos.....	104
3.2.3 Recarga inducida	105
3.2.4 Elevación del nivel estático	105
3.2.5 Entradas por flujo subterráneo horizontal	106
3.3 Balance hídrico superficial – subterráneo	111
4.- Evaluación de la variabilidad climática	114
4.1 Introducción.....	115
4.2 Estaciones meteorológicas en la región de estudio	115
4.3 Pruebas de homogeneidad e independencia	115
4.3.1 Prueba de Helmert	116
4.3.2 Prueba de Anderson	116
4.4 Estimación de datos faltantes	118
4.4.1 Método del promedio aritmético	118
4.4.2 Método racional deductivo	119
4.5 Estimación de valores medios.....	120
4.6 Análisis de tendencias.....	120
4.6.1 Prueba Mann-Kendall	120
4.6.2 Estimación de la magnitud de cambio.....	122
4.6.3 Detección de rupturas	123
4.7 Resultados por estación meteorológica	124
4.7.1 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la precipitación total	124

4.7.2 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la temperatura media	128
4.8 Resultados a nivel regional	132
4.8.1 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la precipitación total	132
4.8.2 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la temperatura media	132
5.- Implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas.....	134
5.1 Modelo conceptual de la Región Centro-Sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo	135
5.1.1 Componentes del modelo conceptual	135
5.1.2 Fronteras.....	135
5.1.3 Estratigrafía.....	136
5.1.4 Dirección y elevación del nivel freático	137
5.1.5 Fuentes de aprovechamiento.....	138
5.1.6 Balance hídrico	138
5.2 Diseño del modelo numérico	140
5.2.1 Dimensión espacial (dominio)	140
5.2.2 Discretización espacial.....	142
5.2.3 Discretización temporal.....	143
5.2.4 Propiedades hidrogeológicas	144
5.2.5 Condiciones de frontera	145
5.2.6 Pozos de observación.....	147
5.3 Calibración del modelo numérico	148
5.3.1 Cargas hidráulicas	148
5.3.2 Balance hídrico	153
5.3.3 Análisis de sensibilidad	162
6.- Evaluación ante los escenarios actual y futuros.....	163
6.1 Escenario 1: Condiciones actuales sin cambios hasta 2038 (actual).....	164
6.1.1 Resultados Escenario 1: Condiciones actuales sin cambios hasta 2038 .	164
6.2 Escenario 2: Condiciones oficiales sin cambios hasta 2038 (actual oficial) ...	168

6.2.1 Resultados Escenario 2: Condiciones oficiales sin cambios hasta 2038 .	168
6.3 Escenario 3: Condiciones actuales proyectadas hasta 2038 (futuro).....	171
6.3.1 Resultados Escenario 3: Condiciones actuales proyectadas hasta 2038	172
6.4 Escenario 4: Condiciones actuales con incremento de la entrada por flujo subterráneo proyectadas hasta 2038 (futuro)	176
6.4.1 Resultados Escenario 4: Condiciones actuales e incremento de entrada lateral hasta 2038.....	176
6.5 Resumen bajo los distintos escenarios	180
6.6 Zona con mayores abatimientos bajo el escenario más crítico	183
6.6.1 Relación entre la zona de mayor abatimiento y familias de agua	183
6.6.2 Relación entre la zona de mayor abatimiento y los medios geológicos ...	184
6.6.3 Relación entre la zona de mayor abatimiento y la calidad de agua para uso y consumo humano.....	185
6.6.4 Relación entre la zona de mayor abatimiento y la calidad de agua para riego	186
6.6.5 Relación entre la zona de mayor abatimiento y los volúmenes concesionados	187
7.- Recomendaciones sobre el manejo de extracciones	188
Conclusiones.....	192
Referencias	196

Tabla de Figuras

Figura 1. Volumen elemental representativo.....	21
Figura 2. Discretización de un dominio mediante diferencias finitas.	22
Figura 3. Discretización de un dominio mediante elemento finito.....	23
Figura 4. Dominio del modelo implementado por León (2020).....	29
Figura 5. Ubicación de la región de estudio.	34
Figura 6. Distribución del tipo de clima en la región de estudio.....	36
Figura 7. Provincias Fisiográficas en la Región de Estudio.....	38

Figura 8. Subprovincias fisiográficas en la Región de Estudio.	40
Figura 9. Modelo digital de terreno N22W102	42
Figura 10. Perfil de terreno en cuenca norte.	44
Figura 11. Perfil de terreno en cuenca sur.	45
Figura 12. Definición de cuencas superficiales.	46
Figura 13. Distribución de los tipos de suelo en la Región de Estudio.	48
Figura 14. Usos de Suelo y Vegetación en la Región de Estudio.	50
Figura 15. Carta geológica-minera Salinas de Hidalgo.	53
Figura 16. Ubicación de las muestras recolectadas en pozos y norias.	67
Figura 17. Condición de electroneutralidad en muestras de agua.	70
Figura 18. Gráfico de distribución de las familias de agua.	72
Figura 19. Familias de agua en la Región Centro-Sur.	74
Figura 20. Diagramas Stiff por familias.	76
Figura 21. Diagrama de Piper por familias.	78
Figura 22. Diagrama de Mifflin.	80
Figura 23. Clasificación de las aguas según índice Wilcox.	81
Figura 24. Estaciones meteorológicas analizadas.	85
Figura 25. Numero de curva en la Región de Estudio.	95
Figura 26. Configuración de la elevación del nivel freático para el año 2017.	101
Figura 27. Configuración de la elevación del nivel freático para el año 2019.	102
Figura 28. Configuración de la elevación del nivel freático para el año 2023.	103
Figura 29. Balance hídrico superficial-subterráneo.	113
Figura 30 Sección hidrogeológica centro.	137
Figura 31. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Región Centro-Sur de Salinas de Hidalgo.	139
Figura 32. Dominio del modelo numérico.	141
Figura 33. Discretización vertical del modelo.	142
Figura 34. Discretización espacial del modelo numérico.	143
Figura 35. Ajustes de tiempo de simulación.	144
Figura 36. Pozos de extracción en el modelo.	146
Figura 37. Entradas por flujo subterráneo.	147
Figura 38. Pozos de observación.	148
Figura 39. Comparación de datos simulados y datos medidos para el año 2017. ...	150
Figura 40. Comparación de datos simulados y datos medidos para el año 2019. ...	151
Figura 41. Validación del modelo para el 2023.	152
Figura 42. Comparación de valores de conductividad calibrados con valores teóricos.	156

Figura 43. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 1.....	157
Figura 44. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 2.....	158
Figura 45. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 3.....	159
Figura 46. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 4.....	160
Figura 47. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 5.....	161
Figura 48. Análisis de sensibilidad.....	162
Figura 49. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 1.....	165
Figura 50. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 1.....	166
Figura 51. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 2.....	169
Figura 52. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 2.....	170
Figura 53. Evolución del volumen de extracción Región Centro-Sur.....	172
Figura 54. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 3.....	173
Figura 55. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 3.....	175
Figura 56. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 4.....	177
Figura 57. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 4.....	179
Figura 58. Evolución del abatimiento promedio en el periodo 2024-2038.....	182
Figura 59. Relación abatimientos y familias de agua.....	183
Figura 60. Relación abatimientos y medios geológicos.....	184
Figura 61. Relación abatimientos y concentración de arsénico en mg/L.....	185
Figura 62. Relación abatimientos y calidad de agua para riego.....	186
Figura 63. Relación abatimientos y volumen de extracción.....	187

Índice de Tablas

Tabla 1. Porcentajes por Usos de Suelo y Vegetación.....	49
Tabla 2. Muestras descripción y ubicación de muestras.....	65
Tabla 3. Elementos mayores expresados en meq/L.....	69
Tabla 4. Familias de agua.....	71
Tabla 5. Estaciones meteorológicas.....	84
Tabla 6. Precipitación media anual desde 1980 a 2018.....	86
Tabla 7. Temperatura media anual desde 1980 a 2018.....	87
Tabla 8. Valores de evapotranspiración mediante el método de Coutange para el periodo de 1980 a 2018.....	90
Tabla 9. Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad (Domínguez Mora <i>et al.</i> , 2008).....	93

Tabla 10. Numero de curva según la cobertura del suelo (Domínguez Mora et al., 2008).....	94
Tabla 11. Precipitación efectiva para el periodo de 1980 a 2018.	95
Tabla 12. Estimación del coeficiente de infiltración.	97
Tabla 13. Distribución de los aprovechamientos por distintos usos.	104
Tabla 14. Estimación de las entradas por flujo subterráneo para el año 2017.	108
Tabla 15. Estimación de las entradas por flujo subterráneo para el año 2019.	109
Tabla 16. Estimación de las entradas por flujo subterráneo para el año 2023.	110
Tabla 17. Ejemplo de balance hídrico para el año 2017.	112
Tabla 18. Resultados de las pruebas de Independencia y Homogeneidad.....	117
Tabla 19. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la precipitación total.	125
Tabla 20. Rupturas la serie de tiempo de la precipitación total por estación.....	127
Tabla 21. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura media.	129
Tabla 22. Rupturas en la serie de tiempo de la temperatura media por estación....	131
Tabla 23. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la precipitación total mensual.....	132
Tabla 24. Rupturas en la serie de tiempo de la temperatura media	132
Tabla 25. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura media.	133
Tabla 26. Rupturas en la serie de tiempo de la temperatura media.	133
Tabla 27. Unidades geoelectricas, reportadas por Salazar (2019).....	137
Tabla 28. Comparativo entre volúmenes modelados y estimados	153
Tabla 29. Propiedades hidrogeológicas calibradas	154
Tabla 30. Comparativo entre las conductividades obtenidas y las reportadas por León 2020.	155
Tabla 31. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 1 ...	167
Tabla 32. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 2 ...	171
Tabla 33. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 3...	174
Tabla 34. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 4...	180
Tabla 35. Resumen de los escenarios de simulación	181

Introducción

Las aguas subterráneas son un elemento esencial del ciclo hidrológico y un valioso recurso natural, ya que constituye una de las principales fuentes de agua para la agricultura, así como para usos domésticos e industriales en todo el mundo. Cerca de la mitad del agua potable del mundo y un 43% del agua que se consume para la irrigación proviene de fuentes subterráneas. Sin embargo, a nivel mundial los recursos hídricos subterráneos se encuentran en una situación de crisis debido a su extracción excesiva en regiones semiáridas y áridas y a las consecuencias aún inciertas del cambio climático (Organización de las Naciones Unidas para la Educación [UNESCO], 2015).

En México, la importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El 39.1% del volumen total concesionado para usos consuntivos (34,380 hm³/año al 2017), procede de agua subterránea, como consecuencia de este aprovechamiento intensivo según datos del año 2001, el número de acuíferos sobreexplotados en México ha oscilado entre 100 y 106. Al 31 de diciembre de 2017 se reportaron 105 acuíferos sobreexplotados (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2018)

La sobreexplotación de un acuífero se define como la extracción del agua de éste en una cantidad superior a la correspondiente a su recarga natural, todo ello referido a un período de tiempo suficientemente largo como para diferenciar las consecuencias similares que tendrían periodos anómalamente secos, y el efecto más importante de la sobreexplotación es el descenso continuo de los niveles del agua subterránea (Pulido, 2001).

En algunas zonas del estado de San Luis Potosí, el clima desértico y semidesértico provoca que las fuentes de agua sean escasas y de disponibilidad transitoria; estas condiciones, por consecuencia, generan que las aguas subterráneas constituyan la fuente fundamental de abastecimiento de agua, condición esencial del desarrollo de los principales sectores productivos, así como para la mayoría de las poblaciones de la entidad (Estrada, 2013).

Debido a los posibles efectos negativos de la sobreexplotación de acuíferos sobre todo en regiones donde éstos constituyen la principal fuente de abastecimiento, es importante su evaluación y proyección a tiempos futuros, con el objetivo de ser una herramienta técnica que pueda ser tomada en cuenta para la toma de decisiones.

A partir del documento oficial “Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Salinas de Hidalgo (2403), Estado de San Luis Potosí” realizado por la Comisión Nacional del Agua en el año 2020, el volumen concesionado de extracciones, supera la recarga media anual, por lo tanto, está catalogado como un acuífero en condiciones de sobreexplotación.

Una de las principales limitantes para el desarrollo socioeconómico de las regiones áridas, es la escasez de agua disponible en cantidad y calidad, principalmente en aquellas zonas donde el recurso hídrico superficial está ausente, teniéndose que recurrir al subterráneo, el cual se utiliza para el suministro de agua en algunas regiones áridas donde incluso la recarga del agua subterránea por precipitaciones es escasa (Del Pilar *et al.*, 2013).

Dado este panorama surge la necesidad de contar con herramientas técnicas que permitan la comprensión de los sistemas de flujo en los acuíferos sobreexplotados y la proyección del comportamiento de este ante distintos escenarios futuros.

El caso más general de utilización de modelos numéricos de acuíferos ha sido simular su comportamiento ante distintas alternativas de utilización de aguas subterráneas y tratar de elegir la más conveniente, o en algunos casos se ha utilizado para pretender conocer la respuesta del acuífero ante una alternativa única y comprobar si era técnicamente factible (Custodio & Llamas, 1983).

En recientes investigaciones se ha demostrado que la modelación numérica de sistemas de flujo subterráneos constituye una herramienta útil en la evaluación de los recursos hídricos subterráneos y el análisis de escenarios futuros de explotación en este tipo de acuíferos (El Alfy, 2014).

En la región de estudio, a pesar de que existe un modelo numérico de flujo realizado por (León, 2020), el cual propuso una serie de estrategias de gestión hídrica en el acuífero administrativo; se pretende implementar un modelo numérico de flujo considerando los trabajos previos y la información más reciente con la que se cuenta.

Problemática

El acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo ha presentado en los últimos años, una disponibilidad media anual de agua subterránea negativa, es decir, no existe un volumen de agua subterránea disponible para otorgar concesiones de extracción a nuevos usuarios. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua en el año 2020, se estimó la recarga total media anual en $16.7 \text{ hm}^3/\text{año}$; y el volumen de extracción de aguas subterráneas en $48.51 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo que el acuífero administrativamente tiene un déficit de volumen disponible para otorgar concesiones de hasta $31.84 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Lo anterior ha sido resultado del régimen de extracciones que ha perdurado, ya que supera la recarga estimada del acuífero, y pone en riesgo la disponibilidad del recurso hídrico a futuro. Considerando que en los últimos años la demanda de extracción de agua se ha compensado con el almacenamiento contenido en el acuífero, y esto se ha reflejado en las mediciones del nivel freático reportadas en el estudio de la CONAGUA (2020), en el cual se evidenció que en términos generales el acuífero de Salinas de Hidalgo presenta para desde el año 2002 presenta una disminución acumulada de sus niveles estáticos. En promedio esta variación es del orden de -5 a -20 m, ya que para el año 1980 la profundidad a los niveles estáticos oscilaba entre 5 y 20 m y actualmente (2020) oscilan entre 10 y 40 m; dicha variación representa un abatimiento promedio del orden de 0.22 a 0.9 m/año y en forma más general del orden de 0.6 m/año en toda el área configurada.

Los modelos numéricos de aguas subterráneas pueden ser utilizados para una gran variedad de propósitos que incluyen educación, investigación hidrológica, manejo del agua y determinación de responsabilidades legales (Reilly & Harbaugh, 2004).

Dada las condiciones del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, el presente trabajo pretende implementar un modelo numérico de flujo, generándose así una herramienta de gestión que pueda ser considerada por las autoridades correspondientes en la toma de decisiones.

Justificación

El municipio de Salinas de Hidalgo localizado en la parte noroeste del estado de San Luis Potosí, en la zona conocida como el altiplano, cuyos sus límites son: al norte Charcas, al este Moctezuma, al sureste, y suroeste el estado de Zacatecas, al oeste Villa de Ramos, al noroeste Santo Domingo, tiene una población total de 31,107 habitantes de acuerdo con el Censo General de Población y Vivienda 2020 efectuado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

El municipio de Salinas abarca casi en su totalidad el acuífero administrativo del mismo nombre, el cual según los registros del REPDA tiene una extracción concesionada de agua subterránea de 48.48 hm³/año; en contraste, únicamente existe un volumen de 13,195 m³/año de aprovechamiento de aguas superficiales, lo que confirma que la población basa sus actividades económicas y el abastecimiento para consumo en su totalidad del recurso que les provee el acuífero, mediante pozos y norias poco profundas. Según datos oficiales, cerca del 85% del agua concesionada está destinada al uso agrícola, lo que sugiere que este sector económico tiene mucha relevancia para la población de esta localidad, en la visita de campo realizada, se pudo constatar la presencia de esta actividad.

En Salinas, la actividad agrícola tiene como principales cultivos: maíz, frijol, chile y cebolla; como cultivos perennes que tienen importancia en la región está la alfalfa, y se desarrolla principalmente en las comunidades rurales del municipio, principalmente en aquellas ubicadas en los ejidos de Conejillo y Palma Pegada.

En cuestión de Ganadería, según el inventario ganadero del 2005 del INEGI, existía una población total de 9,312 cabezas bovino; 2,749 de ganado porcino; 145,013

cabezas de ganado ovino; 65,080 de cabezas de ganado caprino y 80 colmenas. La comercialización del ganado ovino es la más importante y ésta, aun cuando es de manera local se realiza con tablajeros locales y foráneos siendo de importancia por el volumen de cabezas de ganado que existe en la región.

Debido a que las actividades económicas necesitan de grandes volúmenes de agua ha provocado un régimen de extracción intensivo superando a la recarga natural, por lo que el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo se ha catalogado en condiciones de sobreexplotación (CONAGUA, 2020).

La persistencia de esta condición por largos periodos de tiempo podría ocasionar en el acuífero, alguno o varios de los siguientes impactos ambientales: agotamiento o desaparición de cuerpos de agua; disminución o desaparición del flujo base en ríos; abatimiento indefinido del nivel del agua subterránea; formación de grietas; asentamientos diferenciales del terreno; migración de agua de mala calidad. Estos impactos pueden ocasionar pérdidas a las actividades económicas mencionadas y a la sociedad en general (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2012).

Otro aspecto a considerar es que existen diversos trabajos de investigación que han demostrado la presencia de contaminantes inorgánicos que pudieran generar efectos nocivos en la salud, tal es el caso del trabajo realizado por (UNAM Instituto de Geofísica [IGEF], 2021), el cual afirma que los municipios de Charcas, Santo Domingo, Salinas de Hidalgo, Villa de Ramos, Villa de Guadalupe, Guadalcázar, Mexquitic de Carmona, ubicados en la zona altiplano Potosino, presentaron muestras de agua que rebasan las concentraciones de referencia tanto para fluoruro como para arsénico. Por lo tanto, el estudio de los sistemas de flujo de agua subterránea toma importancia para su comprensión y entendimiento, y prever en un futuro posibles abatimientos que pudieran modificar la calidad del agua y así mismo establecer relaciones entre la presencia de elementos químicos y el régimen de extracciones.

Considerando las condiciones de la región en estudio, surge la necesidad de proyectar los niveles del agua subterránea hacia un tiempo futuro mediante un modelo numérico

que pueda ser tomado en cuenta por las autoridades correspondientes en la toma de decisiones.

Se ha demostrado que un modelo numérico, es una herramienta útil para comprender, desarrollar, gestionar y proteger los sistemas de aguas subterráneas. Los modelos numéricos de aguas subterráneas al ser una versión simplificada de un sistema acuífero complejo no son perfectos, pero proporcionan información sobre el comportamiento de un sistema de aguas subterráneas con un grado razonable de confianza y han sido probados para ser herramientas útiles para resolver muchos problemas de aguas subterráneas (Sikdar, 2019).

La implementación de un modelo numérico no es tarea fácil, abarca desde: el análisis de las características físicas de la zona, la realización de estudios hidrológicos e hidrogeoquímicos, la estimación del balance hídrico superficial-subterráneo, la detección de tendencias en series de tiempo de variables climáticas; las cuales finalmente se integran en un modelo conceptual. Definido el paso anterior, se traduce a un esquema numérico, el cual es calibrado y validado con mediciones reales, para finalmente ser proyectado hacia un tiempo futuro con base en escenarios del régimen de extracciones y variabilidad climática.

En la región de estudio, se tienen trabajos previos como caracterización geoelectrica e hidrogeoquímica, y el trabajo más importante es un modelo numérico desarrollado por León (2020), el cual fue el punto de partida para la elaboración del presente modelo numérico de flujo.

Hipótesis

Los volúmenes de agua subterránea extraídos actualmente en la Región Centro-Sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, superan los volúmenes concesionados y publicados en el Registro Público de Derechos de Agua.

Objetivo general

Evaluar los sistemas de flujo de aguas subterráneas en el Región Centro-Sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí; mediante la implementación de un modelo numérico de flujo, el cual constituya una herramienta de proyección de los niveles del agua subterránea ante distintos escenarios futuros.

Objetivos específicos

1. Analizar series de tiempo de variables climatológicas en la región de estudio mediante la identificación de tendencias y rupturas a escala local y regional.
2. Interpretar el modelo conceptual del acuífero, mediante el análisis e integración de sus características: geológicas, hidrológicas e hidrogeoquímicas.
3. Implementar un modelo numérico de flujo calibrado y validado en la Región Centro-Sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, utilizando el software de modelación FEFLOW.
4. Simular la hidrodinámica de los sistemas de flujo de aguas subterránea bajo diferentes escenarios futuros, los cuales consideren variación en los volúmenes de extracción y variabilidad climática.
5. Generar recomendaciones del manejo de extracciones de aguas subterráneas.

Metodología

Para el logro de los objetivos específicos y como consecuencia del objetivo general, se desarrolló la siguiente metodología. A grandes rasgos, en el capítulo 1 se realizó un análisis de las aplicaciones de los modelos numéricos a nivel mundial, nacional y en particular del modelo numérico previo de la zona de estudio. En el capítulo 2, se describen las características físicas de la región centro-sur mediante la recopilación de archivos vectoriales obtenidos de fuentes oficiales. En el capítulo 3, se estimaron las variables hidrológicas en la región de estudio tanto superficiales (precipitación,

temperatura, evapotranspiración e infiltración) como subterráneas (entrada por flujo lateral, extracciones, retornos), para después mediante la ecuación de balance estimar la disponibilidad de agua en el acuífero. El capítulo 4 consistió en realizar una detección de las tendencias con respecto a variables como la precipitación y temperatura medias, a escala local y regional; con el objetivo de establecer un escenario futuro de modelación que considere esta variabilidad. En el capítulo 5, se implementó el modelo numérico de flujo de aguas subterráneas mediante el software FEFLOW y considerando el modelo conceptual interpretado previamente con base en la información analizado en los capítulos previos, el modelo fue calibrado y validado con mediciones de campo. En el capítulo 6 se implementaron cuatro escenarios futuros con el modelo numérico previamente calibrado y se analizaron los resultados obtenidos. Finalmente, en el capítulo 7 se establecieron propuestas para las extracciones basadas en los resultados obtenidos en el capítulo 6.

A continuación, se detallan las actividades realizadas en función de los objetivos específicos planteados:

- 1.1 Ubicar las estaciones meteorológicas cercanas a la región de estudio.
- 1.2 Filtrar las estaciones meteorológicas mediante la prueba de Independencia de Anderson.
- 1.3 Estimar los registros de datos climatológicos faltantes mediante los métodos del promedio aritmético y racional deductivo.
- 1.4 Calcular los valores de las variables climatológicas a escala local y regional mediante promedios mensuales, anuales e isoyetas respectivamente.
- 1.5 Identificar las posibles tendencias mediante la prueba de Mann-Kendall, sus respectivas magnitudes de cambio a través del método de Sen's Slope y las rupturas de las series de tiempo mediante la prueba de Petit.
- 2.1 Describir las características físicas de la región de estudio mediante la recopilación y análisis de archivos vectoriales y ráster.
- 2.2 Realizar el estudio hidrológico superficial mediante la delimitación de la cuenca superficial y la estimación de datos anuales de las variables que controlan el ciclo

hidrológico, tales como: precipitación, temperatura, evapotranspiración, escurrimientos, infiltración (desde 1980 a 2018).

2.3 Realizar el estudio hidrológico subterráneo mediante el análisis de las configuraciones de elevación de los niveles freáticos y la aplicación de la Ley de Darcy para estimar las entradas por flujo horizontal.

2.4 Aplicar la ecuación de balance hídrico para el cálculo de la disponibilidad media anual de aguas en la región de estudio.

2.5 Analizar la composición química del agua subterránea para identificar las distintas familias y procesos de evolución presentes en la región de estudio.

2.6 Integrar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero con base en criterios: geológicos, hidrológicos e hidrogeoquímicos.

3.1 Diseñar e implementar el modelo numérico en el Software FEFLOW representando: el dominio, las condiciones de frontera y los medios geológicos descritos en el modelo conceptual.

3.2 Calibrar el modelo numérico en estado transitorio mediante el ajuste de parámetros hidráulicos con el objetivo de minimizar la diferencia entre los datos simulados y medidos.

3.3 Implementar un análisis de sensibilidad al modelo calibrado para evaluar la influencia de cambios en los parámetros de entrada a los resultados del modelo.

4.1 Análisis de la tendencia de extracción en la región de estudio para definir el escenario actual.

4.2 Desarrollar posibles escenarios futuros considerando los resultados obtenidos en el análisis de la variabilidad climática.

4.3 Traducir los distintos escenarios futuros en modificaciones a las condiciones de frontera del modelo.

5.1 Realizar diferentes corridas del modelo numérico en función de los escenarios futuros definidos.

5.2 Estimar las diferencias entre las elevaciones de nivel freático de proyectadas a futuro y evaluarlas con base en los escenarios correspondientes.

5.3 Establecer recomendaciones sobre el manejo de extracciones de las aguas subterráneas.

1.- Estado del arte sobre modelación numérica de acuíferos

1.1 Aspectos teóricos de la modelación numérica de sistemas de flujo subterráneo

Un modelo es una representación simplificada del complejo mundo natural (Anderson *et al.*, 2015).

La definición de modelo numérico de aguas subterráneas ha sido abordada por diversos autores, ejemplo de ello son las siguientes:

- Un modelo es la descripción más defendible de un sistema de agua subterránea para análisis cuantitativos y fundamentados, así como pronósticos sobre las consecuencias de las acciones propuestas (Toth, 1963).
- Una descripción matemática, no única, simplificada de un sistema de aguas subterráneas (International Ground Water Modeling Center [IGWMC], 1993).
- Es una representación matemática y datos de entrada asociados para un problema específico de aguas subterráneas.

Considerando que un modelo numérico es la representación matemática de los procesos hidrogeológicos, se requiere realizar simplificaciones para plantear la ecuación fundamental de flujo. La ecuación que se detalla en los siguientes párrafos es la forma más utilizada en la modelación del flujo de agua subterránea y representa el flujo de agua con densidad constante en un medio poroso continuo según la ley de Darcy (Anderson *et al.*, 2015).

La ecuación que rige el flujo a través de un medio poroso se deriva considerando el flujo de agua a través de un cubo de material poroso es conocido como volumen elemental representativo con volumen igual a $\Delta x \Delta y \Delta z$, ver Figura 1.

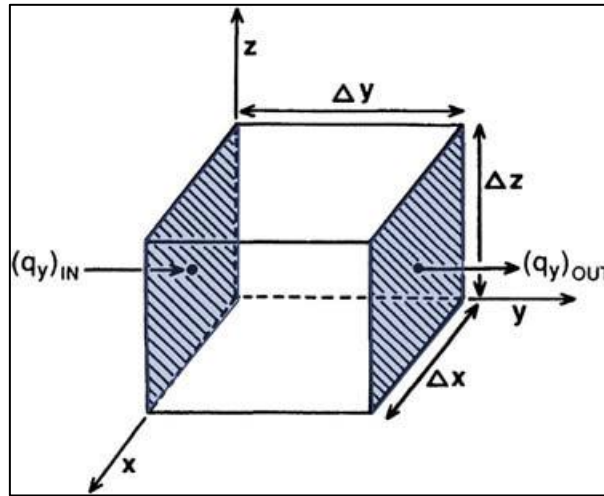


Figura 1. Volumen elemental representativo.

Aplicando la ley de la conservación de la masa, es decir, entradas – salidas = Δ almacenamiento; el flujo a través de este volumen queda definido como:

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

Aplicando la Ley de Darcy:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Es posible plantear la ecuación general del flujo subterráneo tridimensional en estado transitorio para un medio heterogéneo y anisotrópico:

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

Donde:

h = es la variable dependiente.

K_x, K_y, K_z = conductividades hidráulicas en tres dimensiones.

S_s = almacenamiento específico.

La resolución de esta ecuación se basa en el método de diferencias finitas (DF) o de elementos finitos (EF), ambos son capaces de resolver el flujo de agua subterránea en

estado estacionario y transitorio en las tres dimensiones tanto en medios homogéneos y heterogéneos; con condiciones de frontera y una red compleja de fuentes y sumideros. Debido a su versatilidad, los modelos DF y EF son los que se utilizan con mayor frecuencia para resolver problemas de aguas (Anderson *et al.*, 2015).

1.1.1 Método de diferencias finitas (DF)

El método de diferencias finitas (DF) es un método numérico bastante versátil, relativamente simple y actualmente el método más utilizado para modelar flujo, el programa DF más utilizado actualmente es MODFLOW.

En lugar de utilizar soluciones analíticas para las ecuaciones generales de flujo, el método de diferencias finitas utiliza una serie de ecuaciones algebraicas que se basan en la conservación de la masa y la ley de Darcy. Estas ecuaciones algebraicas se resuelven para cargas hidráulicas desconocidas en nodos discretos ubicados dentro de una red ortogonal de nodos. Un esquema DF coloca nodos en el centro de cada bloque.

El dominio del modelo divide o discretiza en una cuadrícula de bloques o celdas rectangulares como se muestra en la Figura 2. Dentro de cada bloque, se supone que las propiedades físicas del dominio (K_x , K_y , K_z , n y S) son homogéneas. El dominio puede volverse heterogéneo asignando diferentes propiedades a diferentes bloques. Se supone que las direcciones principales de la conductividad hidráulica se alinean con las direcciones ortogonales de la malla (Fetter Jr., 2001).

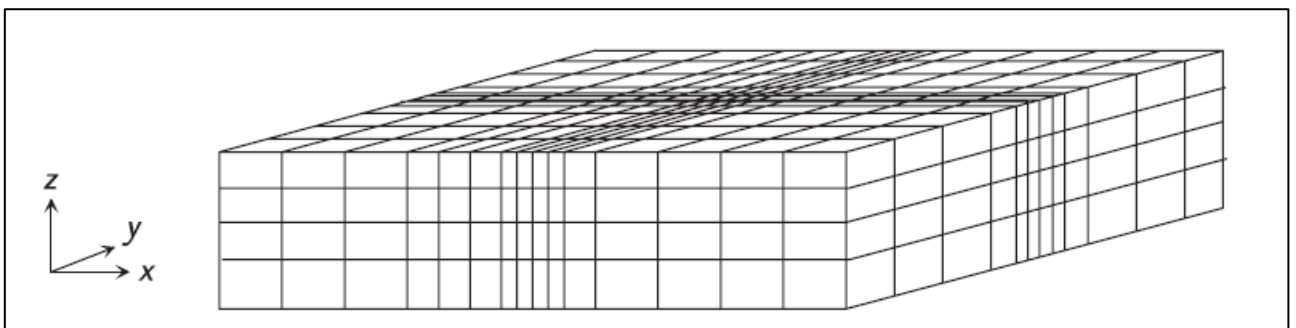


Figura 2. Discretización de un dominio mediante diferencias finitas.

1.1.2 Método de elemento finito (EF)

Al igual que el método de diferencias finitas, el dominio de flujo en el método de elementos finitos (EF) se subdivide en elementos discretos y nodos. El EF utiliza formas de elementos que son un poco más flexibles que los rectángulos o cuadros del DF. Las formas más comunes de elementos finitos son triángulos y trapecios para flujo bidimensional, y prismas triangulares y trapezoidales para flujo tridimensional, ver Figura 3.

En un modelo EF, se supone que la altura varía a través de un elemento de alguna manera simplificada y restringida. Generalmente se utiliza una variación lineal, aunque algunas formulaciones más sofisticadas utilizan distribuciones de orden superior.

La superficie de carga hidráulica tiene una pendiente constante dentro de un elemento (lineal), pero la pendiente cambia abruptamente a través del límite de un elemento, siendo a menudo una aproximación muy aceptable (Fetter Jr., 2001).

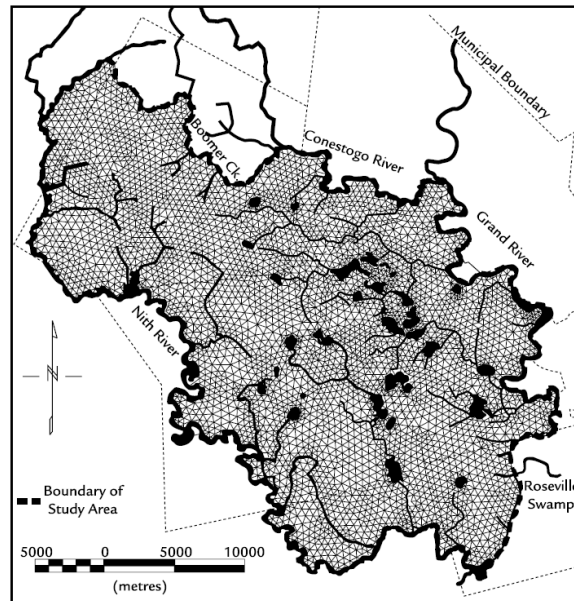


Figura 3. Discretización de un dominio mediante elemento finito.

El problema de los elementos finitos se reduce a determinar la mejor solución aproximada para el tipo restringido de distribución de carga permitida en los elementos (en este caso, lineal).

Desde la década de los 70's se ha utilizado los modelos numéricos como una herramienta en el estudio de la hidrología subterránea. El uso de estos inicia con la necesidad de estudiar el comportamiento del flujo en los suministros de agua en medios saturados (acuíferos) y posteriormente se introdujo el concepto de flujo en la zona no saturada (suelo).

El creciente desarrollo de la simulación numérica en la hidrología subterránea se puede explicar por dos factores que se han dado de forma paralela: aumento de la complejidad de los problemas a resolver y el surgimiento de nuevos métodos numéricos para el planteamiento y aproximación de las ecuaciones resultantes del modelo de simulación (Huyakorn & Pinder, 1983).

Los modelos de agua subterránea se han aplicado a cuatro tipos generales de problemas: flujo de agua subterránea, transporte de solutos, flujo de calor y deformación del acuífero (Fetter Jr., 2001).

A continuación, se presenta una revisión de los diferentes enfoques que se les ha dado a los modelos numéricos de aguas subterráneas a nivel nacional y mundial y diversos casos de estudio.

1.2 Aplicación de los modelos numéricos a nivel nacional y mundial

Una de las aplicaciones más clásicos de los modelos numéricos de flujo es simular el comportamiento de un acuífero bajo diferentes escenarios de extracción por bombeo y con los resultados evaluar posibles problemas de contaminación por agua salina debido a un exceso en los caudales de extracción.

Un ejemplo del enfoque anterior es la implementación de un modelo numérico como una herramienta efectiva para la administración de los recursos hídricos en una porción del acuífero de Nubia, ubicada en Egipto realizado por (El Alfy, 2014). Este modelo numérico se aplicó a un acuífero ubicado en una región árida, con poca precipitación anual (6 mm/año) y cuyo origen del agua que contiene es fósil, lo cual lo convierte en un recurso no renovable. Se utilizó un modelo numérico en tres dimensiones basado

en diferencias finitas utilizando el software Visual MODFLOW el cual fue calibrado con valores de carga hidráulica correspondientes a campañas de medición realizadas entre 1984 y 2011, calibrado el modelo se realizó un análisis en estado transitorio bajo tres escenarios con relación al régimen de extracciones. Como resultado se obtuvo la predicción de la extensión del cono de abatimiento en la zona de extracción del acuífero, variando desde 15 m hasta 30 m en función del escenario para el año 2041. Un modelo numérico también puede ser de gran utilidad en una situación de emergencia en la que se vea comprometido el abastecimiento de agua para una población, tal es el caso del trabajo realizado por (Qingshan *et al.*, 2020). Este trabajo se desarrolló en la localidad de la República Popular de China, la cual presentó un problema de escasez de agua ya que los niveles del río Gangjiang presentaron sus registros más bajos, cabe mencionar que este río fungía como la fuente de abastecimiento de agua para las plantas potabilizadoras de la ciudad, dada esta situación de emergencia se autorizó utilizar el agua subterránea como fuente de abastecimiento, por esto fue necesario un modelo numérico que simulara el comportamiento del acuífero ante las nuevas necesidades.

Como un complemento a los modelos de flujo, surgieron los modelos que evalúan el transporte de solutos en el medio acuífero, como lo es el modelo realizado por (Tejeda *et al.*, 2003) el cual se desarrolló en un Salar ubicado en Atacama, Chile. Se analizó esta problemática bajo dos enfoques; modelando el flujo en dos dimensiones considerando la densidad variable del agua y el fenómeno de transporte bajo una ecuación de dispersión-advección.

El estudio del flujo y transporte de solutos en la zona vadosa de un acuífero es de gran importancia cuando se quiere conocer el tiempo que tardaría un agua contaminada en infiltrarse hacia el manto freático, tal es el caso del estudio realizado por (Salas-García *et al.*, 2011) el cual tuvo como objetivo realizar un modelo unidimensional de la infiltración en la zona no saturada en un acuífero de Toluca, México. El trabajo se realizó en el valle de Toluca, el cual debido a la excesiva explotación del acuífero y por sus características hidráulicas, en la zona de estudio se ha presentado una pérdida de almacenamiento del acuífero, lo que provocó descensos del terreno y colapsos

superficiales; por ello fue necesario implementar un modelo numérico que simule el proceso de infiltración en la zona vadosa.

El estudio del transporte de Nitratos en un acuífero de tipo kárstico es una gran herramienta para evaluar sus posibles impactos, el modelo realizado por (Sullivan *et al.*, 2019) simuló el flujo subterráneo en la matriz rocosa y sus conductos, así como el transporte de Nitratos mediante el modelo tridimensional de transporte de masa. En los acuíferos kársticos generalmente el estudio de los nitratos se lleva a cabo mediante análisis isotópicos y químicos, sin embargo, se ha implementado un modelo numérico como método para evaluar la vulnerabilidad ante Nitratos.

Un tema que recientemente ha tomado gran importancia es el cambio climático, el cual puede generar efectos sobre las aguas subterráneas, (Moustadraf *et al.*, 2008) realizó un trabajo de investigación para analizar las tendencias de precipitación y niveles piezométricos en un acuífero de Marruecos, para después mediante modelación numérica reproducir los niveles piezométricos actuales y predecir su comportamiento en el futuro bajo diferentes escenarios de extracción. Después de analizar las variables climáticas, se construyó un modelo numérico para simular el flujo del acuífero, en estado estacionario y transitorio, el modelo numérico en estado transitorio permitió conocer el régimen de flujo del acuífero; y concluyó que los niveles piezométricos son afectados principalmente por el excesivo bombeo del agua subterránea y no por la sequía.

El ciclo hidrológico de una región siempre crea una relación entre las aguas superficiales y subterráneas, las cuales pueden o no tener depender entre sí, el trabajo realizado por (Baalousha, 2012) caracteriza la relación entre el agua subterránea y superficial mediante la implementación de un modelo numérico. El enfoque tradicional de la gestión del agua considera por separado el agua subterránea de la superficial, sin embargo, se ha demostrado que en casos de acuíferos poco profundos y con excesivos bombeos, pueden agotar las aguas de los arroyos; al igual que la contaminación de fuentes superficiales puede llegar a las aguas subterráneas y afectarlas. Se ha demostrado que un modelo numérico es una alternativa económica y confiable, pero se necesita de un gran periodo de datos confiables y medidos para

validarlo, en este trabajo se dispuso de un periodo de medición desde 1990 a 2010, con las cuales se construyó el modelo, el cual fue calibrado con un RMS medio entre 13 y 15%. Se puso en evidencia que el enfoque tradicional de la gestión de recursos hídricos no debe ser visualizada de manera separada.

La recarga natural de los acuíferos en zonas urbanas ha sido modificada, ya que se realiza principalmente mediante pozos, es decir, la escorrentía generada por las superficies se desaloja de manera puntual. Un enfoque importante de los modelos numéricos es conocer el impacto de la recarga artificial en un acuífero, ejemplo de esto es el trabajo realizado por (Ghazaw *et al.*, 2013) en la ciudad de Buraydah, Qassim, Arabia Saudita. La problemática de los países árabes es el incremento de la extracción del agua subterránea que a su vez genera un agotamiento del acuífero, por lo que se ha presentado un descenso importante de los niveles freáticos combinado con un incremento en el patrón de precipitaciones. El objetivo de este estudio fue modelar el impacto de 6 pozos de recarga de agua lluvia considerando también la presencia de los 34 pozos de extracción.

La implementación de un modelo numérico de aguas subterráneas puede ser tan simple o complicado en función de la problemática a resolver y la información con la que se cuenta, sus aplicaciones pueden ir desde estudiar el movimiento unidimensional del flujo subterráneo hasta analizar el transporte de masa de un gas en un medio kárstico. En los años recientes debido al desarrollo de los softwares y potentes equipos computacionales es evidente que se ha posicionado como una buena herramienta de predicción de los recursos hídricos en México y en el mundo. El procedimiento de modelación debe partir desde un sólido modelo conceptual del acuífero a estudiar. Comprender el modelo conceptual dependerá de la calidad y cantidad de los registros históricos que existan, en muchas ocasiones no se cuenta con un periodo extenso de medición (al menos 10 años), o sucede que hay interrupciones en las mediciones o se han tomado a distinta temporalidad o la información no es pública ni gratuita. Una de las grandes ventajas de un modelo numérico es la capacidad de predecir el comportamiento a futuro de un acuífero, por ello se busca que los errores de la simulación sean mínimos, sin embargo, es

necesario tener en cuenta que el modelo es una representación simplificada de la realidad, por lo tanto, será imposible representar exactamente los fenómenos que ocurren en el acuífero, por ello se debe aceptar un nivel de error entre lo simulado y lo medido.

Para lograr un modelo lo mejor calibrado es común que se realicen modificaciones en los parámetros hidráulicos del acuífero hasta alcanzar el objetivo, esto suele ser confuso ya que estos parámetros pudieron ser calculados previamente siguiendo una metodología, y en ocasiones será necesario reemplazarlos por valores muy distintos hasta en un orden de magnitud, en contraparte, si no se cuentan con datos obtenidos en campo es factible iniciar con valores obtenidos de la literatura.

Contar con un modelo numérico calibrado, es una gran herramienta que puede ser de utilidad para la administración y gestión de los recursos hídricos, sobre todo en situaciones de emergencia donde el suministro de agua se puede comprometer en un futuro cercano, por ello cuando se realice un modelo en beneficio de una región se debe involucrar a la mayor cantidad de partes interesadas.

1.3 Modelo numérico previo en la región de estudio

Como antecedente al presente trabajo de tesis se tiene el “MODELO NUMÉRICO DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN HÍDRICA DEL ACUÍFERO ADMINISTRATIVO DE SALINAS DE HIDALGO, SAN LUIS POTOSÍ”, realizado por (León, 2020); este tuvo como objetivo formular una propuesta de estrategias de gestión hídrica mediante un modelo numérico de agua subterránea en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. El dominio del modelo abarcó el acuífero administrativo con clave 2305, tal como se muestra en la Figura 4.

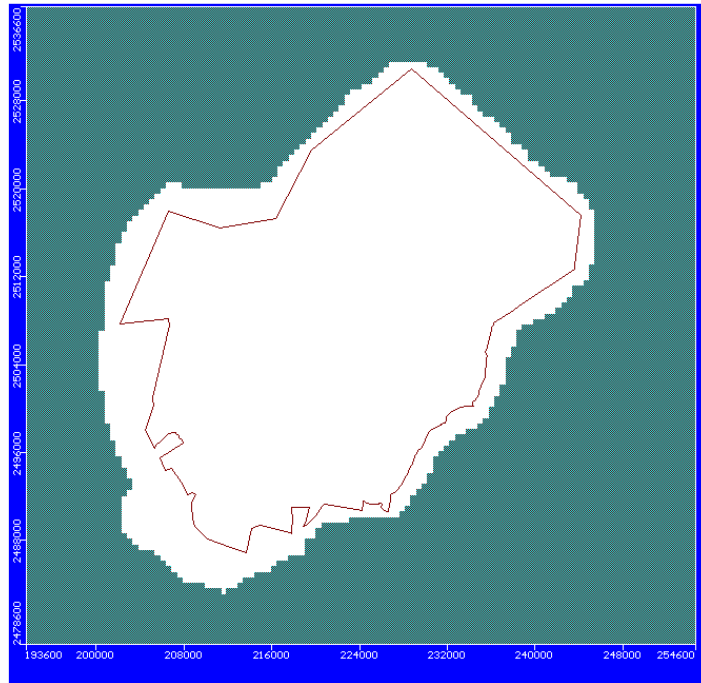


Figura 4. Dominio del modelo implementado por (León, 2020).

Este modelo numérico se implementó en el software Visual MODFLOW, el cual resuelve las ecuaciones de flujo mediante el método de diferencias finitas, a diferencia del programa FEFLOW el cual basa la solución en el elemento finito. En este modelo se utilizó una condición de frontera de entrada por flujo subterráneo al noroeste del dominio, la extracción de pozos mediante los registros del REPDA y una zona de evapotranspiración al centro del acuífero.

La calibración y validación del modelo numérico se realizó en un periodo de 7 años (2012-2019), una vez calibrado se realizó la simulación de tres escenarios futuros mediante diferentes propuestas no realistas de esquemas de extracción del agua subterránea y considerando una tendencia de recarga disminuyendo la entrada por flujo subterráneo.

Todo modelo numérico es mejorable conforme se genera información en mayor cantidad y calidad, por lo tanto, se menciona a continuación las áreas de oportunidad detectadas del trabajo citado, las cuales se tomaron en cuenta en el presente trabajo en busca de un modelo más sólido.

- Periodo de calibración: se implementó un estado de bombeo transitorio durante un periodo de 2,590 días (7 años), por lo que extrapolar los resultados a un periodo futuro mayor que este, no se recomienda. Considerando el periodo de simulación y de manera rigurosa, el modelo es capaz de simular hasta el año 2026.
- Dominio del modelo: Como se observa en la Figura 1, el dominio del modelo se estableció con el límite administrativo del acuífero, no se realizó un análisis detallado de los aspectos hidrológicos e hidrogeológicos de la zona para la delimitación de este, por lo que no representa las características físicas de la zona.
- Integración de la hidrogeoquímica: La generación del modelo conceptual del acuífero no consideró los resultados obtenidos del trabajo de Cadenas (2021); por lo tanto, las condiciones de frontera en el modelo no se relacionan con la composición química se establecieron únicamente con el análisis de las equipotenciales y por estudios previos, es importante recordar que mientras más información será integrada el modelo representará en mejor medida la realidad.
- Subestima la extracción: En el trabajo se consideró una extracción concesionada de 23´453,434 m³/año, sin embargo, al solicitar la información del REPDA a la Dirección Local de la Conagua San Luis Potosí, se constató que existe una zona de libre alumbramiento, la cual también cuenta con sus respectivas constancias que finalmente suman en conjunto una extracción del orden de los 48.48 hm³/año, derivado de este análisis, se infiera que los volúmenes en la condición de frontera fueron subestimados.
- Análisis de las tendencias de series climáticas: las variables como temperatura y precipitación pueden tener un comportamiento tendencial en la zona de estudio que pudieran incidir sobre los escenarios futuros modelados, sin embargo, en el trabajo no se realizó este análisis para sustentar el escenario que presenta con un decremento de la entrada por flujo subterráneo.

2.- Características del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.

2.1 Localización

2.1.1 Situación administrativa

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), para la publicación de la disponibilidad ha dividido al país en 757 cuencas hidrológicas al 7 de julio del 2016 junto con sus disponibilidades.

Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, que para efectos de administración se agrupan en las 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA). En lo que se refiere a las aguas subterráneas, el país está dividido en 653 acuíferos (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2019).

El acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo pertenece al Organismo de Cuenca VII “Cuencas Centrales del Norte”, y es jurisdicción territorial de la Dirección Local San Luis Potosí (CONAGUA, 2020).

2.1.2 Localización geográfica

El acuífero Salinas de Hidalgo, está ubicado en la parte poniente del estado de San Luis Potosí (ver

Figura 5), geográficamente se localiza entre los paralelos 22° 30' y 22° 51' de latitud norte y entre los meridianos 101° 29' y 101° 53' de longitud oeste. Cubre una superficie aproximada de 1006 km², conforme a la poligonal que lo delimita. De acuerdo con la división política del estado de San Luis Potosí, el acuífero se localiza prácticamente dentro del municipio de Salinas y en una pequeña parte del municipio de Villa de Ramos (CONAGUA, 2020).

2.1.3 Delimitación de la Región Centro-Sur

El alcance del presente trabajo se desarrolló en una porción del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, la cual se definió con base en los límites de la cuenca de aportación superficial, delimitada mediante un análisis del terreno natural, de acuerdo

con este análisis se obtuvo la conformación de dos cuencas superficiales en el polígono administrativo, las cuales están separadas por un desnivel topográfico ubicado al centro.

Por lo tanto, los límites al Este, Oeste y Norte de la región centro-sur coinciden con los límites topográficos de la cuenca superficial; es decir, con los niveles de terreno más altos; y el límite al sur se definió con base en el límite administrativo, ya que la cuenca superficial se extiende más hacia zonas ubicadas al sur que quedan fuera del interés de este trabajo, ver Figura 7.

Así mismo, en la Región Centro-Sur se tiene la mayor presencia de aprovechamientos, lo cual se traduce en un porcentaje del 90% del volumen concesionado oficialmente, es decir, es la zona con mayor importancia desde el punto de vista económico. Otro aspecto para considerar es que en esta zona se tiene la mayor presencia de puntos de monitoreo del agua subterránea que se han reportado en estudios previos, por lo cual, las líneas equipotenciales de flujo tienen una mayor definición y confiabilidad.

Adicionalmente de acuerdo con el trabajo de (Cadenas, 2021) en la zona de estudio, se tiene en su mayoría la mejor calidad de agua para uso y consumo humano, por lo cual es de suma importancia para la población de Salinas.

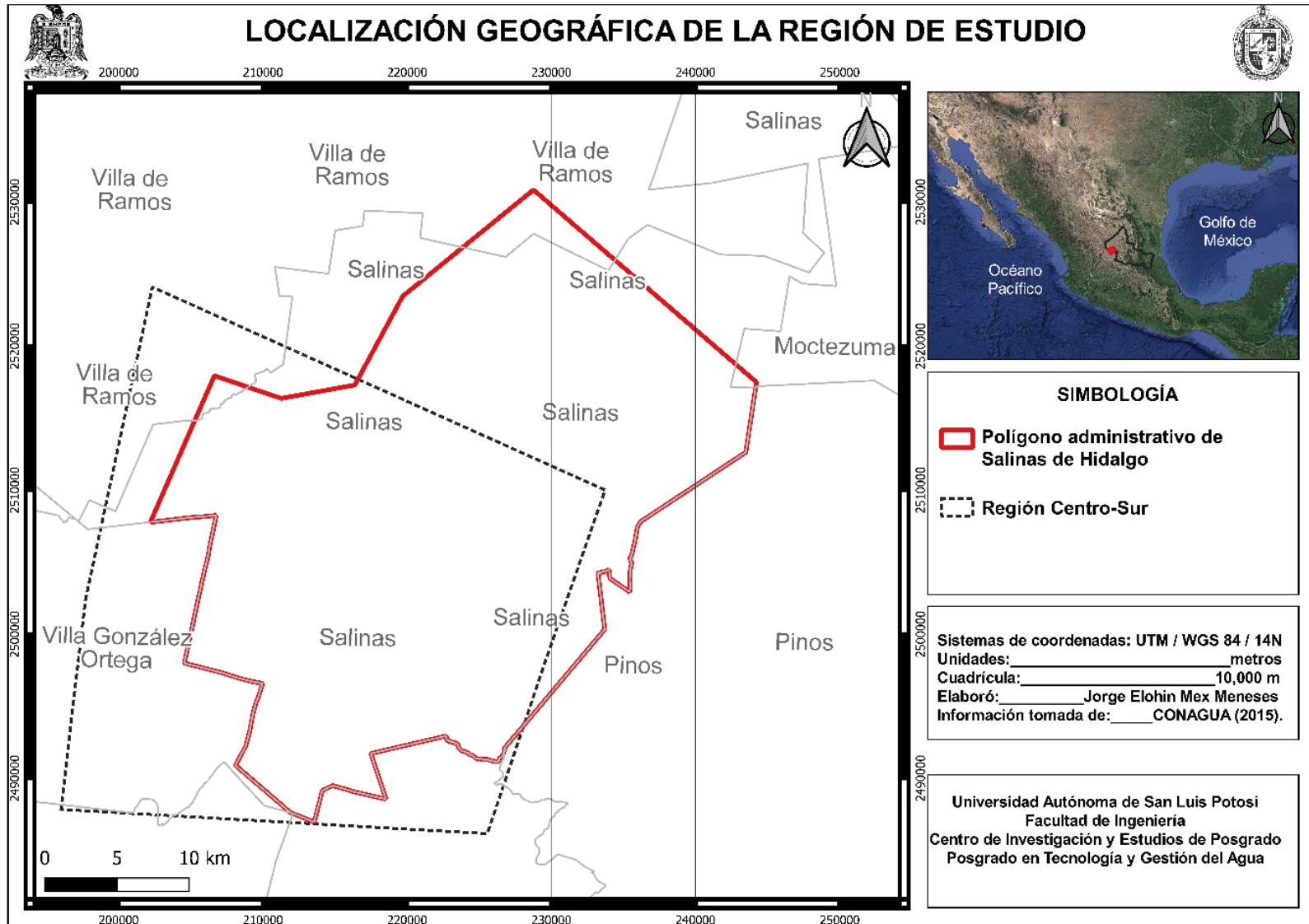


Figura 5. Ubicación de la región de estudio.

2.2 Clima

Por su posición geográfica, en la entidad de San Luis Potosí, se pueden apreciar tres zonas climáticas bien definidas; la porción oriental, desde el declive de la Sierra Madre Oriental hasta la planicie costera, en donde el clima predominante es cálido húmedo y subhúmedo; la región central con climas de semicálidos subhúmedos, a los secos templados y la región occidental en donde impera un clima de tipo seco (Instituto Nacional de Estadística [INEGI], 2002a).

Según los criterios de Wilhem Köppen modificados por Enriqueta García, para las condiciones de la República Mexicana, y como se observa en la Figura 6 en el Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, el clima en el área en su mayoría se clasifica dentro del tipo BS0 climas secos, subtipo BS0kw secos templados, y en menor proporción se clasifica del tipo BS1 semisecos, subtipo BS1kw semiseco templado; ambos con lluvias de verano y porcentaje de precipitación invernal entre 5 y 10 (CONAGUA, 2020).

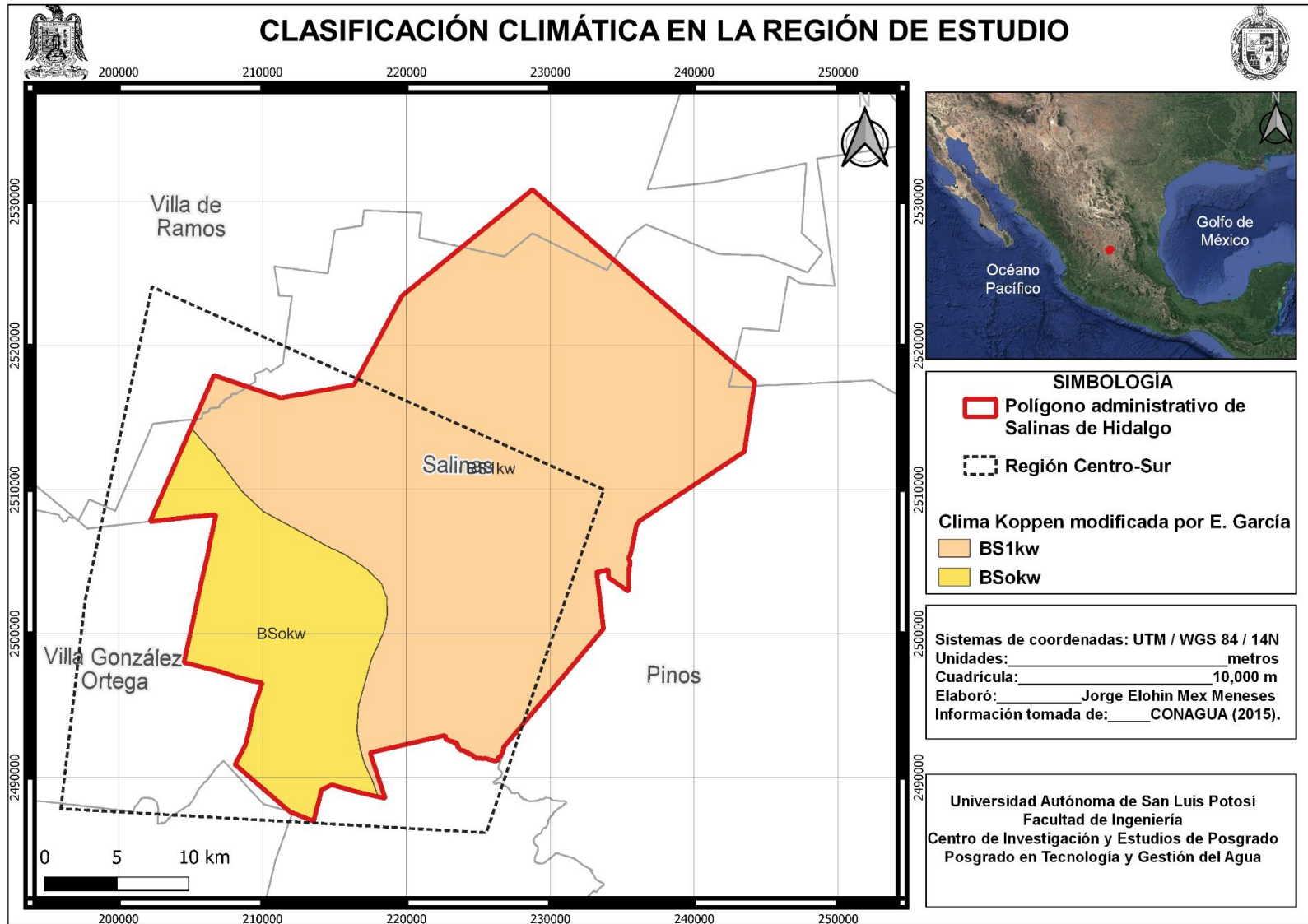


Figura 6. Distribución del tipo de clima en la región de estudio.

El promedio anual de la temperatura de la zona está comprendido entre 16°C y 17°C. Para el acuífero se consideró un promedio de 16.5°C. La precipitación media anual está comprendida en términos generales entre 350 mm/año y 425 mm/año, con un promedio general en la zona del valle de 375 mm/año, y en las zonas topográficamente altas de 415 mm/año. La evaporación potencial media del área es del orden de 1577.7 mm/año (CONAGUA, 2020).

2.3 Fisiografía

De acuerdo con la clasificación de provincias fisiográficas elaborada por la Dirección General de Geografía del INEGI, el estado de San Luis Potosí corresponde a tres provincias fisiográficas que son: Mesa del Centro, Sierra Madre Oriental y Llanura Costera del Golfo Norte (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2002a). El acuífero administrativo Salinas de Hidalgo se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Mesa del Centro, y en su mayor parte dentro de la Subprovincia Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecanas, ver Figura 7 y Figura 8 (CONAGUA, 2020).



Figura 7. Provincias Fisiográficas en la Región de Estudio.

Esta subprovincia comprende la porción centro-norte de la provincia. En ella dominan extensos terrenos áridos con lomeríos en el noroeste y sierras bajas en el sureste. Otros lomeríos están dispersos entre las zonas planas. En el suroeste se encuentran dos llanuras aluviales de cierta extensión, pero es la gran llanura desértica potosino-zacatecana, a unos 2,000 m de altitud y con piso de caliche (horizonte petrocálcico), la que domina en el occidente de la subprovincia. Hay también franjas bajas, delgadas y alargadas llamadas bajíos; entre éstos y las partes más elevadas se encuentra el horizonte petrocálcico impermeable a escasa profundidad del suelo, en cambio, en los bajíos los suelos son profundos, ver Figura 8. En la mitad este de la subprovincia se tienen amplias bajadas de suave pendiente (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2000a).



Figura 8. Subprovincias fisiográficas en la Región de Estudio.

2.4 Geomorfología

Geomorfológicamente la zona está constituida principalmente por sierras alargadas sobresaliendo de los extensos valles; el relieve está condicionado por las características litológicas y estructurales presentes.

El cerro del Peñón es la unidad que cuenta con mayor altura, la cual es del orden de 2680 msnm, dicho cerro es un intrusivo ígneo félsico, definido como pórfido granítico, encajonado por sedimentos mesozoicos.

El valle de la zona se puede clasificar como una unidad geomorfológica conformada principalmente por depósitos aluviales del Cuaternario, constituidos por material granular como son gravas, arenas, limos y arcillas, ubicados entre altitudes del orden de 2100 a 2200 msnm. Las sierras por su parte están constituidas principalmente por calizas del Cretácico (CONAGUA, 2020).

Se ha elaborado un modelo digital de terreno (Figura 9) a partir de imágenes ráster correspondientes a la Misión topográfica Radar Shuttle (SRTM) de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA); se utilizó la imagen N22W102 con resolución de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 m). Se observa que las elevaciones del terreno están comprendidas entre 1924 y 2740 m.s.n.m.,

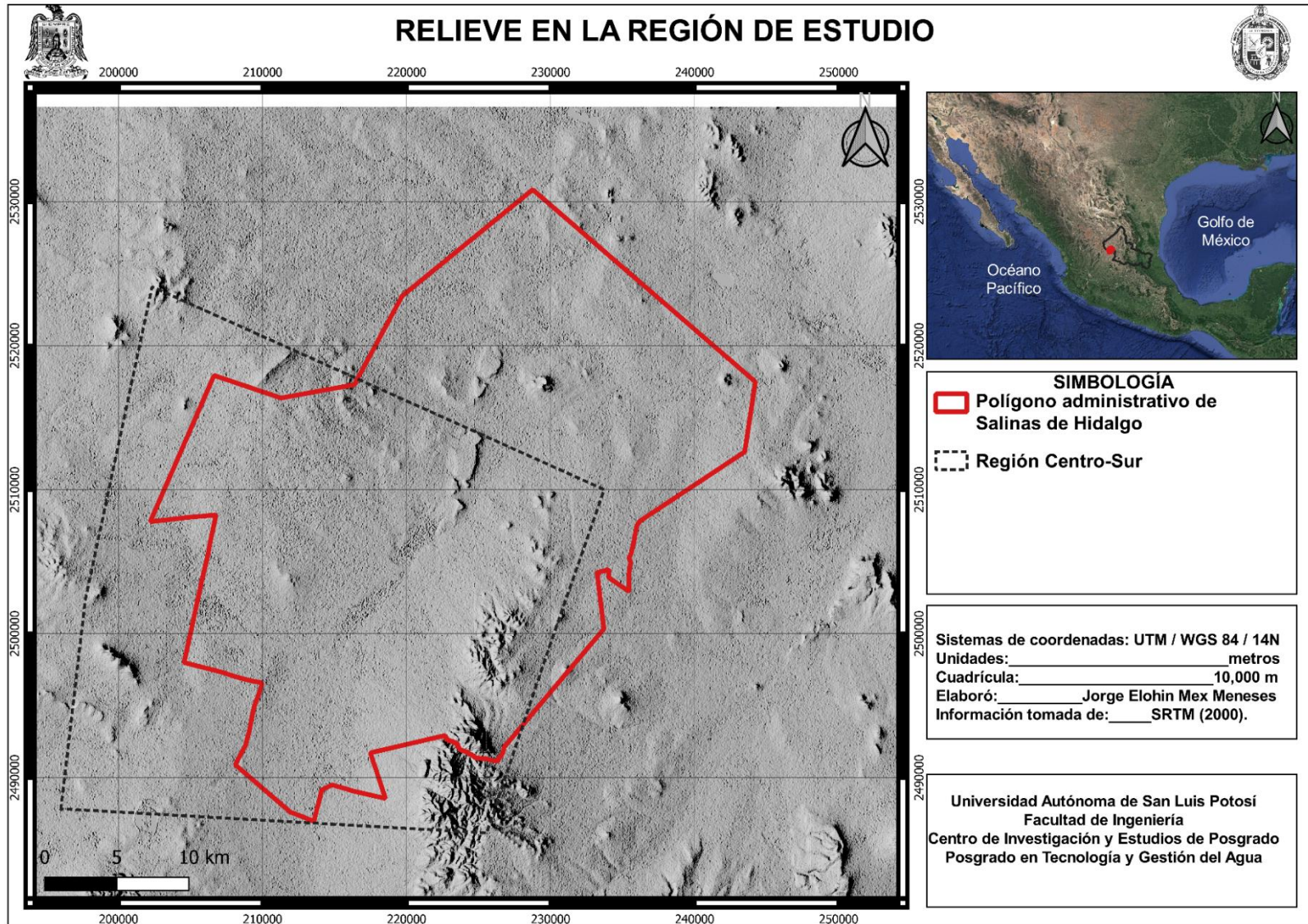


Figura 9. Modelo digital de terreno N22W102

2.5 Hidrología superficial

El acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo se encuentra inmerso en la Región Hidrológica Administrativa No.37 “El Salado”.

La Región Hidrológica “El Salado” corresponde a una de las vertientes interiores más importantes del país, se ubica en la altiplanicie septentrional, en toda la porción noroccidental del estado de San Luis Potosí; su extensión dentro de territorio potosino corresponde a 54.2% de la superficie total. Dentro de la entidad limita al sureste con la Región Hidrológica 26, Pánuco. Está constituida por una serie de cuencas cerradas que se caracterizan por la carencia de grandes corrientes superficiales Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI],2000b).

La Región Hidrológica no.37 se divide en seis distintas cuencas, en específico la región de estudio se encuentra dentro de la cuenca “E (FRESNILLO-YESCA)”. Esta comprende una pequeña porción en el occidente del estado de San Luis Potosí, que equivale a 4.10% de su extensión. Limita al este y sur con la cuenca conocida como San Pablo y otras (F), al norte con la cuenca Camacho-Gruñidora (D), mientras que al occidente limita con la Región Hidrológica 36.

Existen varias lagunas distribuidas en toda el área, como la Laguna La Mesilla, Laguna Santa Rosa y Laguna Salinas.

El drenaje en esta región es de tipo detrítico, de flujo intermitente, con pendientes fuertes, las que descienden de las partes altas y con alto grado de erosión; la mayoría de estos arroyos desaparecen al llegar a los valles aluviales, llevando agua únicamente en épocas de lluvias, las que generalmente son torrenciales.

Se ha realizado un análisis de escurrimientos utilizando el modelo digital de terreno (Figura 9) con resolución de 1 arco-segundo, los resultados muestran la conformación de dos cuencas superficiales (Figura 12), como se aprecia el acuífero administrativo se encuentra dividido por dos grandes cuencas, la ubicada al sur es la que tiene mayor interés sobre el desarrollo del presente trabajo, ya que en esta zona se encuentra la región de mayor actividad agrícola y por ende con mayor presencia de concesiones. Los escurrimientos parten desde el centro del acuífero administrativo y se dirigen hacia

el norte y sur; según lo confirman los perfiles de terreno mostrados en las Figura 10 y Figura 11, respectivamente

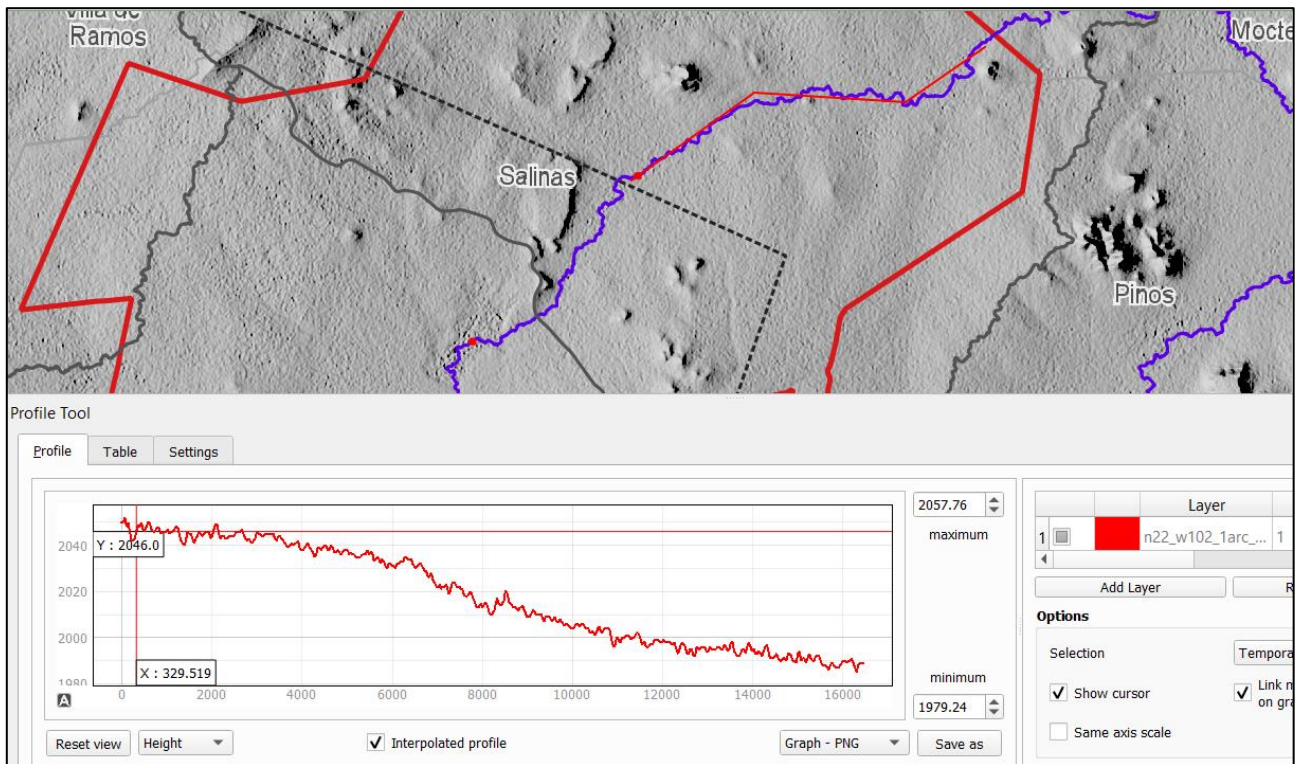


Figura 10. Perfil de terreno en cuenca norte.

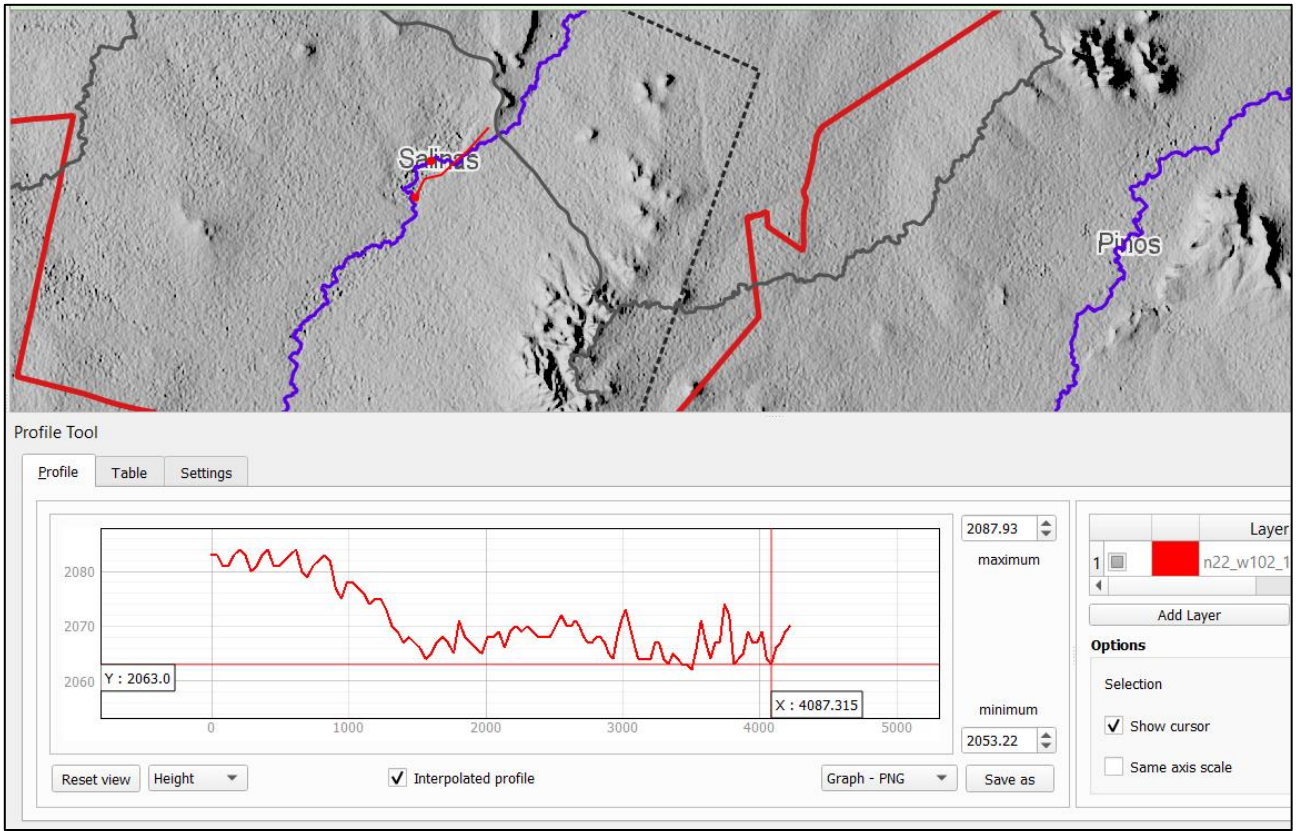


Figura 11. Perfil de terreno en cuenca sur.

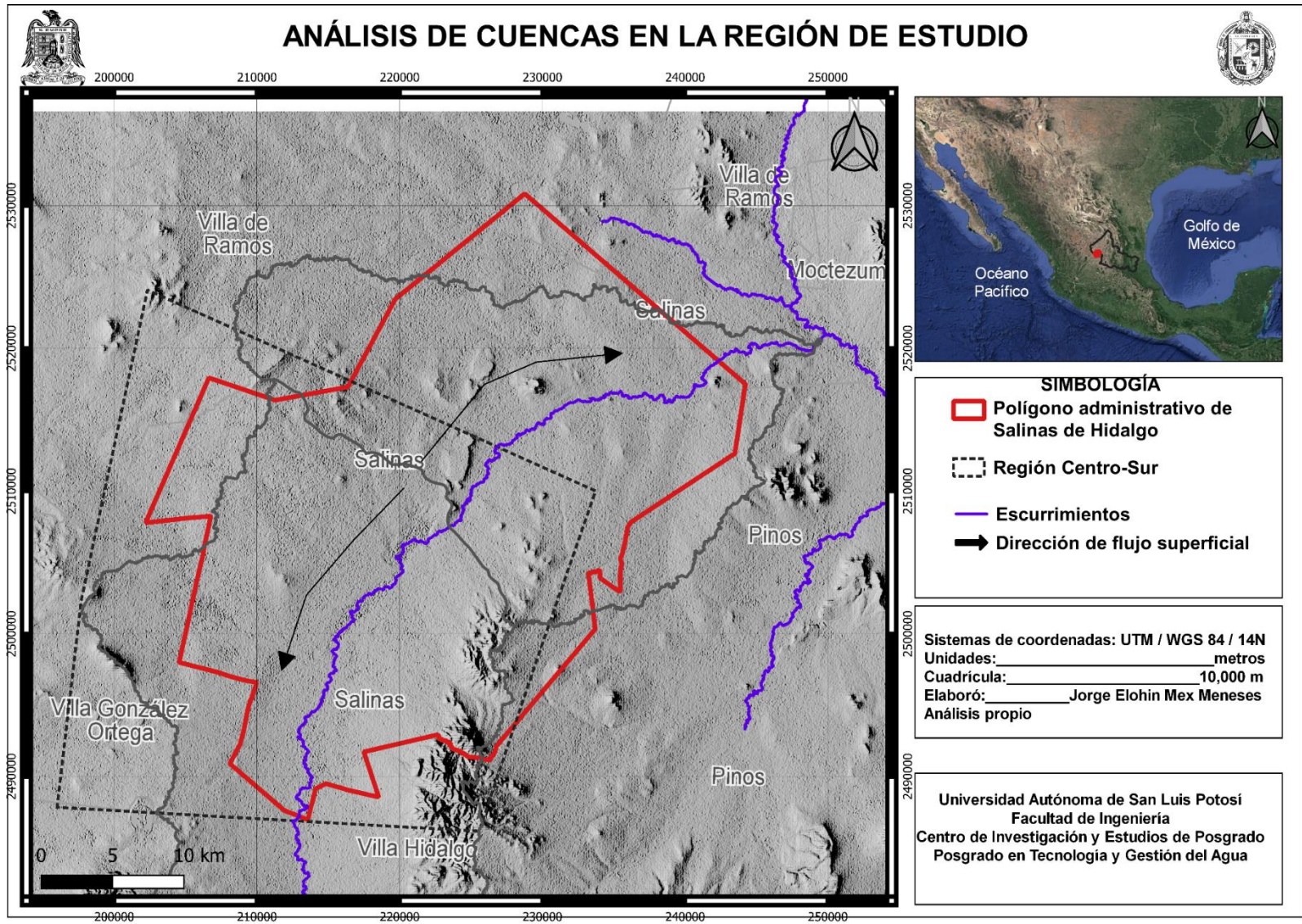


Figura 12. Definición de cuencas superficiales.

2.6 Edafología

El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, en la cual encuentra soporte la cubierta vegetal natural y gran parte de las actividades humanas.

La carta edafológica elaborada por la Dirección General de Geografía presenta la distribución geográfica de los suelos en el país, ordenados de acuerdo con la Leyenda de Clasificación de Suelos FAO/UNESCO 1968, modificado por la Dirección de Estudios del Territorio Nacional en 1970.

En la Figura 13 se muestran las unidades de suelo presentes en la zona de estudio según la clasificación antes mencionada. Como se observa la unidad de suelo correspondiente a Xerosol, es la que más área ocupada dentro de la región en cuestión.

Los Xerosoles se localizan en las zonas áridas y semiáridas del centro y norte de México. Su vegetación natural es de matorral y pastizal, y son el tercer tipo de suelo más importante por su extensión en el país. Tienen por lo general una capa superficial de color claro por el bajo contenido de materia orgánica. Debajo de esta capa puede haber un subsuelo rico en arcillas, o bien, muy semejante a la capa superficial. Muchas veces presentan a cierta profundidad manchas, aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza.

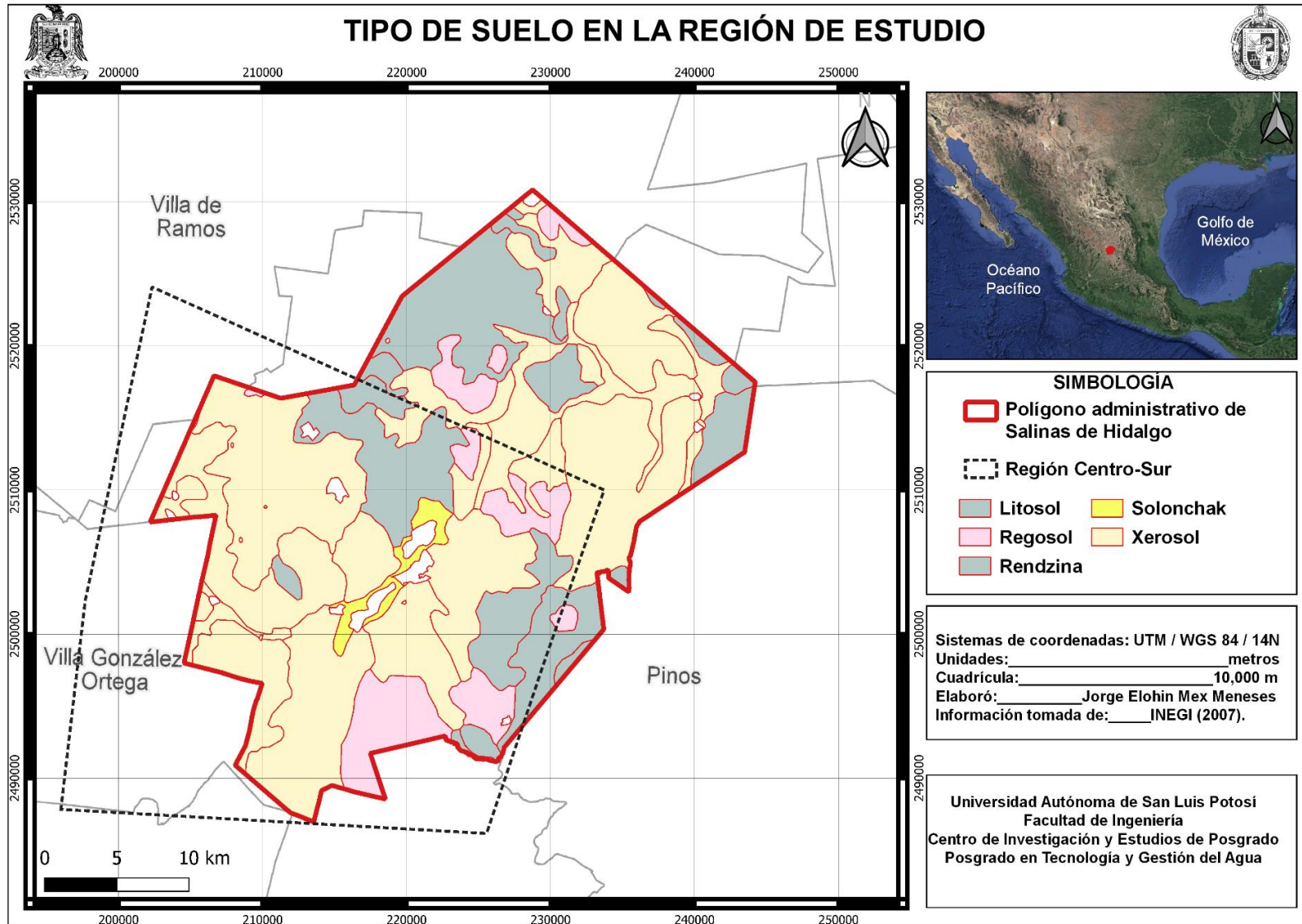


Figura 13. Distribución de los tipos de suelo en la Región de Estudio.

2.7 Usos del suelo y vegetación

La capa de Usos de suelo y vegetación contiene la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas con sus respectivas variantes en tipos de vegetación, de usos agrícolas, e información ecológica relevante.

Uso del suelo: Se incluyen los diferentes sistemas manejados por el hombre y que constituyen propiamente una cubierta de usos del suelo.

Tipos de vegetación: Esta información se refiere a las diferentes agrupaciones vegetales que se presentan en nuestro país, éstas forman parte de los grandes grupos de vegetación de la Información ecológica, florística y fisonómica (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2015).

En la Tabla 1 se muestran los diferentes usos de suelo y vegetación para la región de estudio, en su mayoría se cuenta con matorral desértico micrófilo (ver Figura 14).

Tabla 1. Porcentajes por Usos de Suelo y Vegetación.

CLAVE	DESCRIPCIÓN	%
MDM	Matorral desértico micrófilo	49.0
TA	Agricultura de temporal anual	27.1
MC	Matorral crasicaule	7.1
RA	Agricultura de riego anual	5.4
VSa/MDM	Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	2.6
MDR	Matorral desértico rosetófilo	2.1
PH	Pastizal halófilo	2.0
VSa/MDR	Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico rosetófilo	1.6
AH	Asentamientos humanos	1.4
PI	Pastizal inducido	0.6
PN	Pastizal natural	0.6
RS	Agricultura de riego semipermanente	0.4
H2O	Cuerpo de agua	0.2
VSa/BQ	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	0.1

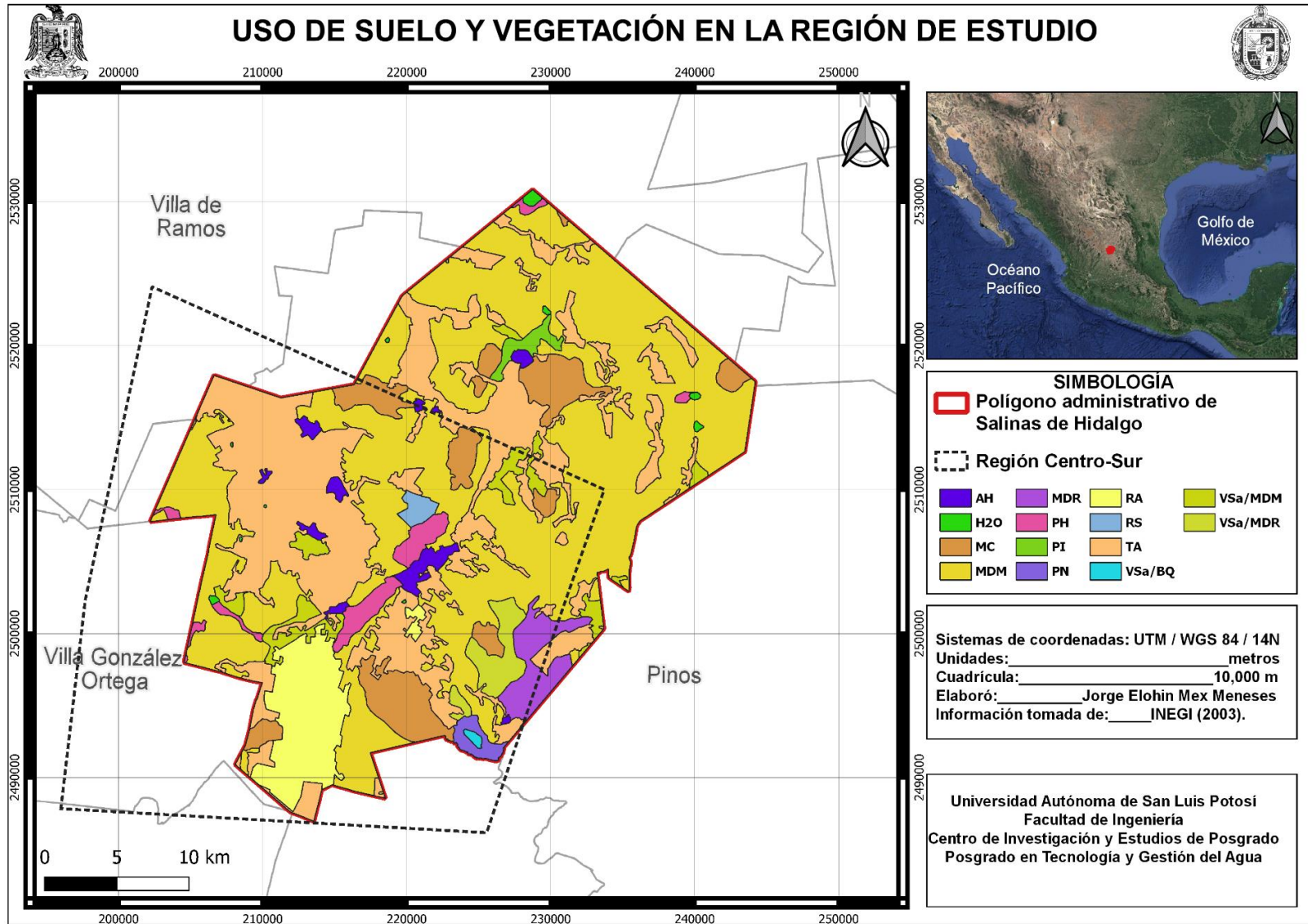


Figura 14. Usos de Suelo y Vegetación en la Región de Estudio.

2.8 Geología regional

El Altiplano Potosino forma parte de la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central, donde se encuentran una serie de campos volcánicos con orientación NW – SE que presentan características muy similares entre ellos (Guanajuato, Río Santa María y San Luis Potosí), los cuales iniciaron su actividad con erupciones de lavas muy dispersas de composición andesítica (45 Ma) y después de un *hiatus* emitieron su etapa más intensa de lavas y piroclásticos de composición dacítica y riolítica emitidos entre los 32 – 28 Ma (Tristán-González, 2009)

Como parte de este magmatismo se encuentra un conjunto de rocas volcánicas en el área de Salinas–Villa de Ramos, que en trabajos previos de cartografía geológica se había asociado al Campo Volcánico de San Luis Potosí (CVSLP). Estudios recientes de edades radiométricas y nuevos datos de geoquímica de esas rocas, han resaltado que tienen algunas diferencias significativas, por lo que (Rodríguez-León, 2012) propone separarlas como parte de otro campo volcánico, el Campo Volcánico Salinas–Villa de Ramos (CVSVR).

En la porción occidental del CVSVR afloran remanentes de secuencias vulcano-sedimentarias pertenecientes al Terreno Guerrero (Campa–Uranga & Coney, 1983) la cual está compuesta por depósitos terrígenos principalmente arenisca que se intercalan con horizontes calcáreos y andesitas.

En la región occidental del CVSVR se dio una etapa intermitente de actividad ígnea intrusiva cuyas rocas son generalmente de tipo granítico, granodiorítico y diorítico que se presentan en forma de lacolitos; y troncos de diferentes dimensiones; se hallan distribuidas en esta región (Labarthe & Aguillón R., 1986).

La Región Centro-Sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo en su mayoría se encuentra dentro de la Carta Geológico-Minera Salinas de Hidalgo F14-A62 (Figura 15).

De acuerdo con la distribución de los terrenos tectonoestratigráficos se ubica en los terrenos Guerrero y Sierra Madre, de igual modo, basados en la distribución de las cubiertas mesozoicas y cenozoicas (Tardy, 1986).

En el primero se tiene una secuencia de rocas de ambiente de arco insular de edad Neocomiano-Aptiano, mientras que, en el segundo, corresponde a la distribución de ambientes de edad mesozoicas y cenozoicas dentro del elemento paleogeográfico Cuenca Mesozoica del centro de México. Donde se tiene la presencia de rocas marinas que van del Triásico hasta el Cretácico superior. Dichos terrenos están en contacto a través de una zona de cizalla dúctil-frágil, originada por la colisión de arcos contra el continente (Tardy, 1986).

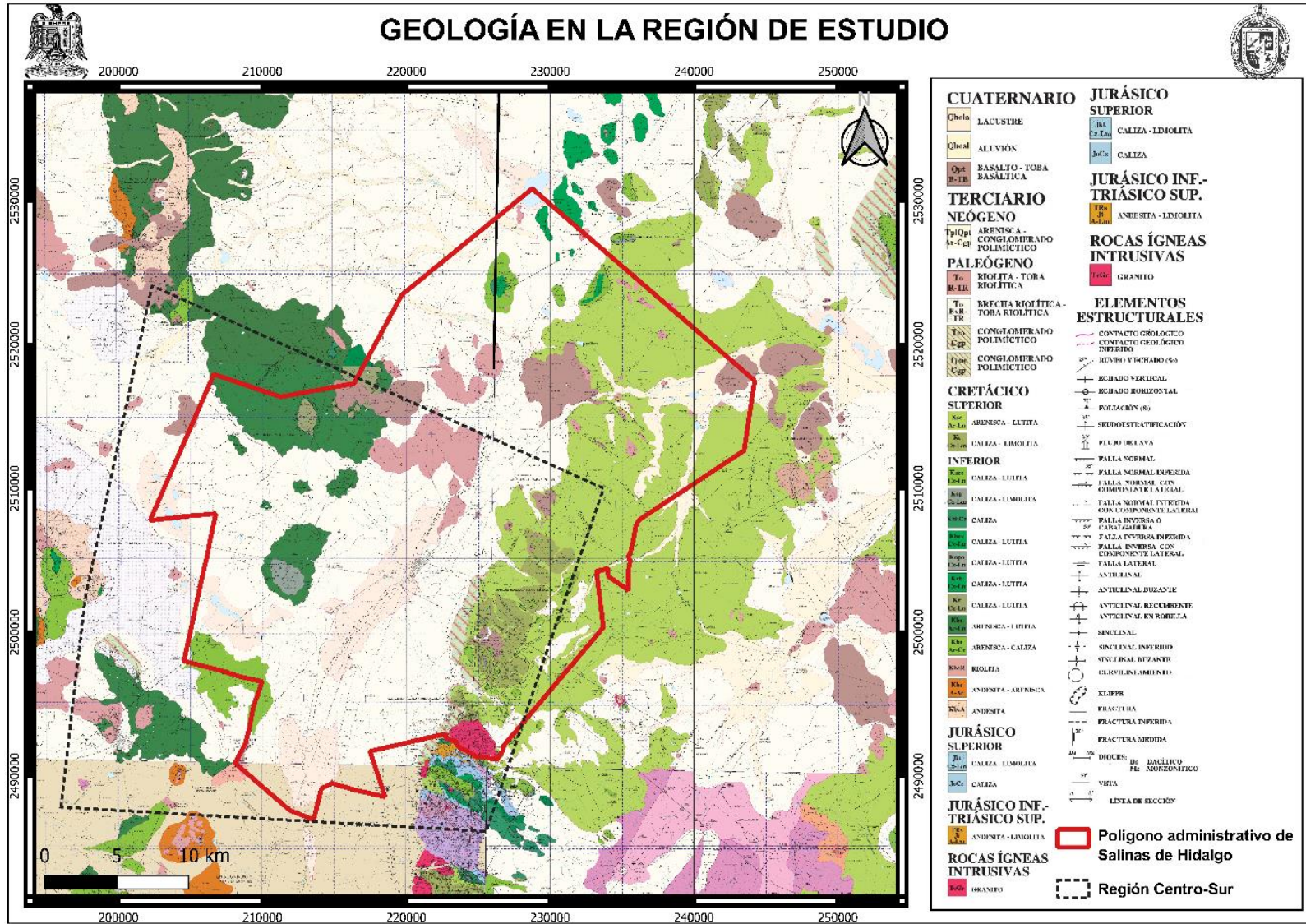


Figura 15. Carta geológica-minera Salinas de Hidalgo.

2.9 Estratigrafía

La columna estratigráfica y unidades cartografiadas la conforman rocas vulcano-sedimentarias, sedimentarias, ígneas intrusivas y extrusivas, así como depósitos continentales con edades comprendidas desde el Triásico al Reciente. A continuación, se presenta la descripción de la estratigrafía de las diferentes unidades que conforman la columna de la carta geológica-minera de Salinas de Hidalgo (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2005).

Rocas ígneas Intrusivas

2.9.1 Granito Peñón Blanco (Tgr)

No existe una definición formal para esta roca, aflora en la esquina sureste de la carta, y es conocido como cerro El Peñón Blanco, el cual se considera como un stock, y de pendientes abruptas, de forma elipsoide que guarda una dirección NW-SE, en donde su diámetro mayor es cercano a los 3 km.

Roca de estructura compacta y masiva, color blanquecino a rosa claro al intemperismo, textura porfirítica, presenta fenocristales de cuarzo, plagioclasa, ferromagnesianos (micas), piroxenos (hornblenda) y óxidos de hierro.

Jurásico Inferior – Triásico Superior

2.9.2 Andesita-Limolita (TRs Ji A-Lm) Formación Nazas

(Pantoja-Alor, 1972) definió a la Formación Nazas como una secuencia de sedimentos continentales que alternan con rocas volcánicas.

Unidad que aflora en la esquina sureste de la carta, al sur de San Juan Sin Agua, constituye lomeríos de mediana altura, presentándose en partes como delgadas franjas de dirección NWW-SEE, se encuentra constituida por una serie de limolitas de color rojizo a ocre, y derrames lávicos, tobas y piroclásticos de composición andesítica,

de color gris con tonos verde y morado, la presencia de pirita al oxidarse le da una tonalidad amarillenta, los flujos lávicos presentan alteración hidrotermal, manifestada por desarrollos secundarios de epidota y clorita, la muestra petrográfica tomada en las rocas andesíticas se clasifica como una roca piroclástica, con fragmentos de roca, cuarzo, feldespatos y minerales opacos como elementos principales y Sericita, minerales arcillosos, sílice, hematita, limonita y calcita como secundarios, con una fuerte alteración, por lo que no fue posible determinar con exactitud a que tipo de toba pertenece.

Jurásico Superior

2.9.3 Caliza (Jo Cz) Formación Zuloaga

(R. Imlay, 1938) propone formalmente el nombre de Formación Zuloaga a un paquete de calizas que se localizan en la sierra Sombreretillo, al norte del estado de Zacatecas. Su afloramiento se restringe a la esquina SE de la carta, al sur de San Juan Sin Agua, y presenta forma de delgadas franjas de orientación NWW-SEE.

Está constituida por una caliza de color gris claro a oscuro a la intemperie, color gris negro a café en roca fresca, compacta, densa y en partes masiva, en estratos medianos a gruesos con vetilleos de calcita, y microfracturas perpendiculares a la estratificación, presenta huellas de disolución y oquedades, se le puede apreciar fragmentos de coral y nerineas y nódulos de pedernal gris claro, castaño a negro, característicos de esta unidad.

2.9.4 Caliza-Limolita (Jkt Cz-Lm) Formación La Caja

(R. Imlay, 1938) define una secuencia de 83 m de espesor formada por calizas limolíticas de color ocre y blanquecino, con estratos de pedernal, así como calizas arcillosas fosfatadas, pedernal calcáreo fosfatado, calizas gris rojizas y limolitas con concreciones fosilíferas de caliza.

Se encuentra expuesta en la esquina SE de la carta, al sur de San Juan Sin Agua, su afloramiento se presenta de forma irregular siguiendo una dirección casi-E-W, forma

parte de la sierra El Peñón Blanco. Esta unidad se encuentra formada por calizas arcillosas con intercalaciones de limonitas que hacia la cima se hace más arcillosa, de color gris oscuro con esporádicas bandas de pedernal negro, su estratificación es de mediana a delgada, de textura wackstone-grainstone, pudiendo también ser clasificada como una Calcarenita; una característica es en las calizas más arcillosas en donde se presentan nódulos calcáreos, frecuentemente fosilíferos, las limolitas son de color rosáceo y violeta y sus estratos son de delgados a laminares.

Cretácico Inferior

2.9.5 Andesita (Kbe A)

Esta unidad está expuesta en la porción centro poniente de la carta, morfológicamente forma franjas alargadas de dirección norte-sur, formando sierras de baja altura y lomeríos suaves.

Secuencia constituida por Pillow lavas y derrames de composición andesítica-basáltica. La roca presenta una coloración verdosa que le es muy característica, así como tonalidades azules, al intemperismo presenta un color amarillento, se observa fuertemente foliada, así como un intenso fracturamiento que en parte se encuentra relleno por cuarzo y calcita, de textura fanerítica, megascópicamente se le observa plagioclasas, piroxenas subordinadas, ferromagnesianos y calcita secundaria, textura afanítica a fanerítica.

2.9.6 Andesita-Areniscas (Kbe A - Ar)

Sus principales afloramientos lo constituyen derrames y flujos de composición basáltico-andesítica, con intercalaciones de areniscas volcanoclásticas y calcáreas. Presenta una textura porfídica, con matriz desvitrificada, megascópicamente sus minerales más abundantes son, plagioclasas sódicas alteradas a Sericita y minerales arcillosos; ortoclasas cubiertas parcialmente por calcita y vidrio desvitrificado que forma parte de la matriz junto con hematita y sílice criptocristalina. Las areniscas son

de grano medio a grueso, constituidas principalmente de cuarzo, feldespatos y líticos, embebidos en una matriz silicio calcárea.

2.9.7 Riolita (Kbe R)

Esta unidad se tiene expuesta en la porción centro poniente de la carta, su forma de afloramiento es alargada con una dirección NW-SE y está afectado tectónicamente. Presenta un color rosa claro a blanco, y grisáceo al intemperismo, constituida de flujos, brechas y tobas de composición riolítica, con una fuerte silicificación y parcialmente alterada a minerales arcillosos-sericita y hematina, textura piroclástica, con plagioclasas sódicas en micro y fenocristales hipidiomórficos, hematita, pirita y magnetita diseminada, algunos feldespatos potásicos y cuarzo en fenocristales alterados, empaquetados en una matriz sílice arcillosa.

2.9.8 Arenisca Caliza (Kbe Ar-Cz)

Secuencia alternante de sedimentos marinos, pelíticos, arcillosos y calcáreos con radiolaritas, deformados y foliados, correlacionables con esta unidad (G. Espinosa, 1991).

Unidad constituida por una alternancia de areniscas, filitas, limolitas calcáreas, calizas arcillosas con radiolaritas y esporádicos bancos calcáreos dolomitizados dentro de la secuencia. Su color es gris claro con manchones blanquecinos, en general su estratificación se considera delgada de unos cuantos centímetros hasta 10 cm, algunos de los horizontes calcáreos de textura packstone se observan como lentes entre las areniscas, areniscas calcáreas y lutitas.

2.9.8 Arenisca-Lutita (Kbe Ar-Lu)

Alternancia de areniscas y lutitas intercaladas con grawacas, con algunas capas y lentes de caliza micrítica-arenosa, con alto contenido de cuarzo y poco feldespato.

Esta unidad es la de mayor exposición, aflora en la porción norte, centro, suroeste y poniente de la carta.

Se presenta de color café oscuro, con tonalidades amarillentas, al fresco presentan color verdoso a ocre, con mediana intensidad a la fractura, constituida por una alternancia rítmica de areniscas y lutitas intercaladas con grawacas en capas de 5 a 25 cm de espesor, así como intercalaciones de capas y lentes de caliza arenosa y esporádicamente presenta flujos de andesitas de color verde olivo.

2.9.9 Caliza-Lutita (Kv Cz-Lu)

Secuencia no muy potente de calizas arcillosas, dolomitas, lutitas calcáreas y grawacas en estratos delgados con lentes de pedernal negro y radiolaritas.

Consiste en una secuencia de calizas con intercalaciones de lutitas, limonitas y bandas de pedernal negro. En donde las calizas presentan un color gris, café claro, gris oscuro a negro, e intemperiza en gris claro a amarillento ocre, textura mudstone, su estratificación es de delgada a mediana con estratos que varían 0.01 a 0.30 m; las lutitas y limolitas son de color gris, café a ocre, con estratificación delgada, se presenta fuertemente jasperizada.

2.9.10 Caliza - Lutita (Kvh-Cz-Lu)

Su litología está representada predominantemente por calizas, las cuales en partes presentan intercalaciones de lutita: las calizas presentan un color gris a gris oscuro, al intemperismo es de color amarillo, con estratos medianos a gruesos su textura es packstone a wackstone, en donde se hace más arcillosa se intercalan con lutitas calcáreas de estratificación delgada, de color rosáceo, así como intercalaciones de pedernal negro con radiolarios.

La unidad se encuentra fuertemente deformada, plegada y fallada, por lo que es difícil estimar su espesor, estimándose su exposición en 30 m.

2.9.11 Caliza - Lutita (Kapa-Cz-Lu)

Su litología está constituida por calizas con intercalaciones de lutitas; las calizas son de color gris oscuro a negro, al intemperismo presentan un color blanco y amarillo, de textura packstone wackstone, su estratificación es delgada a mediana y en partes ondulante, muy silicificada, presenta vetillas de calcita, así como interstratificaciones de radiolaritas y de pedernal de hasta 5 cm, las lutitas presentan un color rojizo a violeta.

Esta unidad se encuentra fuertemente deformada, plegada y fallada, por lo que es difícil estimar su espesor, estimándose su exposición en 30 m.

2.9.12 Caliza - Lutita (Kbev Cz-Lu) Formación Taraises

La unidad consiste de caliza arcillosa, limolita y lutita calcárea laminar, en general los horizontes calcáreos presentan color gris claro a blanquecino, las lutitas y limolitas son de color verde, para las primera y rosáceo-violeta para las segundas; la estratificación es de delgada a mediana, la caliza presenta una textura packstone-wackstone, con algunas bandas delgadas de pedernal hacia la cima, las limolitas y lutitas se encuentran interstratificadas en la parte media y base de la unidad; debido al tectónismo sufrido por la unidad, está presenta algunos pliegues de corrimiento y cabalgaduras intraformacionales (no cartografiables).

2.9.13 Caliza (Khb Cz) Formación Cupido

(R.W. Imlay, 1937) definió como Formación Cupido a unas calizas en estratos medianos a gruesos de color gris oscuro, que al intemperizarse adquieren un color gris rosáceo claro, con abundantes concreciones de pirita y nódulos de pedernal gris. Consiste en calizas microcristalinas de color gris claro, en capas medianas a gruesas, con aisladas laminaciones de limolita de color rojizo, con frecuentes lentes de pedernal castaño y negro, que hacia la parte superior de la formación pasan a bandas de pedernal negro, presenta líneas estilolíticas y concreciones de hematita, delgadas vetillas de calcita blanca.

2.9.14 Caliza-Limolita (Kap Cz-Lm) Formación La Peña

(R. W. Imlay, 1986), propuso el término de Formación La Peña para distinguir a dos miembros; el inferior constituido por caliza y el superior por lutita y caliza, que se encuentran entre las formaciones Cupido y Aurora. Después (Humphrey, 1949) sugirió sólo se usará este nombre para la parte superior de esta unidad.

Su distribución dentro de la carta es restringida, aflorando al oriente y sureste SE de la carta, localmente al NE y SE de San Juan Sin Agua, forma principalmente puertos de erosión suave.

Está constituida por una caliza arcillosa, limolita y lutita, las primeras son de coloración gris claro a oscuro y las segundas de color amarillo-rosáceo, su estratificación es delgada de 0.05 a 0.15 m y laminar (lutitas-limolitas), las calizas son de textura packstone, presentando delgadas bandas de pedernal negro de hasta 4.0 cm de espesor, con tonalidades blanquecinas, es común encontrar fósiles (amonoideos) piritizados y otras reemplazadas por carbonato de calcio. Las lutitas y limolitas se encuentran interestratificadas.

2.9.15 Caliza - Lutita (KaceCz-Lu) Formación Cuesta del Cura

Descrita por (R. W. Imlay, 1986) refiriéndose a una secuencia de calizas delgadas de estratificación ondulada e irregular, con abundantes bandas y nódulos de pedernal negro, que afloran en la esquina SE y límite oriental de la carta.

Unidad constituida por horizontes ondulantes de caliza microcristalinas de color gris a gris oscuro, la textura es packstone-wackestone, presentando bandas ondulantes de pedernal negro (hasta de 0.15 m de espesor) y escasos lentes del mismo material, se le observan fósiles (amonites), y presenta intercalaciones de lutitas y limolitas de color café claro, principalmente hacia la parte superior de la unidad, hacia donde la caliza se va haciendo más arcillosa. La estratificación de las calizas es de mediana a delgada (0.10 a 0.30 m) y la de los horizontes de lutitas y limolitas van de laminares a no mayores a 0.05 m.

Cretácico Superior

2.9.16 Caliza-Limolita (Kt Cz-Lm) Formación Indidura

Aflora en el límite oriente de la carta, al sur de cerro El Peñón Blanco, y al noreste de la población de Salto Matorral, se presenta conformando las partes medias y altas de serranías de mediana elevación, de dirección NW-SE.

Esta unidad está constituida por calizas, calizas arcillosas, limolitas y lutitas; las calizas son de color gris oscuro y tonalidades amarillentas, en tanto que las lutitas y limolitas presentan un característico color rosa y violeta con tonalidades blanquecinas. Su estratificación es de delgada a media con horizontes de hasta 40 cm, presenta un marcado fracturamiento que permite que algunos de sus estratos formen lajas, en donde es común encontrar fósiles como *innoceramus labiatus*; las limolitas y lutitas son laminares, y se encuentran interestratificadas con las calizas.

2.9.17 Arenisca-Lutita (Kse Ar-Lu) Formación Caracol

(R. W. Imlay, 1986) designó con el nombre de Formación Caracol, a una secuencia de tobas desvitrificadas intercaladas con lutitas y con algunos estratos de calizas.

Aflora en la porción sureste, en los límites poniente y sur de la carta, constituye los flancos de las sierras, lomeríos de baja altura y en partes aflora en los bajíos.

Consiste en una secuencia de lutitas y areniscas con algunas intercalaciones de caliza, en general presentan un color verde claro a verde manzana al fresco e intemperizan en color café claro y amarillento, la estratificación es delgada a mediana, y esporádicamente gruesa, principalmente en los horizontes calcáreos. La arenisca es de grano medio a grueso y con contenidos de cuarzo, feldespato, algunos líticos y esporádicamente ferromagnesianos, cementados en una matriz silico-arcillosa y ocasionalmente calcárea, por sus contenidos pasa a ser una arcosa o grauwaca; presenta un fracturamiento esferoidal. Por su parte las lutitas son rocas muy físciles, con un fracturamiento en forma de punta de lápiz, lo cual la hace deleznable; las calizas presentan una textura packstone-wackstone.

Terciario Paleógeno

2.9.18 Conglomerado Polimíctico (Tpae Cgp)

Esta unidad está constituida por un conglomerado polimíctico formado por clastos subredondeados a subangulosos de calizas, lutitas, areniscas, cuarzo y granito, cementados en una matriz arcillosa calcárea, en partes se encuentra bien consolidada. Su espesor se estima en aproximadamente en 50 m, siendo característico el no presentar fragmentos de rocas volcánicas terciarias.

Es una unidad formada por la desintegración y acumulación de rocas preexistentes, asociado a posibles estructuras de tipo deltaíco o paleo canales.

2.9.19 Conglomerado polimíctico (Teo Cgp) Conglomerado Zaragoza

Se encuentra formado principalmente por fragmentos subredondeados a subangulosos, constituidos por clastos de caliza, lutita, pedernal y granito variando su granulometría de unos cuantos milímetros hasta 20 cm, la unidad se encuentra de levemente a consolidada. Su espesor no es reconocible en su totalidad, estimándose en 25 a 30 m aproximadamente.

Es producto de la desintegración de las rocas preexistentes depositadas y consolidadas en taludes y paleo canales.

2.9.20 Brecha Volcánica Riolítica-Toba Riolítica (To BvR-TR)

Unidad sin definición formal, referida para una toba explosiva compuesta por numerosos fragmentos angulares de rocas ígneas.

Su litología está dada por intercalaciones de una toba lítica y brechas explosivas. De color rosa al intemperismo y que al fresco presenta tonos rojizos y naranja, presenta abundantes líticos volcánicos, en matriz fina al parecer de ceniza y sílice. La brecha presenta fragmentos de 3 a 40 cm, de riolita, y de algunos fragmentos triturados de las rocas preexistentes como son caliza y jaspe, así mismo en esta misma roca se

observaron horizontes piroclásticos el cementante es lapilli y cenizas volcánicas, hacia la base consiste en una toba de grano fino, bien estratificada, compacta y en ocasiones se le observa estratificación cruzada.

2.9.21 Riolita-Toba Riolítica (To R-TR) Panalillo

Los principales afloramientos se observan hacia las porciones NE y SW de la carta, al norte-noreste de Salinas de Hidalgo. La unidad está compuesta por tobas líticas y derrames riolíticos, en roca sana presenta un color rosa y rojo claro y al intemperismo en rosa y gris claro, se presenta como una roca compacta, estructura fluidal, textura fanerítica, equigranular, matriz criptocristalina con fenocristales de cuarzo, feldespatos, sanidino y vidrio. En partes se observa pseudoestratificada. Las riolitas en algunas localidades presentan abundantes vacuolas y esferulitas, que en ocasiones están rellenas de cuarzo, calcita y calcedonia, la toba riolítica presenta un color amarillento hacia su base se aprecia un vitrificado color verde de aspecto aperlado.

Terciario Neógeno

2.9.22 Arenisca-Conglomerado Polimíctico (Tpl Qpt Ar- Cgp)

No existe una definición formal para esta unidad, siendo la unidad de mayor distribución en la carta, aflorando en la mayor parte de los bajíos, taludes de las serranías y lomeríos existentes.

Esta unidad está constituida por fragmentos de las rocas preexistentes dentro de la carta constituida por clastos redondeados y semiangulosos, de granulometría de unos milímetros, hasta 25 cm, en partes se encuentran bien compactos, pero en general son de baja compactación, teniendo horizontes de arena y arenisca y areniscas conglomeráticas interestratificada, donde se puede observar estratificación cruzada en algunas localidades.

Su origen está asociado a la desintegración de rocas preexistentes, acarreadas y depositas en depresiones como cuencas, deltas y paleo canales.

2.9.23 Basalto-Toba Basáltica (Qpt B-TB) Formación Las Joyas

Cuaternario

Fue propuesta formalmente por (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982) como Formación Las Joyas, dividiéndola en dos miembros: Piroclásticos y flujos de basalto, los cuales han sido agrupados en el presente estudio en una sola unidad.

Unidad conformada por dos miembros, el primero de ellos, por derrames de basalto, los cuales se presentan en roca sana de color negro y tonalidades rojizas, masivos, de estructura mayormente vesicular y fracturamiento concoideo que les confiere forma de cebolla; su textura es holocristalina, microporfirítica, con fenocristales de plagioclasa y olivino alterado a iddingsita. El segundo miembro, lo conforman brechas, bombas, flujos de escombros, tobas de lapilli, escoria basáltica y fragmentos de basalto en una matriz de ceniza volcánica, observándose también aislados nódulos de herzolita y rocas metamórficas como granulitas (rocas del manto). El horizonte de piroclastos es el que se observa mayormente alterado por oxidación (hematita).

2.9.24 Aluvión (Qhoal)

No se tiene una definición formal, para este material de acarreo, su exposición distribución son restringidas, teniéndose en pequeños afloramientos en la porción sureste y oriente de la carta. Es un material detrítico no consolidado constituido por arcilla, limo, arena, grava depositada en tiempo geológico reciente por corrientes, en planicies de inundación, deltas y abanicos. Se distribuyen a lo largo de los cauces de corrientes y terrazas aluviales. El espesor varía de algunos centímetros a 1.60 m. Su relación estratigráfica es cubriendo a las unidades a las rocas preexistentes que afloran dentro de la carta.

2.9.25 Lacustre (Qhola)

Depósitos característicos en la región, los cuales se distribuyen en la parte central y sur de la carta.

Dichas lagunas corresponden a cuencas endorreicas, en donde se han depositado sedimentos finos de diversa composición y granulometría, estos son lúicos de grano fino a medio, con amplio desarrollo de horizontes petrocálicos. El espesor de los sedimentos es variable y difícil de determinar, estimándose en 3.0m.

Las condiciones climáticas han producido condiciones de evaporación con el consiguiente depósito de sales, estas mismas condiciones son producidas artificialmente para la obtención de dichos elementos.

2.10 Marco Hidrogeoquímico

A continuación, se describen el análisis de los resultados de laboratorio obtenidos de un total de 35 muestras, de las cuales 12 fueron agua de pozo y 23 de norias reportados en el trabajo de Tesis de (Cadenas, 2021) en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo. En la Tabla 2 y Figura 16 se muestra las características generales de cada uno de los aprovechamientos analizados.

En primer lugar, se verificaron la confiabilidad de los resultados analíticos para cada muestra mediante el cálculo del balance de electroneutralidad, seguidamente se agruparon por anión y catión dominante (aquel cuya concentración en meq/L representara más del 50%), también se clasificaron en diagramas hidrogeoquímicos y, por último, se interpretaron con base en la secuencia teórica de Chevotareb. Todo esto, con el objetivo de tener elementos que ayuden a comprender el comportamiento de los sistemas de flujo de aguas subterráneas.

Tabla 2. Muestras descripción y ubicación de muestras.

Muestra	X(m) UTM	Y(m) UTM
Noria 322	208635	2505287
Pozo 574	222958	2503543
Noria C4	225627	2510800

Noria C25	230633	2510507
Noria C20	222485	2522316
Noria 424	231097	2520141
Pozo C5	224413	2506495
Noria 46	231492	2506797
Noria C21	235414	2517116
Noria C22	236428	2516751
Noria N09	213008	2490486
Noria C7	208509	2497342
Noria 250	213993	2506948
Pozo C2	218647	2499347
Noria C17	214564	2518200
Pozo C46	222644	2494081
Pozo N6	229270	2514861
Noria 141	215994	2514405
Noria 156	220935	2516358
Noria 205	214996	2510579
Noria 6	221030	2506183
Noria 220	212459	2507818
Pozo C47	220124	2500189
Pozo C24	226195	2515628
Noria 193	212226	2515917
Noria C45	223416	2493606
Noria N13	225569	2513079
Pozo 832	225987	2495518
Pozo337	216839	2502995
Noria NIIC	210045	2491578
Noria 186	206744	2515565
Pozo C1	210403	2486676
Pozo 216	213024	2507710
Pozo C26-A	214003	2496472
Noria 226	205394	2510340

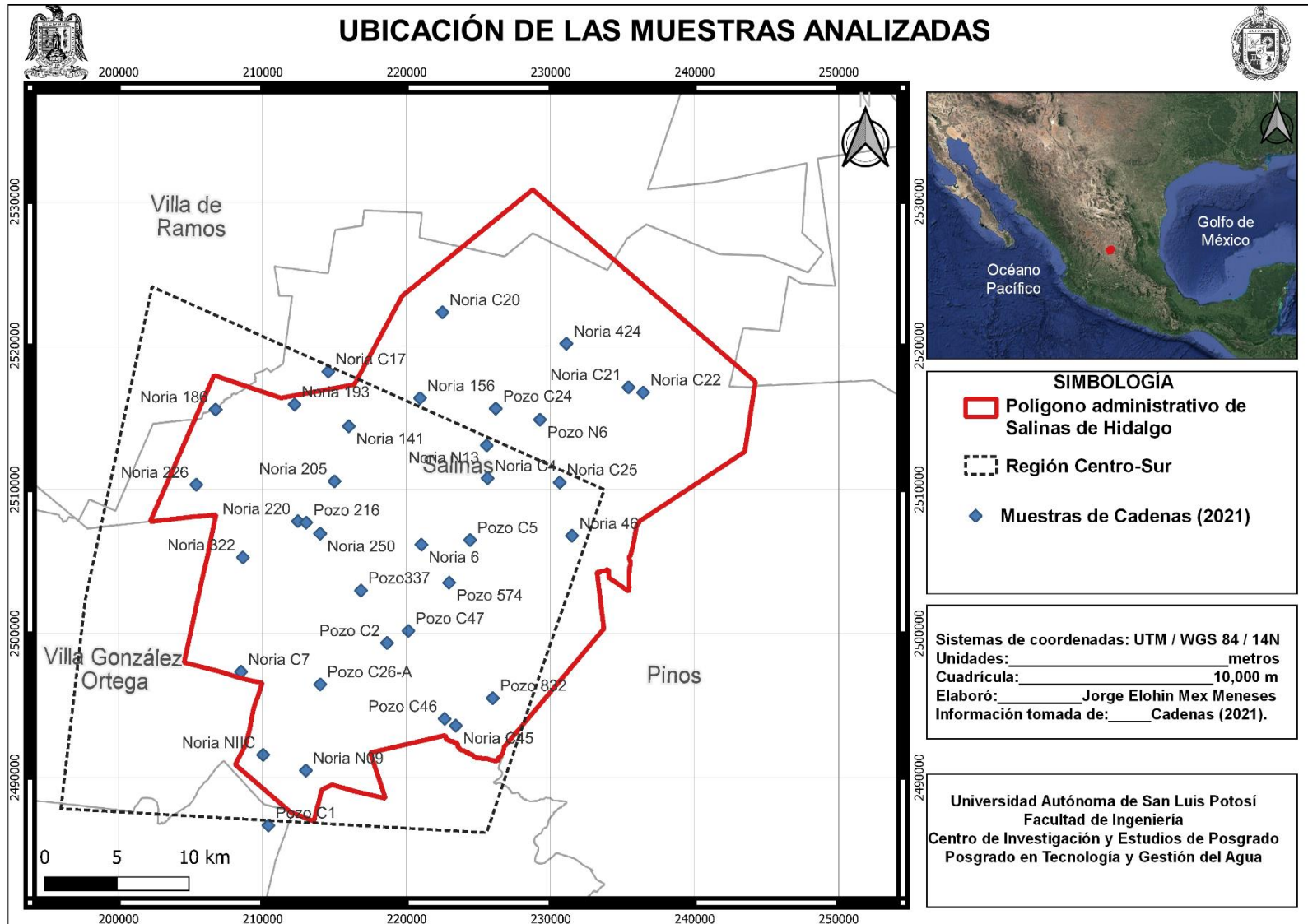


Figura 16. Ubicación de las muestras recolectadas en pozos y norias.

2.10.1 Condición de Electroneutralidad

En la Tabla 3 se presentan los resultados analíticos de los elementos mayores y expresados en meq/L, Appelo & Postma (2005) sugiere que la precisión de los análisis de laboratorio para los iones principales se puede estimar a partir de la condición de electroneutralidad (E.C.) ya que la suma de las cargas positivas y negativas en el agua debe ser igual a la siguiente expresión:

$$EC (\%) = \frac{(Suma\ de\ cationes + Suma\ de\ aniones)}{(Suma\ de\ cationes - Suma\ de\ aniones)} \times 100$$

En la fórmula, los cationes y aniones se expresan en meq/L, generalmente para los cationes se consideran: Na⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺, y para los aniones: Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ y NO₃⁻, los resultados de la condición de electroneutralidad se muestran en la Figura 17, como se observa todas las muestras presentan un error menor al +- 5%.

Tabla 3. Elementos mayores expresados en meq/L.

Muestra	meq/l HCO ₃	meq/l CO ₃	meq/l Cl	meq/l SO ₄	meq/l N- NO ₃	meq/l F	meq/l Br	meq/l Na	meq/l K	meq/l Ca	meq/l Mg	meq/l Sr	meq/l Li
Noria 322	6.416	0.000	5.342	3.951	0.864	0.110	0.018	7.351	0.983	4.832	2.449	0.048	0.022
Pozo 574	3.842	0.000	2.290	4.082	0.157	0.058	0.007	3.788	0.391	3.418	2.120	0.036	0.005
Noria C4	8.749	0.980	1.717	0.728	0.104	0.081	0.006	9.094	0.324	1.202	0.588	0.005	0.028
Noria C25	4.842	0.000	0.859	0.676	0.381	0.074	0.003	2.806	0.577	1.663	1.229	0.023	0.007
Noria C20	3.856	0.000	4.006	1.425	0.381	0.111	0.010	2.833	0.921	2.644	2.513	0.050	0.014
Noria 424	7.554	0.980	5.056	0.786	0.360	0.447	0.021	11.080	0.039	2.083	0.613	0.002	0.028
Pozo C5	2.289	0.000	9.062	2.904	0.900	0.122	0.031	6.165	0.676	3.046	4.216	0.048	0.013
Noria 46	3.502	0.000	0.859	0.418	0.263	0.049	0.002	1.534	0.454	2.197	1.223	0.020	0.004
Noria C21	6.713	0.000	3.530	3.527	0.249	0.091	0.012	4.901	1.471	3.333	3.180	0.047	0.024
Noria C22	5.210	0.000	10.493	4.699	1.453	0.085	0.032	8.053	2.262	4.360	5.531	0.087	0.034
Noria N09	2.376	0.000	3.053	3.317	0.470	0.077	0.009	5.007	1.015	1.631	1.604	0.008	0.021
Noria C7	4.829	0.490	1.049	0.023	0.090	0.061	0.005	2.585	0.569	1.219	1.653	0.033	0.004
Noria 250	2.325	0.000	36.250	13.566	0.934	0.059	0.194	10.421	2.506	22.251	14.331	0.350	0.033
Pozo C2	4.262	0.000	2.290	2.586	0.187	0.059	0.008	2.673	0.773	3.739	2.430	0.026	0.031
Noria C17	3.570	0.000	3.530	0.779	1.052	0.037	0.012	1.343	0.541	4.554	2.012	0.027	0.009
Pozo C46	1.865	0.000	3.243	1.309	0.069	0.058	0.008	2.415	0.402	2.709	0.494	0.005	0.008
Pozo N6	4.949	0.490	1.526	1.093	0.554	0.076	0.005	4.150	0.819	1.829	1.175	0.017	0.025
Noria 141	2.344	0.000	2.099	1.346	0.671	0.049	0.009	1.376	0.422	2.867	1.735	0.024	0.006
Noria 156	1.900	0.000	1.622	0.530	0.346	0.024	0.004	0.764	0.386	1.744	1.725	0.022	0.002
Noria 205	2.760	0.000	5.151	0.642	0.533	0.021	0.017	1.070	0.573	4.807	1.907	0.021	0.005
Noria 6	7.732	2.451	345.29 5	46.894	0.138	0.115	3.964	391.39 5	27.82 1	4.924	3.157	0.123	0.320
Noria 220	8.199	0.000	3.625	1.881	0.311	0.153	0.017	5.762	2.078	2.414	2.911	0.132	0.026
Pozo C47	3.299	0.000	1.622	1.714	0.187	0.096	0.007	3.240	0.449	2.787	0.486	0.018	0.017
Pozo C24	1.916	0.490	1.908	0.791	0.325	0.051	0.005	1.826	0.581	1.692	1.768	0.021	0.007
Noria 193	3.126	0.000	1.431	0.219	0.076	0.029	0.006	0.933	0.518	2.664	1.137	0.010	0.002
Noria C45	1.843	0.000	0.763	0.278	0.097	0.165	0.002	1.508	0.211	0.995	0.241	0.004	0.013
Noria N13	3.159	0.000	1.908	1.833	0.332	0.070	0.006	4.269	0.361	2.282	0.242	0.004	0.029
Pozo 832	4.423	0.000	4.388	6.045	0.311	0.183	0.014	6.703	0.530	3.742	3.633	0.056	0.016
Pozo337	0.821	0.000	5.151	2.717	0.235	0.053	0.016	4.173	0.790	2.312	1.867	0.034	0.015
Noria NIIC	4.468	0.000	2.099	2.683	0.235	0.085	0.007	5.222	0.651	1.888	1.106	0.019	0.011
Noria 186	5.061	0.000	2.575	1.411	0.394	0.107	0.012	4.622	0.569	1.991	1.809	0.033	0.022
Pozo C1	2.384	0.000	1.431	1.010	0.381	0.068	0.005	2.350	0.373	1.564	1.183	0.015	0.003
Pozo 216	3.666	0.000	8.013	2.280	0.298	0.041	0.028	3.453	0.846	6.307	3.314	0.056	0.009
Pozo C26- A	4.144	0.000	3.434	2.395	0.429	0.066	0.009	4.689	1.030	2.464	1.873	0.023	0.042
Noria 226	4.580	0.490	2.290	1.560	0.401	0.113	0.007	7.334	0.397	0.601	0.284	0.005	0.016

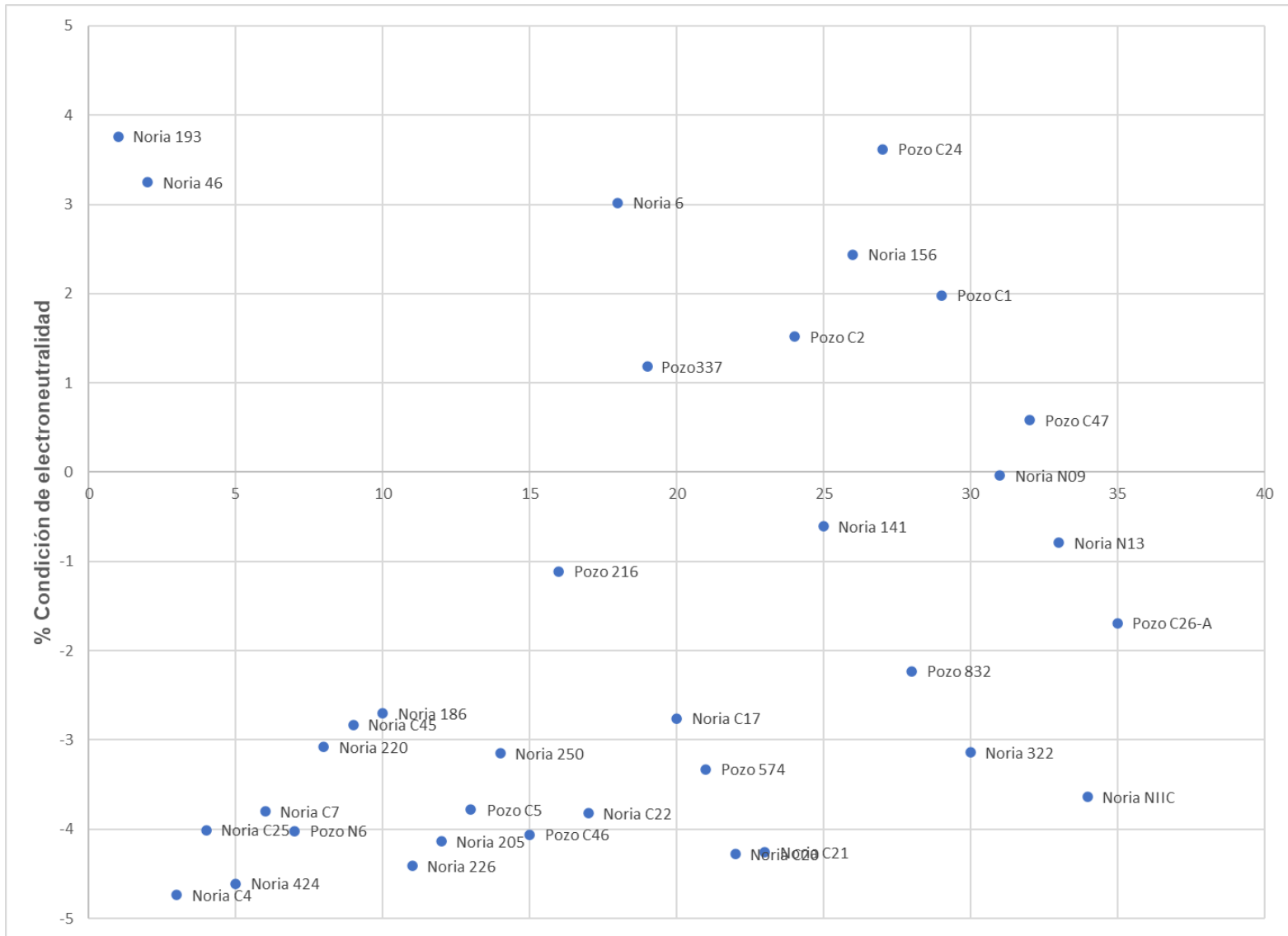


Figura 17. Condición de electroneutralidad en muestras de agua.

2.10.2 Familias de agua

Una vez que se tiene la certeza de que los resultados tienen un porcentaje de error aceptable, se procedió a clasificarlas de acuerdo con el 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 en los que un ion no representa el 50 %, se consideró como una familia mixta. Las familias de agua obtenidas se muestran en la siguiente Tabla 4 y su distribución espacial en la Figura 19.

Tabla 4. Familias de agua.

Muestra	Familia
Noria 193	Bicarbonatada-cálcica
Noria 46	Bicarbonatada-mixta
Noria C4	Bicarbonatada-sódica
Noria C25	Bicarbonatada-sódica
Noria 424	Bicarbonatada-sódica
Noria C7	Bicarbonatada-sódica
Pozo N6	Bicarbonatada-sódica
Noria 220	Bicarbonatada-sódica
Noria C45	Bicarbonatada-sódica
Noria 186	Bicarbonatada-sódica
Noria 226	Bicarbonatada-sódica
Noria 205	Clorurada-cálcica
Pozo C5	Clorurada-mixta
Noria 250	Clorurada-mixta
Pozo C46	Clorurada-mixta
Pozo 216	Clorurada-mixta
Noria C22	Clorurada-sódica
Noria 6	Clorurada-sódica
Pozo337	Clorurada-sódica
Noria C17	Mixta-cálcica
Pozo 574	Mixta-mixta
Noria C20	Mixta-mixta
Noria C21	Mixta-mixta

Pozo C2	Mixta-mixta
Noria 141	Mixta-mixta
Noria 156	Mixta-mixta
Pozo C24	Mixta-mixta
Pozo 832	Mixta-mixta
Pozo C1	Mixta-mixta
Noria 322	Mixta-sódica
Noria N09	Mixta-sódica
Pozo C47	Mixta-sódica
Noria N13	Mixta-sódica
Noria NIIC	Mixta-sódica
Pozo C26-A	Mixta-sódica

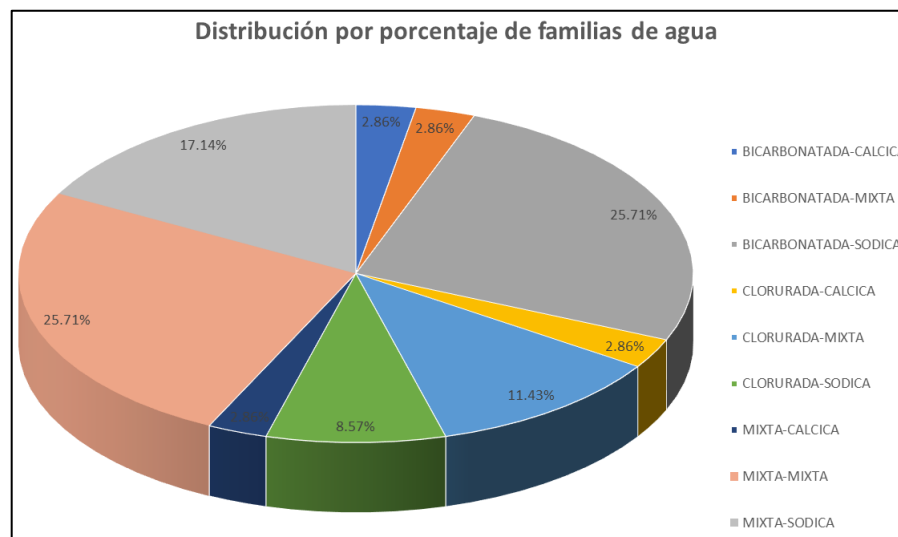


Figura 18. Gráfico de distribución de las familias de agua.

Las familias con mayor presencia en la región de estudio son la Bicarbonatada-Sódica, la Mixta-Mixta y la Mixta-Sódica. Una vez clasificadas las muestras, se elaboró un mapa con el objetivo de conocer la distribución de estas en la región de estudio (

Figura 18) y con base en diagramas de interpretación hidrogeoquímica, se establecieron conclusiones sobre la posible evolución y trayectoria del agua subterránea.

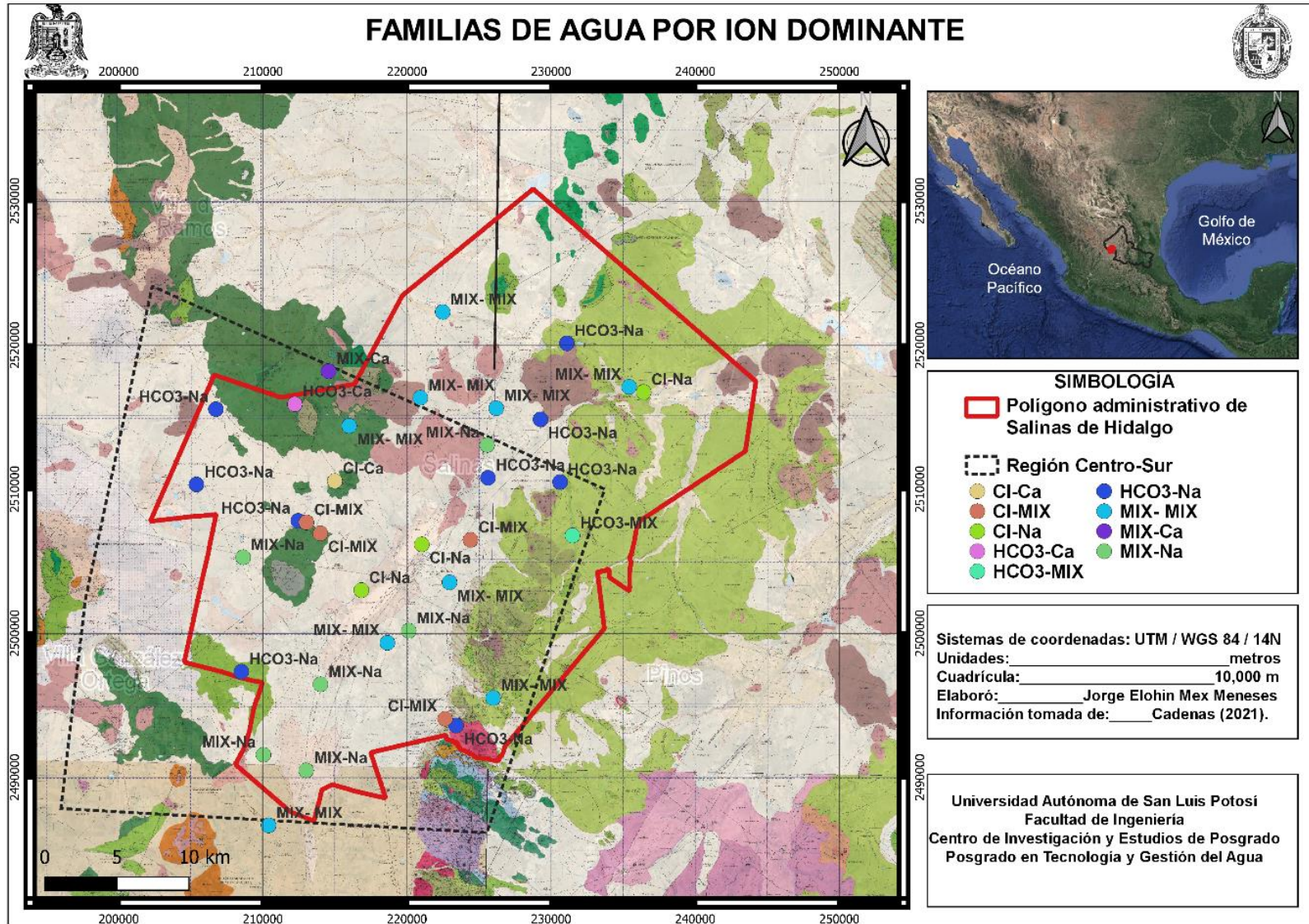


Figura 19. Familias de agua en la Región Centro-Sur.

2.10.3 Diagrama Stiff

El gráfico Stiff se compone de cuatro ejes horizontales en los que se trazan los cationes a la izquierda de un eje vertical y los aniones se marcan a la derecha (ambos en meq/L). Cuando los datos se grafican en cuatro filas y los puntos se conectan, el resultado es un polígono cuya forma es representativa de un tipo de agua subterránea en particular. Debido a que diferentes tipos de agua producen diferentes formas, el gráfico Stiff proporciona una buena forma visual de la calidad del agua. Sus desventajas son que cada análisis requiere su propio diagrama Stiff y se puede mostrar un número limitado de diagramas Stiff en un diagrama (Appelo & Postma, 2005).

En el presente trabajo, el diagrama Stiff se utilizó para ubicar las familias de agua en un gráfico cuya forma la define cuatro ejes, como se observa en la Figura 20 el gráfico se agrupó en función de las familias obtenidas previamente, las muestras cuyo color pertenecen a una misma familia tienen una forma geométrica muy similar entre sí, aunque en términos cuantitativos en algunos casos existieron diferencias. La familia HCO₃-Na presenta una forma muy similar entre las muestras que la conforman, sin embargo, las Norias 424, 220 y C4 muestran los vértices más prolongados en los ejes del HCO₃ y Na. La Noria 250 perteneciente a la familia Cl-MIX muestra una forma similar a las otras muestras de la misma familia, sin embargo, presenta una diferencia importante en el eje de los Cl, ya que se reporta una concentración cercana a los 40 meq/L.

En la familia Cl-Na, la Noria 6 muestra una forma atípica en el eje de los Cl, debido a que tiene una concentración de cloruros de 345 meq/L; lo cual sugiere una calidad de agua no apta para satisfacer las necesidades de la población.

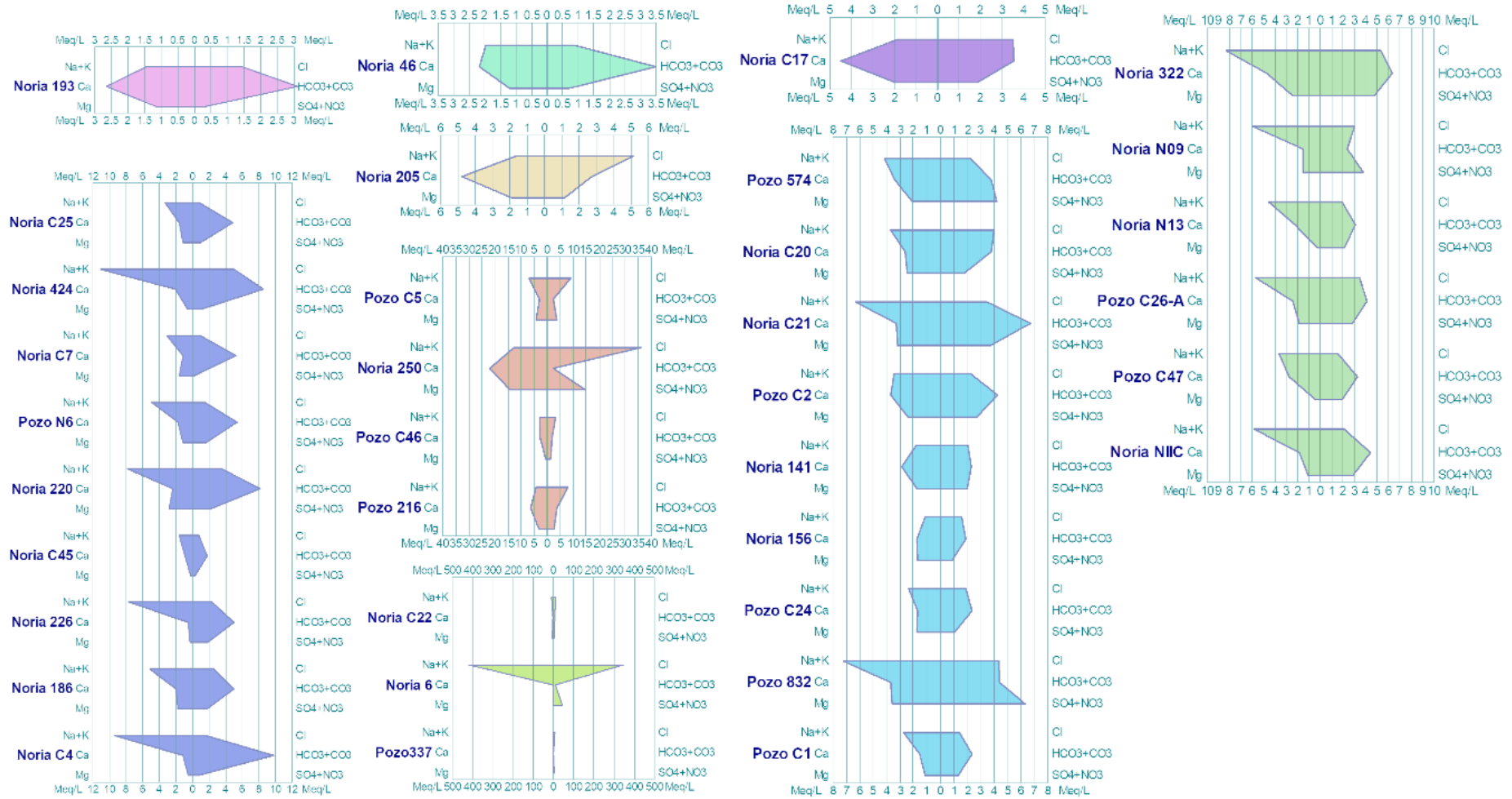


Figura 20. Diagramas Stiff por familias.

2.10.4 Diagrama Piper

El gráfico de Piper (Figura 18) consta de dos triángulos, uno para cationes y otro para aniones, y una figura en forma de diamante ubicada en el centro. Los tres ejes del triángulo catiónico se utilizan para las concentraciones de calcio, magnesio, sodio y potasio. Los valores se representan como porcentajes del total de esos tres grupos en miliequivalentes por litro. El triángulo de aniones se construye de manera similar, con ejes para cloruro, sulfato, carbonato y bicarbonato. Por lo tanto, cada análisis de agua da como resultado un punto en el triángulo del anión y un punto en el triángulo del catión. Luego, estos puntos se proyectan en diagonal hacia arriba, paralelos a las diagonales del diagrama, hasta su punto de intersección en el diamante (Alan E. Kehew, 2001).

El diagrama de Piper se utilizó para ubicar las familias de agua en función de sus componentes aniones y catiónicos de manera simultánea, así mismo, permitió visualizar de manera gráfica el grado de evolución de las distintas facies hidrogeoquímicas, ya que, de acuerdo con distintos autores, es posible identificar posibles procesos de mezcla. Se observó en la Figura 21, que la muestra correspondiente a la Noria 6, se encuentra prácticamente en un vértice del rombo, que corresponde a un agua de tipo hiper clorurada sódica. La muestra Noria 193 de la familia $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, se encuentra más hacia la izquierda del diagrama Piper, lo que confirma los resultados mostrados en los diagramas Stiff.

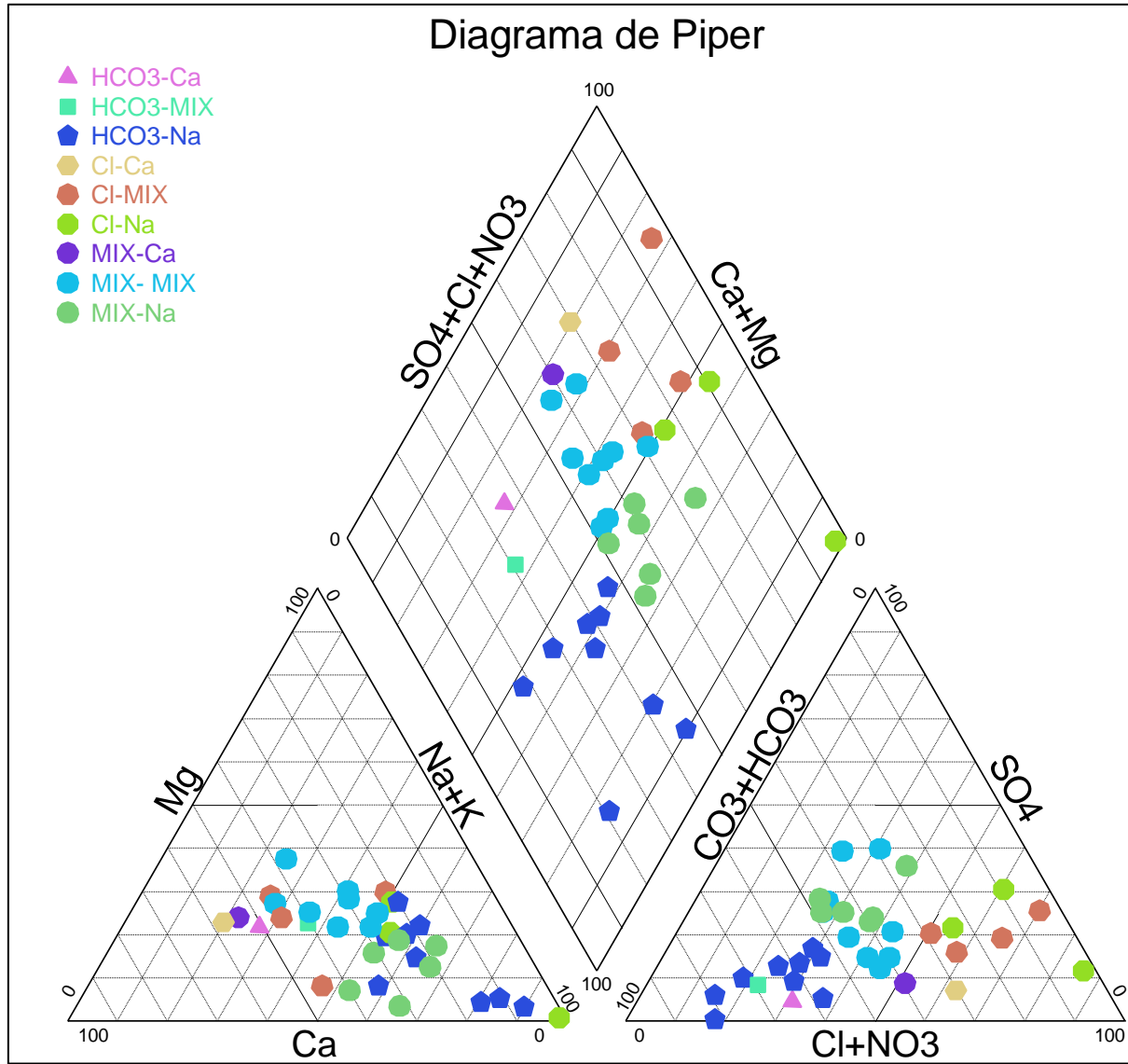


Figura 21. Diagrama de Piper por familias.

2.10.5 Diagramma Mifflin

Se utilizó el Diagrama de Mifflin para comprender la evolución del agua subterránea con base en el aumento de la concentración de iones Na, K, Cl y SO₄ a lo largo de la posible trayectoria de flujo, el gráfico se dividió en tres secciones (cada una corresponde a una zona de flujo local, intermedio y regional); la zona regional es la que posiblemente está ligada a las zonas de descargas al ser aguas con mayor grado de evolución, y la flecha indica la posible evolución de las aguas (Figura 22). Como se observa en la figura, el agua con mayor grado de evolución o posiblemente asociado a un flujo de tipo regional es la familia Cl-Na, las cuales fueron tomadas en zonas cercanas a las Lagunas de Salinas y muestran los valores más altos de conductividad eléctrica, esto confirma el comportamiento descrito en la Figuras 20 y 21.

2.10.6 Diagrama Wilcox

Como se mencionó en el apartado 3.2.2, la economía de la población de Salinas de Hidalgo depende en gran medida de la actividad agrícola y esta a su vez, del agua apta para este uso; es por ello por lo que se utilizó el diagrama Wilcox, con el objetivo de ubicar las zonas con mejor calidad de agua para riego, y ligar los resultados con los obtenidos mediante el modelo numérico de flujo, ver Figura 23. Como se observa en el diagrama, 32 muestras de agua quedaron fuera de las zonas de mala y muy mala calidad, tales puntos corresponden a familias Cl-Mix y Cl-Na, debido a sus valores de conductividad eléctrica mayores a 2000 uS/cm. Otro aspecto importante, es que tres muestras de la familia HCO₃-Na se encuentran muy cercanas a pasar de una calidad admisible a mala, por lo cual un pequeño cambio en su calidad podría generar un cambio en el índice de clasificación.

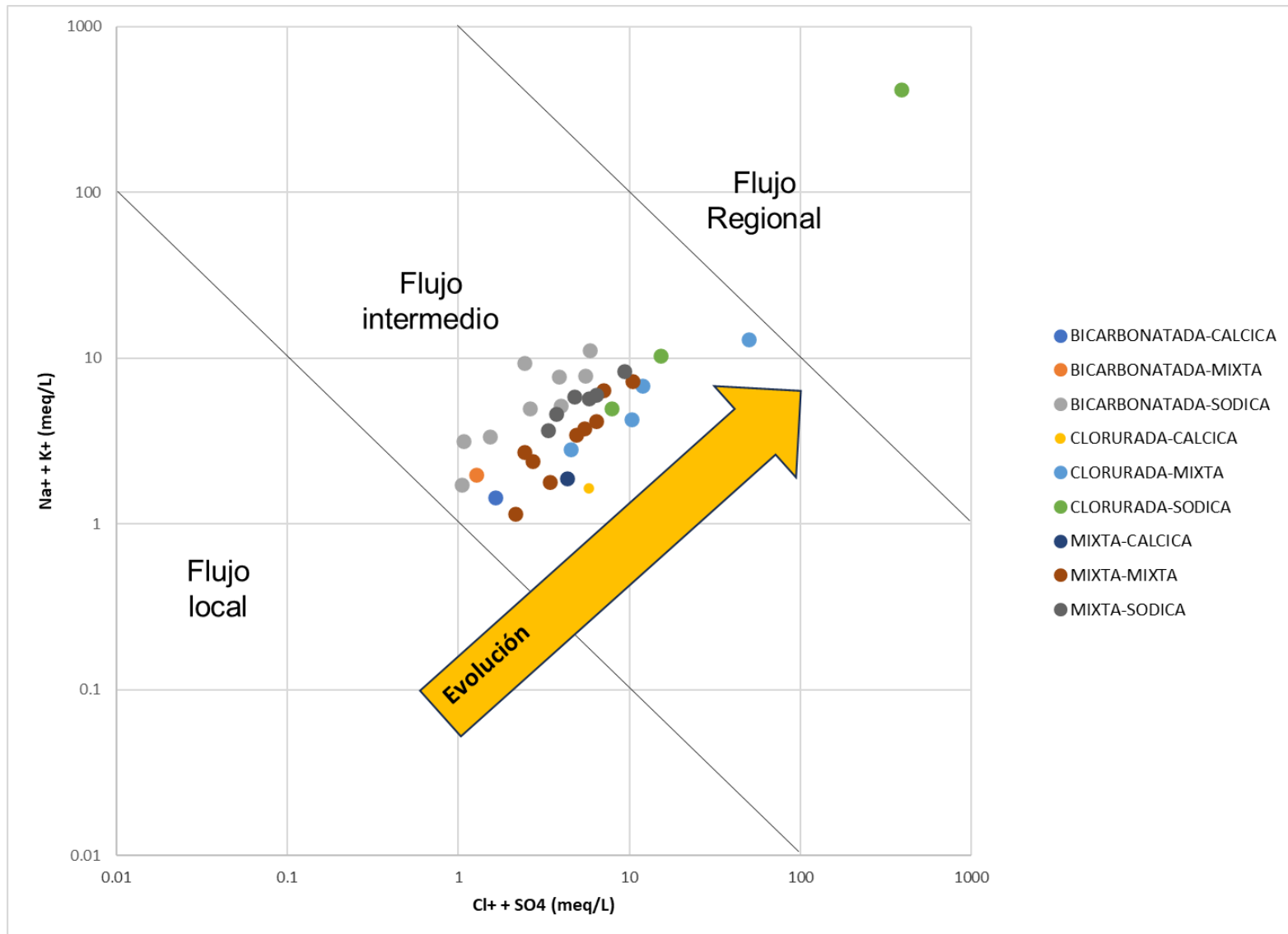


Figura 22. Diagrama de Mifflin.

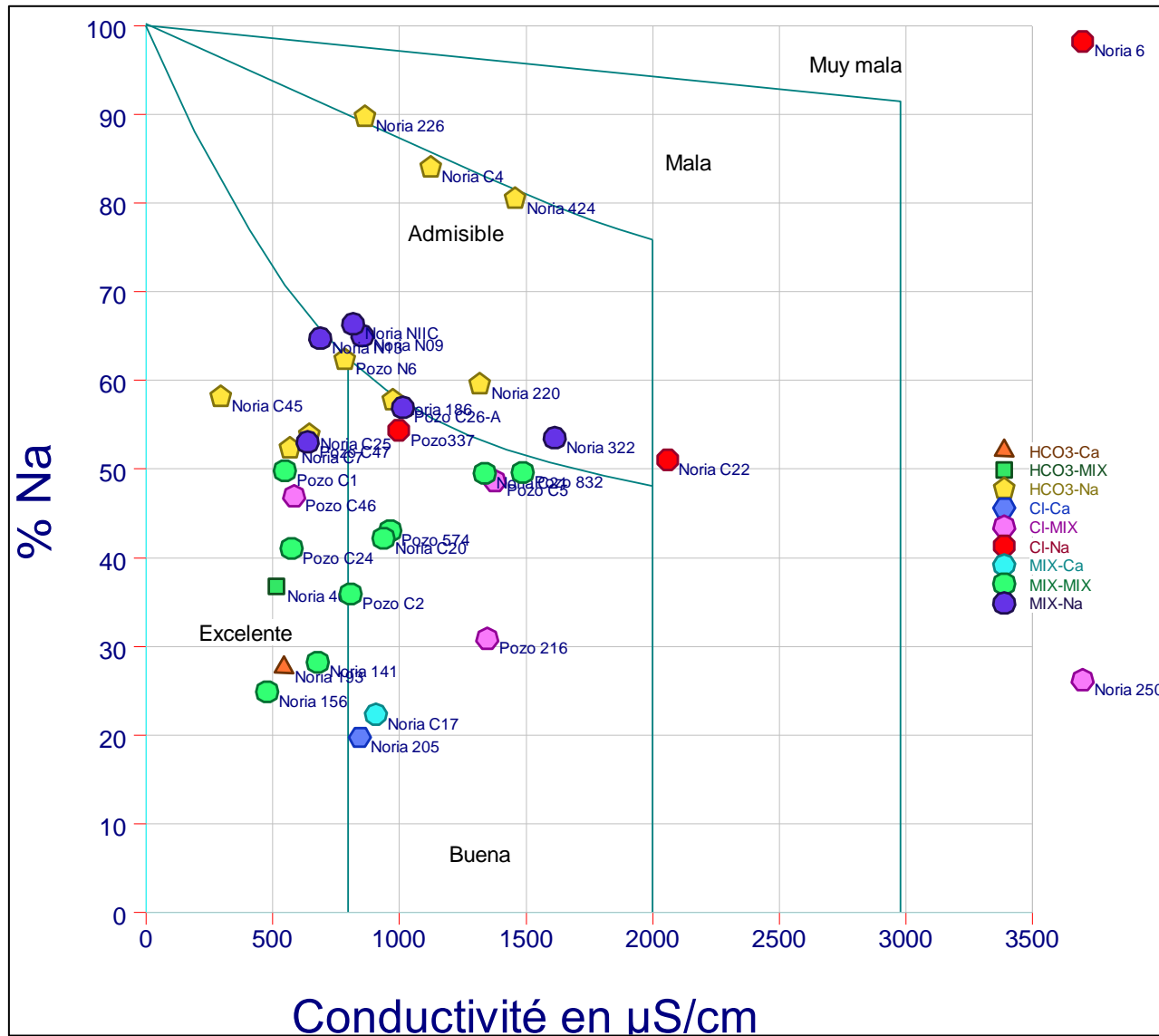


Figura 23. Clasificación de las aguas según índice Wilcox.

3.- Estudio hidrológico y balance hídrico

3.1 Estudio hidrológico superficial

3.1.1 Precipitación media anual

La precipitación media anual (P.M.A) corresponde a la lámina que en promedio cae en un año en cada estación meteorológica, resulta de sumar la precipitación total correspondiente a cada uno de los 12 meses del año.

Existen diferentes métodos para estimar la precipitación media anual sobre un área determinada, sin embargo, de acuerdo con (Campos, 1998) el método de Isoyetas tiene las siguientes ventajas:

- 1.-Teóricamente es el método más exacto.
- 2.-Los efectos orográficos pueden ser tomados en cuenta.
- 3.- Permite realizar una evaluación visual de la extensión y distribución de la precipitación.

El método de las curvas isoyetas consiste en localizar en un mapa de tamaño adecuado las estaciones pluviométricas y sus cantidades de lluvia registradas, a continuación, se trazan líneas de igual cantidad de precipitación. La precipitación promedio sobre un área se evalúa ponderando la precipitación entre isoyetas sucesivas por el área entre isoyetas (Campos, 1998):

$$P = \sum (A_i / A) P_i$$

P = Precipitación promedio en la cuenca (mm)

A_i = área entre cada dos isoyetas dentro del parteaguas de la cuenca (km²)

A = área total de la cuenca (km²)

P_i = Precipitación media entre cada dos isoyetas, se toma el valor medio (mm)

Se ha aplicado el método de isoyetas para estimar la precipitación media anual en la Región Centro-Sur administrativo del acuífero de Salinas de Hidalgo, utilizando los registros históricos correspondientes a 16 estaciones meteorológicas (ya filtradas)

ubicadas en los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, se muestran las claves, nombre y coordenadas en la Tabla 5 y su distribución en la Figura 24.

Tabla 5. Estaciones meteorológicas.

ID	NOMBRE	COORDENADAS UTM WGS84	
		X (m)	Y (m)
24048	VALLEJO	239263.15	2558459.00
24055	PEÑON BLANCO, SALINAS	212812.19	2489343.00
24073	REFORMA, SALINAS DE HIDALGO	228189.71	2519017.00
24148	SALINAS, SALINAS DE HIDALGO	220759.02	2504989.00
24150	GUANAME, VENADO	269237.47	2528918.00
24152	SAUZ DE CALERA, VILLA DE RAMOS	172610.77	2532153.00
24194	SAN RAFAEL, VILLA RAMOS	198342.14	2548954.00
32015	EL RUSIO	213286.77	2484402.51
32024	GUADALUPE VICTORIA	208473.66	2479383.51
32033	LORETO	192299.08	2465165.40
32061	VILLA HIDALGO	220285.36	2473779.78
32068	PINOS (SMN)	234074.55	2466401.49
32114	VILLA GONZALEZ ORTEGA	199903.33	2493379.77
32186	EL SALADILLO, GENERAL PANFILO	187525.01	2510531.10
32187	ESPIRITU SANTO	249312.52	2501779.42
32188	EL NIGROMANTE, PINOS	220816.97	2452228.00

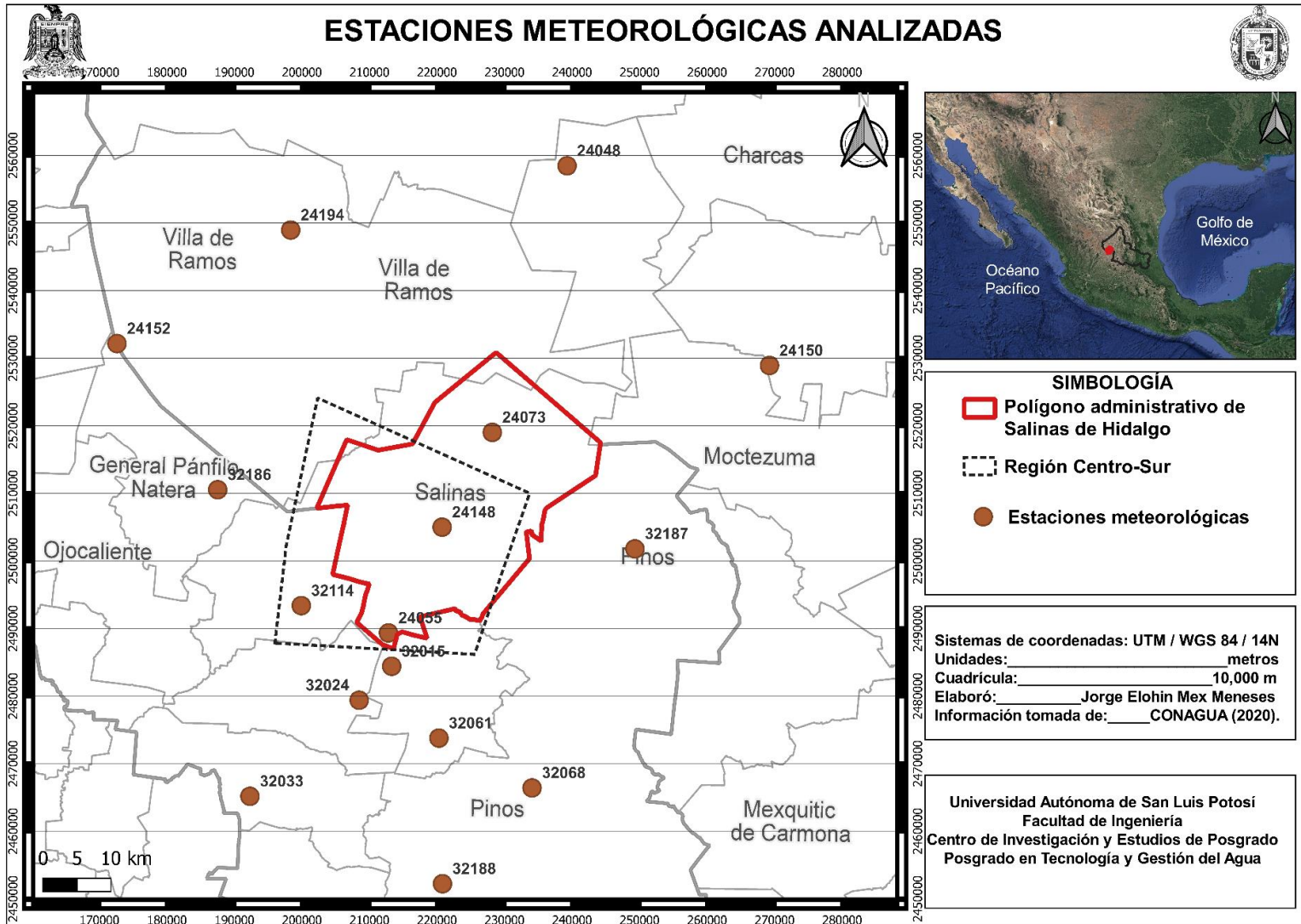


Figura 24. Estaciones meteorológicas analizadas.

Utilizando la información histórica solicitada a las Direcciones Locales de la Comisión Nacional del Agua en San Luis Potosí y Zacatecas, se muestra en la Tabla 6 los resultados obtenidos para la precipitación media anual correspondientes al periodo de 1980 a 2018; los valores de precipitación durante este periodo de tiempo son del orden de 367.84 mm en promedio, el año más lluvioso fue el 1990 con 738.09 mm.

Tabla 6. Precipitación media anual desde 1980 a 2018.

Año	P.M.A. (mm)
1980	292.65
1981	386.92
1982	407.02
1983	346.03
1984	306.58
1985	360.96
1986	268.46
1987	290.88
1988	331.79
1989	343.95
1990	738.09
1991	363.92
1992	322.76
1993	259.53
1994	362.48
1995	342.47
1996	245.39
1997	367.93
1998	270.95
1999	163.98
2000	183.06
2001	278.95
2002	568.58
2003	339.54
2004	478.13
2005	316.86

2006	397.31
2007	488.93
2008	387.52
2009	367.01
2010	368.07
2011	177.18
2012	340.51
2013	600.74
2014	439.67
2015	594.03
2016	364.13
2017	328.08
2018	555.04

3.1.2 Temperatura media anual

La temperatura media anual (T.M.A.) para el área de estudio se obtuvo con el mismo procedimiento empleado para el cálculo de la precipitación media anual, es decir, se adecuó el método de isoyetas a isotermas. En la Tabla 7 se muestran los datos de la temperatura media anual para el periodo comprendido entre 1980-2018; en general, los valores de temperatura se encuentran entre los 15.52 y 17.63 °C, siendo el año 2004 el año más frío y 2017 el más cálido, respectivamente.

Tabla 7. Temperatura media anual desde 1980 a 2018.

Año	T.M.A. (°C)
1980	17.19
1981	16.94
1982	17.44
1983	16.56
1984	16.75
1985	16.86
1986	17.02

1987	16.62
1988	16.63
1989	17.06
1990	17.17
1991	16.93
1992	17.00
1993	16.90
1994	17.34
1995	17.08
1996	16.41
1997	16.21
1998	16.49
1999	16.88
2000	17.03
2001	16.35
2002	15.71
2003	15.87
2004	15.52
2005	16.14
2006	15.90
2007	16.62
2008	16.31
2009	17.40
2010	16.16
2011	17.06
2012	16.51
2013	16.64
2014	16.63
2015	17.24
2016	17.17
2017	17.63
2018	16.92

3.1.3 Evapotranspiración real anual

En la práctica los conceptos de evaporación y transpiración ocurren de manera simultánea, por lo tanto, se emplea el concepto de evapotranspiración real (ETR) para referirse a la cantidad de agua que realmente retorna a la atmósfera por evaporación y transpiración (Campos, 1998).

Existen distintas metodologías para estimar la evapotranspiración real anual, en este caso se ha empleado una fórmula empírica para el cálculo, el descrito por M. Coutagne.

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

P = Precipitación media anual (m)

$$\lambda = \frac{1.00}{0.8 + 0.14 T}$$

T = Temperatura media anual en °C

La fórmula es aplicable valores de precipitación comprendidos entre $1/8 \lambda$ y $1/2 \lambda$.

Para el caso en que la precipitación es menor que $1/8 \lambda$ la ETR es igual a la precipitación y para el caso en que P es mayor que $1/2 \lambda$, se utiliza la siguiente expresión $ETR = 0.20 + 0.035 T$.

Una vez que han sido calculados los valores de Precipitación media anual y Temperatura media anual, se empleó el método de Coutagne cuyos resultados están en la Tabla 8, para el periodo comprendido entre 1980-2018.

De los resultados obtenidos, es importante destacar que prácticamente los valores de evapotranspiración real son muy cercanos a los de precipitación media anual y en algunos años son prácticamente iguales o cercanos al 95% de la lluvia, por lo tanto, se considera que en esta zona el escurrimiento superficial es intermitente, escaso y únicamente ocurre de manera momentánea, por lo que la recarga por infiltración vertical es prácticamente despreciable en la zona de estudio.

Tabla 8. Valores de evapotranspiración mediante el método de Coutange para el periodo de 1980 a 2018.

AÑO	T.M.A (°C)	λ	P.M.A. (m)	ETR(m)	ETR(mm)
1980	17.19	0.312	0.293	0.293	292.654
1981	16.94	0.315	0.387	0.387	386.921
1982	17.44	0.308	0.407	0.356	355.915
1983	16.56	0.321	0.346	0.346	346.035
1984	16.75	0.318	0.307	0.307	306.575
1985	16.86	0.316	0.361	0.361	360.958
1986	17.02	0.314	0.268	0.268	268.464
1987	16.62	0.320	0.291	0.291	290.885
1988	16.63	0.320	0.332	0.332	331.791
1989	17.06	0.314	0.344	0.344	343.948
1990	17.17	0.312	0.738	0.568	568.073
1991	16.93	0.315	0.364	0.364	363.923
1992	17.00	0.314	0.323	0.323	322.764
1993	16.90	0.316	0.260	0.260	259.534
1994	17.34	0.310	0.362	0.362	362.475
1995	17.08	0.313	0.342	0.342	342.474
1996	16.41	0.323	0.245	0.245	245.389
1997	16.21	0.326	0.368	0.368	367.933
1998	16.49	0.322	0.271	0.271	270.950
1999	16.88	0.316	0.164	0.164	163.977
2000	17.03	0.314	0.183	0.183	183.060
2001	16.35	0.324	0.279	0.279	278.951
2002	15.71	0.333	0.569	0.461	460.786
2003	15.87	0.331	0.340	0.340	339.537
2004	15.52	0.336	0.478	0.401	401.242
2005	16.14	0.327	0.317	0.317	316.856

2006	15.90	0.330	0.397	0.345	345.154
2007	16.62	0.320	0.489	0.412	412.463
2008	16.31	0.324	0.388	0.339	338.810
2009	17.40	0.309	0.367	0.367	367.007
2010	16.16	0.327	0.368	0.368	368.074
2011	17.06	0.314	0.177	0.177	177.177
2012	16.51	0.321	0.341	0.341	340.513
2013	16.64	0.320	0.601	0.485	485.413
2014	16.63	0.320	0.440	0.378	377.881
2015	17.24	0.311	0.594	0.484	484.208
2016	17.17	0.312	0.364	0.364	364.133
2017	17.63	0.306	0.328	0.328	328.078
2018	16.92	0.316	0.555	0.458	457.841

3.1.4 Escorrentía

La escorrentía o escurrimiento es la parte de la precipitación que fluye por gravedad por la superficie del terreno, o en el interior de este. Es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes superficiales, sean éstas, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores (Campos, 1998).

Se ha utilizado el Método de número de curva del Soil Conservation Service (SCS-CN) para el pronóstico del escurrimiento en la región de estudio.

El 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 es una fracción de la retención potencial. La ecuación de balance hídrico y las hipótesis expresadas son (Domínguez Mora *et al.*, 2008):

$$P = Pe + Ia + Fa$$

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

Donde:

P = Precipitación total

Ia = Infiltración inicial

Fa = Infiltración acumulada

S = Infiltración potencial máxima

Para fines prácticos, se supone que $Ia = 0.2 S$, por lo tanto, combinando las ecuaciones resulta que:

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

Pe = Precipitación efectiva en cm.

P = Precipitación total en cm.

CN = el número de curva, determinado a partir de uso y tipo de suelo.

Para la caracterización espacial del suelo se ha utilizado la información vectorial de las capas cartográficas “Edafología escala 1:50 000” así como de “Uso del suelo y vegetación escala 1:50 000” obtenidas del INEGI, ver Figura 13 y Figura 14.

Seguidamente se ha asignado la condición hidrológica correspondiente a los diferentes tipos de suelo de la capa vectorial “edafología” en función de su clasificación según el INEGI (Tabla 9).

Tabla 9. Clasificación hidrológica de los tipos de suelos según su permeabilidad
(Domínguez Mora *et al.*, 2008)

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

Finalmente, en función de la condición hidrológica del suelo y su cobertura de acuerdo con la capa “uso del suelo y vegetación” fue posible asignar un número de curva utilizando la Tabla 10.

Tabla 10. Numero de curva según la cobertura del suelo (Domínguez Mora *et al.*, 2008).

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
	Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
	Parqueaderos 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

En la Figura 25 se muestra la variación espacial del número de curva en la región de estudio obtenida mediante sistema de información geográfica.

Se ponderó el valor del Número de Curva (NC) resultando igual a 65, posteriormente se empleó este valor para el cálculo del escurrimiento.

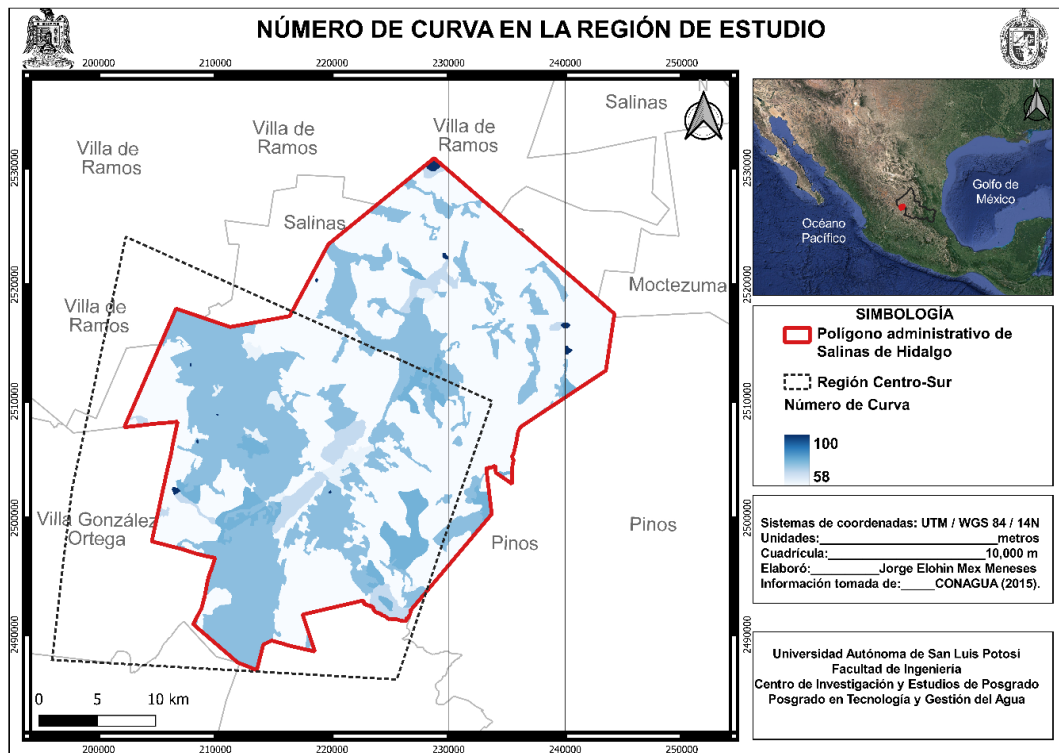


Figura 25. Numero de curva en la Región de Estudio.

En la Tabla 11 se muestran los resultados de la precipitación efectiva (P.E.) para el periodo comprendido entre 1980 y 2018, de acuerdo con estos resultados, aproximadamente el 64% de la precipitación escurre en la región de estudio, pero como se mencionó en el apartado anterior, prácticamente este escurrimiento se evapora en su totalidad y no forma escurrimientos de agua permanentes.

Tabla 11. Precipitación efectiva para el periodo de 1980 a 2018.

Año	P.M.A. (mm)	P.M.A. (cm)	P.E. (cm)
1980	292.65	29.27	17.62
1981	386.92	38.69	26.18
1982	407.02	40.70	28.04
1983	346.03	34.60	22.42
1984	306.58	30.66	18.86

1985	360.96	36.10	23.78
1986	268.46	26.85	15.49
1987	290.88	29.09	17.46
1988	331.79	33.18	21.12
1989	343.95	34.39	22.23
1990	738.09	73.81	59.76
1991	363.92	36.39	24.06
1992	322.76	32.28	20.31
1993	259.53	25.95	14.71
1994	362.48	36.25	23.92
1995	342.47	34.25	22.09
1996	245.39	24.54	13.50
1997	367.93	36.79	24.42
1998	270.95	27.10	15.71
1999	163.98	16.40	6.90
2000	183.06	18.31	8.37
2001	278.95	27.90	16.41
2002	568.58	56.86	43.35
2003	339.54	33.95	21.83
2004	478.13	47.81	34.72
2005	316.86	31.69	19.78
2006	397.31	39.73	27.14
2007	488.93	48.89	35.75
2008	387.52	38.75	26.23
2009	367.01	36.70	24.34
2010	368.07	36.81	24.44
2011	177.18	17.72	7.91
2012	340.51	34.05	21.92
2013	600.74	60.07	46.45
2014	439.67	43.97	31.10
2015	594.03	59.40	45.80
2016	364.13	36.41	24.08

2017	328.08	32.81	20.79
2018	555.04	55.50	42.06

3.1.5 Infiltración

De acuerdo con CONAGUA, (2020) el orden de magnitud del coeficiente de infiltración por precipitación se puede estimarse a través de un balance de agua superficial para toda la región de estudio del acuífero, para lo cual se aplicó la siguiente expresión:

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

Dado que en la región de estudio no existen corrientes superficiales de agua permanentes, por lo contrario, existe una escorrentía intermitente, se asume que los esguerrimientos están inmersos en la evaporación, por lo tanto, para el cálculo del volumen de infiltración bastará con restar a la precipitación total el valor de la evaporación, se ha aplicado esta fórmula desde el año 1980 a 2018 y se muestran los resultados en la Tabla 12.

Tabla 12. Estimación del coeficiente de infiltración.

Año	Precipitación (mm)	Esguerrimiento (mm)	EVP (mm)	Infiltración (mm)	Coeficiente infiltración
1980	300.96	183.54	300.96	0.00	0.00
1981	413.97	286.91	359.94	54.03	0.13
1982	391.92	266.40	391.92	0.00	0.00
1983	320.81	201.33	320.81	0.00	0.00
1984	327.76	207.60	327.76	0.00	0.00
1985	369.01	245.23	369.01	0.00	0.00
1986	284.58	169.02	284.58	0.00	0.00
1987	300.44	183.08	300.44	0.00	0.00

1988	417.60	290.30	361.44	56.16	0.13
1989	239.87	130.27	239.87	0.00	0.00
1990	721.01	581.02	557.30	163.71	0.23
1991	372.52	248.46	372.52	0.00	0.00
1992	343.15	221.57	306.19	36.96	0.11
1993	255.49	143.65	255.49	0.00	0.00
1994	402.11	275.86	402.11	0.00	0.00
1995	370.88	246.96	370.88	0.00	0.00
1996	211.45	106.51	211.45	0.00	0.00
1997	368.28	244.56	368.28	0.00	0.00
1998	272.45	158.37	272.45	0.00	0.00
1999	158.13	64.62	158.13	0.00	0.00
2000	161.47	67.12	161.47	0.00	0.00
2001	263.13	150.25	263.13	0.00	0.00
2002	544.34	410.30	446.70	97.65	0.18
2003	344.71	222.98	344.71	0.00	0.00
2004	454.52	324.94	385.64	68.88	0.15
2005	291.70	175.31	291.70	0.00	0.00
2006	357.20	234.40	357.20	0.00	0.00
2007	512.69	380.08	428.05	84.64	0.17
2008	399.33	273.27	347.02	52.31	0.13
2009	379.87	255.25	379.87	0.00	0.00
2010	312.10	193.50	312.10	0.00	0.00
2011	171.92	75.04	171.92	0.00	0.00
2012	334.66	213.84	334.66	0.00	0.00
2013	601.12	464.84	486.21	114.91	0.19
2014	428.42	300.42	369.85	58.58	0.14
2015	573.79	438.54	470.96	102.82	0.18
2016	374.52	250.31	374.52	0.00	0.00

2017	313.54	194.79	313.54	0.00	0.00
2018	529.45	396.06	440.82	88.63	0.17

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 del 4.6%.

3.2 Estudio hidrológico subterráneo

3.2.1 Pozos de monitoreo

Para evaluar aspectos importantes del agua subterránea e implementar soluciones de gestión, se requieren datos hidrogeológicos, tanto de la condición de base inicial como de las variaciones en el tiempo. La recolección de los datos que registran las variaciones en el tiempo es lo que generalmente se considera como el “monitoreo del agua subterránea” (Tuinhof *et al.*, 2002).

Una red de control piezométrico es un conjunto de puntos de observación y medición como: pozos, sondeos, y sondeos de observación o piezómetros; convenientemente distribuidos en el espacio donde, con una frecuencia establecida, se mide el valor del nivel piezométrico en el lugar del acuífero, en que se encuentra el punto de control y en el tiempo en que se toma la medida.

Desafortunadamente, no se cuenta con una red de monitoreo piezométrico en la región de estudio, por lo tanto, se utilizarán puntos de medición del nivel freático reportados en el trabajo de (León, 2020) y mediciones realizadas en pozos y norias durante un censo de aprovechamientos en el mes de marzo de 2023.

De acuerdo con (León, 2020) en su trabajo realizó mediciones de niveles estáticos de 61 aprovechamientos que se encontraban distribuidos en la mayor parte de la superficie del acuífero administrativo, de los cuales, son 19 pozos y 42 norias. De las 61 mediciones, 57 se encuentran en aprovechamientos activos y 4 inactivos. De los activos, 22 son para uso múltiple, 29 para uso agrícola, 4 para uso pecuario y 2 para

abastecimiento público-urbano. De acuerdo con las mediciones realizadas, se reportaron profundidades de niveles estáticos de 50 m como máximo, 4.6 m como mínimo y 17.70 m como promedio.

Se realizaron configuraciones de la elevación del nivel freático (con respecto al nivel medio del mar) para los años: 2017, 2019 y 2023; los resultados de las elevaciones y sus respectivas direcciones de flujo se presentan en las Figura 26 a Figura 28; respectivamente.

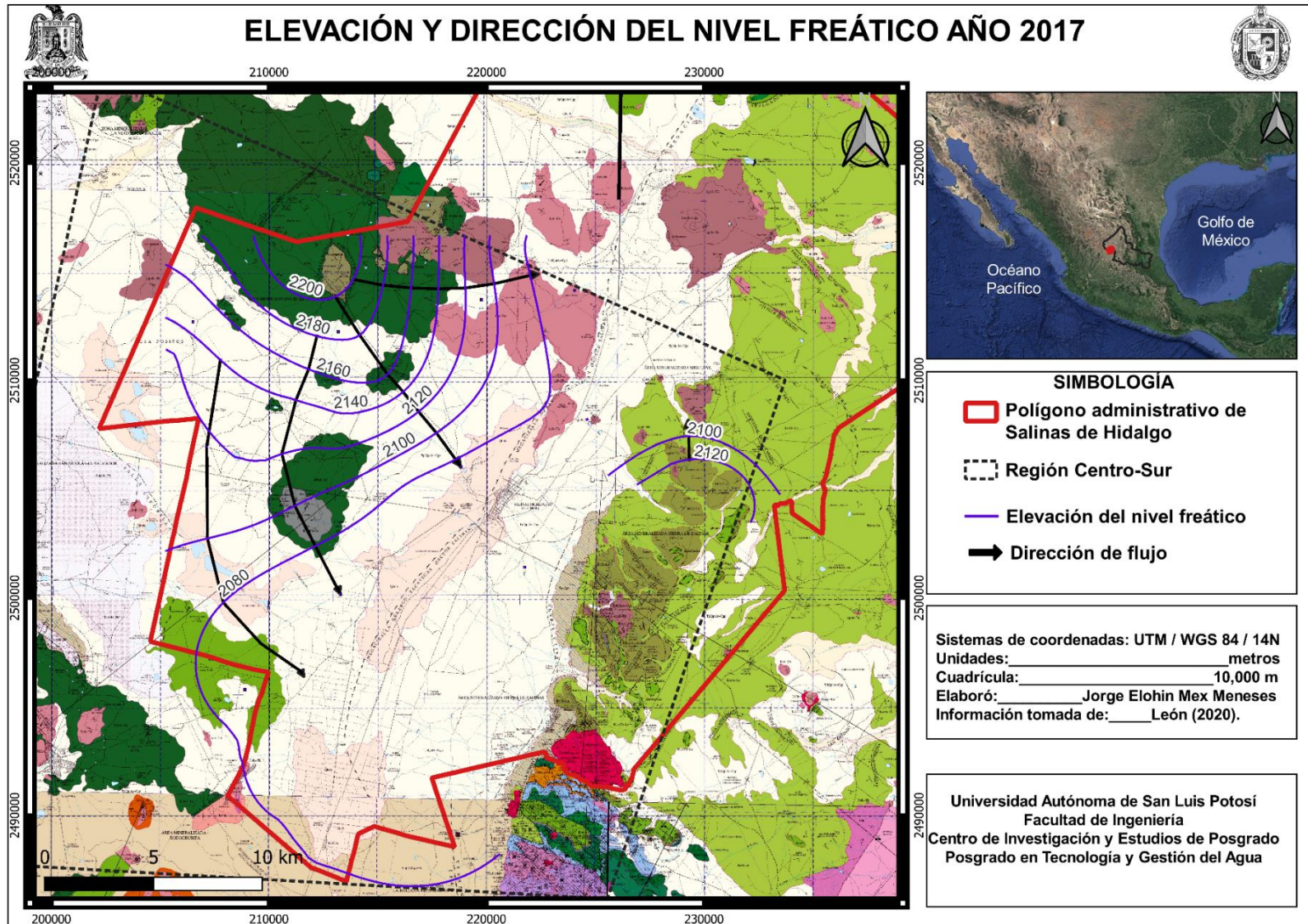


Figura 26. Configuración de la elevación del nivel freático para el año 2017.

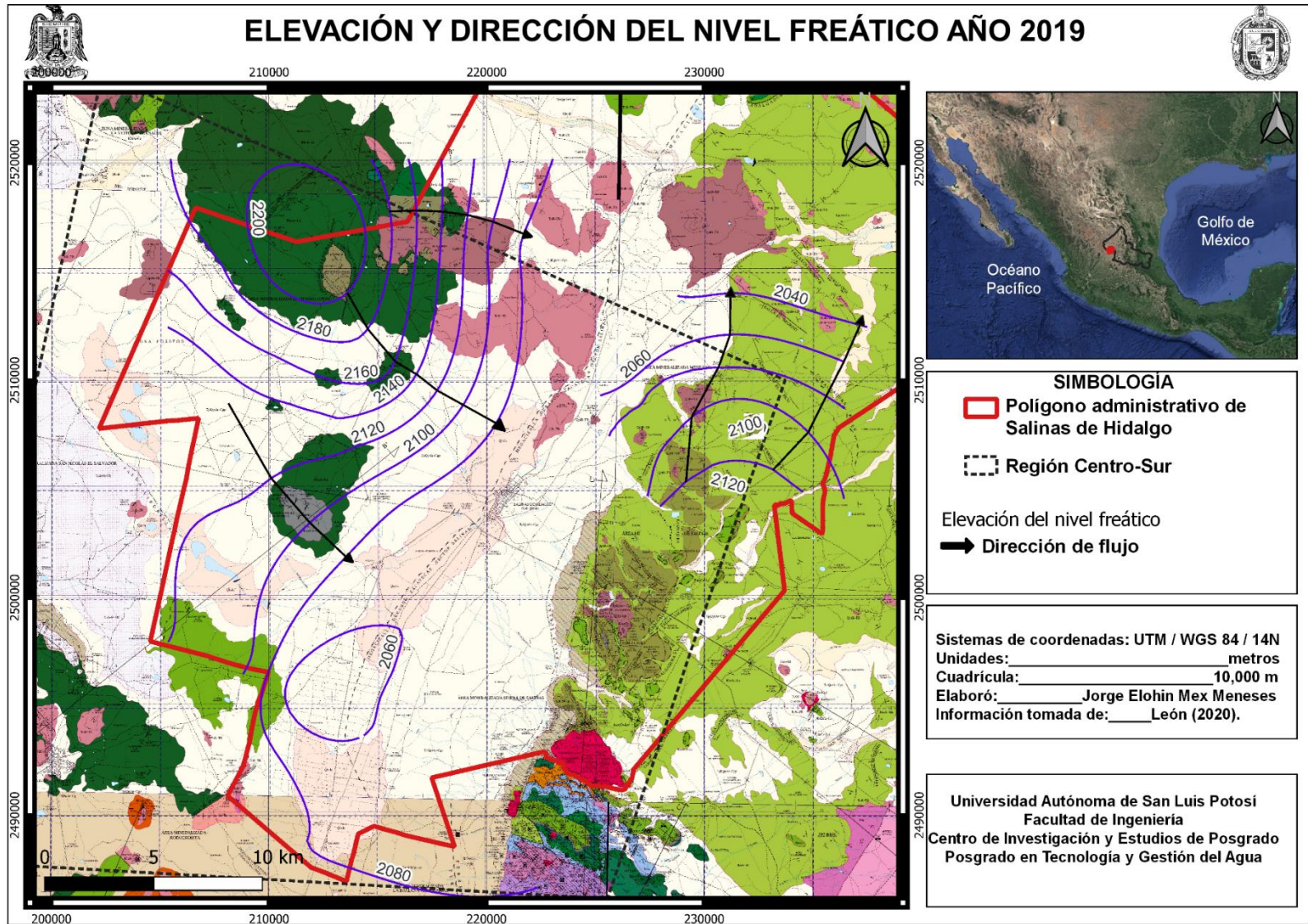


Figura 27. Configuración de la elevación del nivel freático para el año 2019.

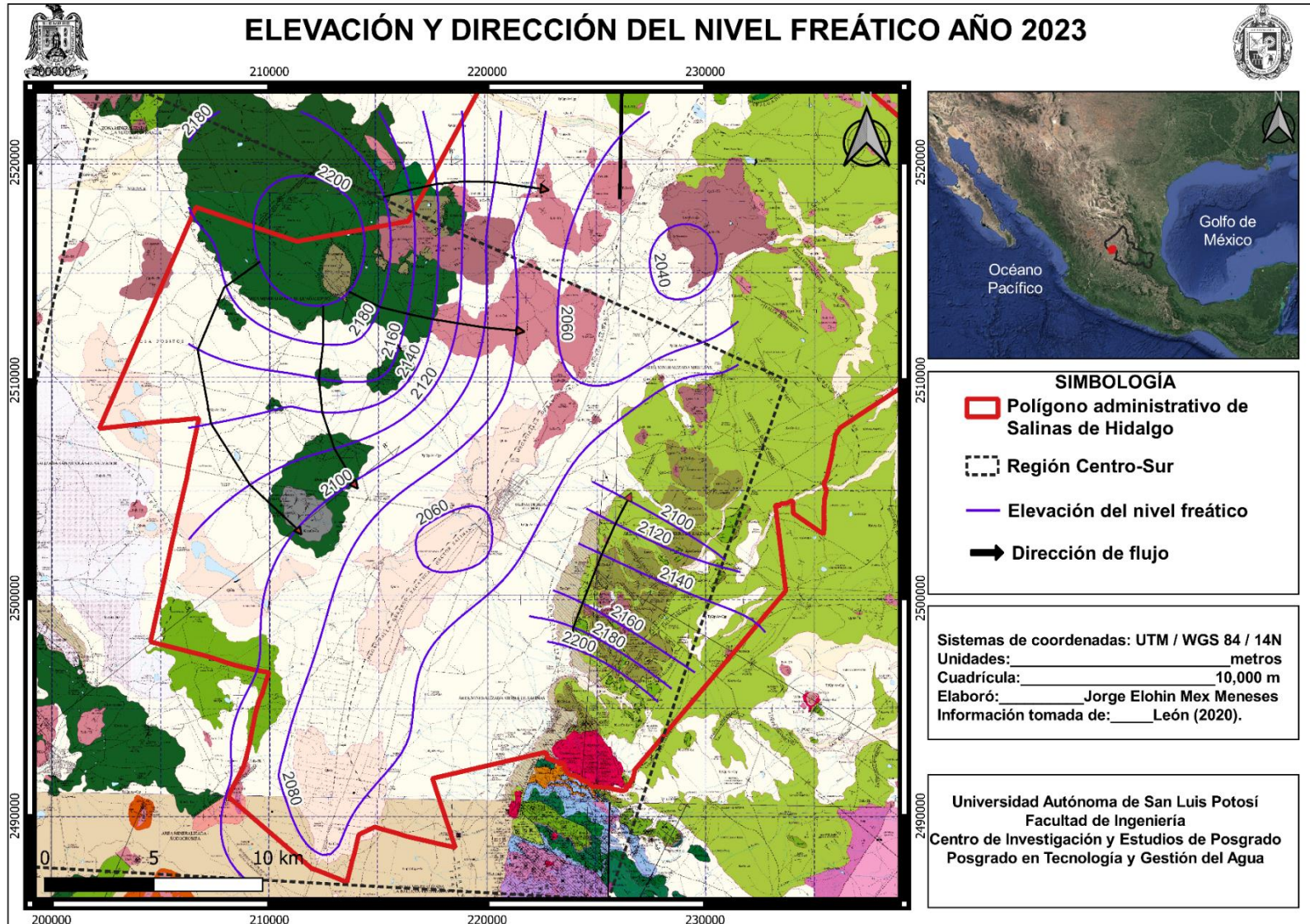


Figura 28. Configuración de la elevación del nivel freático para el año 2023.

3.2.2 Censo de aprovechamientos

Se ha utilizado la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) correspondiente al acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo (2403), y se filtró para la Región Centro-Sur; esta información fue solicitada y obtenida de la Dirección Local de la Comisión Nacional del Agua de San Luis Potosí, con fecha de corte al 31 de marzo de 2022, de acuerdo con el corte de febrero de 2022, se tienen 1052 títulos concesionados a distintos usos.

El censo de aprovechamientos está conformado por 1495 pozos destinados a diferentes usos, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Distribución de los aprovechamientos por distintos usos.

Uso	Volumen (m ³ /año)	
AGRÍCOLA	40,973,570.20	84.52%
DIFERENTES USOS	4,040,577.60	8.33%
PUBLICO URBANO	2,096,015.00	4.32%
INDUSTRIAL	799,891.00	1.65%
PECUARIO	346,208.64	0.71%
ACUACULTURA	125,720.00	0.26%
DOMESTICO	92,054.35	0.19%
SERVICIOS	4,200.00	0.01%

De acuerdo con los datos proporcionados por el Registro Público de Derechos de Agua en el censo de aprovechamientos, para los 1,459 pozos, se tiene una concesión total de 26,509,919 m³/año de extracción, una extracción máxima en un pozo de bombeo de 350,000 m³/año, una extracción mínima en un pozo de bombeo de 46 m³/año y una extracción promedio de 17,732.40 m³/año.

Así mismo, existe una zona de libre alumbramiento que extrae un volumen de 21,968,317.79 m³/año conformada por 962 constancias, de las cuales se desprenden el mismo número de anexos y fuentes de extracción; se tiene una extracción mínima

de 36.50 m³/año, una extracción máxima de 754,790 m³/año y una extracción promedio de 22,836.09 m³/año.

Finalmente, el volumen de extracción en todo el acuífero administrativo resultó igual a 48,478,236.79 m³/año; y en la Región Centro-Sur se ubica el 90% de este volumen.

3.2.3 Recarga inducida

Según el documento técnico (CONAGUA, 2020) en el acuífero de Salinas de Hidalgo, la recarga inducida está constituida principalmente por la infiltración vertical debida a los excesos de agua aplicado en el riego y por fugas de los sistemas del servicio público urbano. Para el caso de riego se consideró un coeficiente de 0.15 sobre el volumen de 40.97 hm³/año, lo que induce una recarga del orden de 6.15 hm³/año; para el caso de las fugas se estimó un coeficiente de 0.10 sobre el volumen de 2.10 hm³/año, de donde se obtiene una recarga del orden de 0.21 hm³/año; por tanto, el volumen total por recarga inducida es del orden de 6.36 hm³/año. Para el cálculo del balance en la Región Centro-Sur, se consideró un 15% sobre el volumen destinado a uso agrícola y un 10% con respecto al volumen destinado a uso público.

3.2.4 Elevación del nivel estático

Se tomaron como base las mediciones de profundidad de nivel estático reportados (León, 2020) y los medidos en marzo de 2023; para determinar las elevaciones del nivel estático para los años 2017, 2019 y 2023 respectivamente, aplicando la siguiente expresión:

Elevación del nivel estático (m.s.n.m.) = Elevación del terreno (m.s.n.m.) - Profundidad del nivel estático (m).

Las elevaciones del terreno natural fueron calculadas mediante la interpolación de un modelo digital de elevación de alta resolución obtenido de la Misión Topográfica Shuttle Radar (SRTM) con clave n22w1021 y resolución de 1 arco-segundo (30

metros). Las elevaciones del nivel estático se muestran gráficamente en las Figuras 25 a 28, los valores se rondan entre los 2200 m.s.n.m. hasta los 2060 m.s.n.m. en la zonas altas y bajas respectivamente.

3.2.5 Entradas por flujo subterráneo horizontal

Para obtener el volumen de agua subterránea que entra lateralmente al sistema se aplicó la Ley de Darcy, la cual estima el caudal “Q” que recarga al acuífero. Para el cálculo de dicho volumen se hizo utilizaron distintas configuraciones del nivel estático (2017, 2019 y 2023). Las configuraciones de nivel estático son isolíneas que conectan valores iguales de carga hidráulica, estas fueron generadas mediante el software “Surfer” utilizando el método de interpolación de Kriggin. Así mismo, se definieron los vectores del flujo subterránea considerando el medio geológico como isotrópico y homogéneo, y mediante visualización gráfica se definieron las celdas del flujo presentes.

La Ley de Darcy establece:

$$Q = T * i * L$$

Donde:

Q: Gasto (m³/s)

T: Transmisividad (m²/s) en el canal de flujo

L: Ancho (m) del canal de flujo

i: Gradiente hidráulico ($i = h / l$); h y l son la diferencia y distancia respectivamente entre las equipotenciales (h) que conforman el canal de flujo.

A su vez el valor de la transmisividad fue calculado como sigue:

$$T = K * b$$

Donde:

$$K = \text{Conductividad hidráulica (m/s)}$$

$b = \text{espesor saturado del acuífero (m)}$

Los espesores saturados se consideraron de acuerdo con la carta geológica minera F14-A61 escala 1:50 000 elaborados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en la región de estudio y complementando esa información con las secciones geológicas y geoelectricas realizadas por (Salazar, 2019).

Los valores de gradiente hidráulico obtenidos del análisis de las equipotenciales fueron de entre los 0.011 y 0.017 m/m; para el área se consideró el ancho del tubo de flujo según las equipotenciales y un espesor promedio de 500 m, los valores de la conductividad hidráulica utilizados para estimar las entradas fueron las reportadas en el modelo numérico calibrado por (León, 2020) en función del medio geológico y equivalencia en dirección vertical, por lo que los valores de entrada por flujo subterráneo obtenidos fueron de 135,208.35 m³/d a 152,055.00 m³/d, valores muy cercanos a los volúmenes de extracción en el acuífero según el REPDA, ver Tabla 14 a 16.

Tabla 14. Estimación de las entradas por flujo subterráneo para el año 2017.

Tubo de Flujo 1	Ancho (m)	2,525
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	126,2500
	Gradiente i	0.0111
	Kequi(m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	0.387660942
	Q(m ³ /d)	33,493.91
	Q(m ³ /año)	12,225,275.46
Tubo de Flujo 2	Ancho (m)	3780
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	1,890,000
	Gradiente i	0.0111
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	0.580339945
	Q(m ³ /d)	50,141.37
	Q(m ³ /año)	18,301,600.49
Tubo de Flujo 3	Ancho (m)	3888
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	1,944,000
	Gradiente i	0.0111
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	0.596921086
	Q(m ³ /d)	51,573.98
	Q(m ³ /año)	18,824,503.36

Tabla 15. Estimación de las entradas por flujo subterráneo para el año 2019.

Tubo de Flujo 1	Ancho (m)	4198
	Espesor (m)	500
	área (m ²)	2,099,000
	gradiente i	0.0111
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	0.644515102
	Q(m ³ /d)	55,686.10
	Q(m ³ /año)	20,325,428.27
Tubo de Flujo 2	Ancho (m)	7265
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	3,632,500
	Gradiente i	0.0111
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	1.115388809
	Q(m ³ /d)	96,369.59
	Q(m ³ /año)	35,174,901.48

Tabla 16. Estimación de las entradas por flujo subterráneo para el año 2023.

Tubo de Flujo 1	Ancho (m)	5051
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	2,525,500
	gradiente i	0.0178
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	1.242494232
	Q(m ³ /d)	107,351.50
	Q(m ³ /año)	39,183,298.11
Tubo de Flujo 2	Ancho (m)	3,110
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	1,555,000
	gradiente i	0.0137
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	0.588932076
	Q(m ³ /d)	50,883.73
	Q(m ³ /año)	18,572,561.95
Tubo de Flujo 3	Ancho (m)	3518
	Espesor (m)	500
	Área (m ²)	1,759,000
	gradiente i	0.0089
	Kequi (m/s)	2.77E-05
	Q(m ³ /s)	0.432715561
	Q(m ³ /d)	37,386.62
	Q(m ³ /año)	13,646,117.95

3.3 Balance hídrico superficial – subterráneo

A partir de un estudio del balance hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre. El estudio del balance hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas, también conocido como ecuación de la continuidad. Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (Sokolov & Chapman, 1981).

Para el balance hídrico la ecuación general de balance establece que:

Entradas = Salidas

Para lo superficial:

Entradas = Precipitación

Salidas = Escurrimiento, Evapotranspiración, Infiltración.

La ecuación para el balance subterráneo se tiene:

Entradas = recarga vertical (precipitación), entradas por flujo subterráneo horizontal, recarga inducida.

Salidas = extracción de aguas subterráneas.

Al definir la ecuación de balance hídrico superficial-subterráneo general queda definida como:

Recarga vertical (precipitación) + entradas por flujo subterráneo horizontal+ recarga inducida - extracción de aguas subterráneas.

En la Tabla 17 se muestra los resultados del balance hídrico-subterráneo calculado para el año 2017.

Tabla 17. Ejemplo de balance hídrico para el año 2017.

BALANCE HIDROLOGICO PARA EL AÑO 2017			
ENTRADAS			
RECARGA VERTICAL			
Precipitación media anual (m/año)	Área acuífero (m2)	Coeficiente infiltración	Volumen (hm3/año)
0.328	686,824,527.81	0.00	0.00
RECARGA INDUCIDA			
Usos riego (hm3/año)		%	Volumen (hm3/año)
24.74		15.00	3.71
Servicio público urbano (hm3/año)		%	
10.24		10.00	1.02
ENTRADAS POR FLUJO SUBTERRÁNEO			(hm3/año)
			49.35
SALIDAS			42.66
BOMBEO			
Extracción aguas nacionales títulos			Volumen (hm3/año) 42.66
			42.66
DISPONIBILIDAD			(hm3/año) 11.43

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 17, para el año 2017 se estimó una precipitación media anual de 328 mm la cual se supone se distribuye uniformemente en el área de la región Centro-Sur, sin embargo, debido al volumen de evapotranspiración real estimado la infiltración vertical es despreciable, las entradas ocurren principalmente por entrada de flujo subterráneo lateral estimado en 49.35 hm³/año; y también por los retornos de agua utilizados para riego agrícola y abastecimiento público urbano. Al aplicar la ecuación de balance hídrico, se obtuvo como resultado que existe una disponibilidad para ese año de apenas 11.42 hm³/año, valor que debe tomarse con precaución al ser una estimación y es muy sensible a los valores de conductividad hidráulica, lo que sí es evidente es que la región en estudio está o es muy propensa a condiciones de sobreexplotación.

En la Figura 29, se muestra el mismo análisis de la Tabla 17 pero explicado de manera gráfica y el balance de masas expresado en unidades de mm/año, resultado una disponibilidad de apenas 16.6 mm/año.

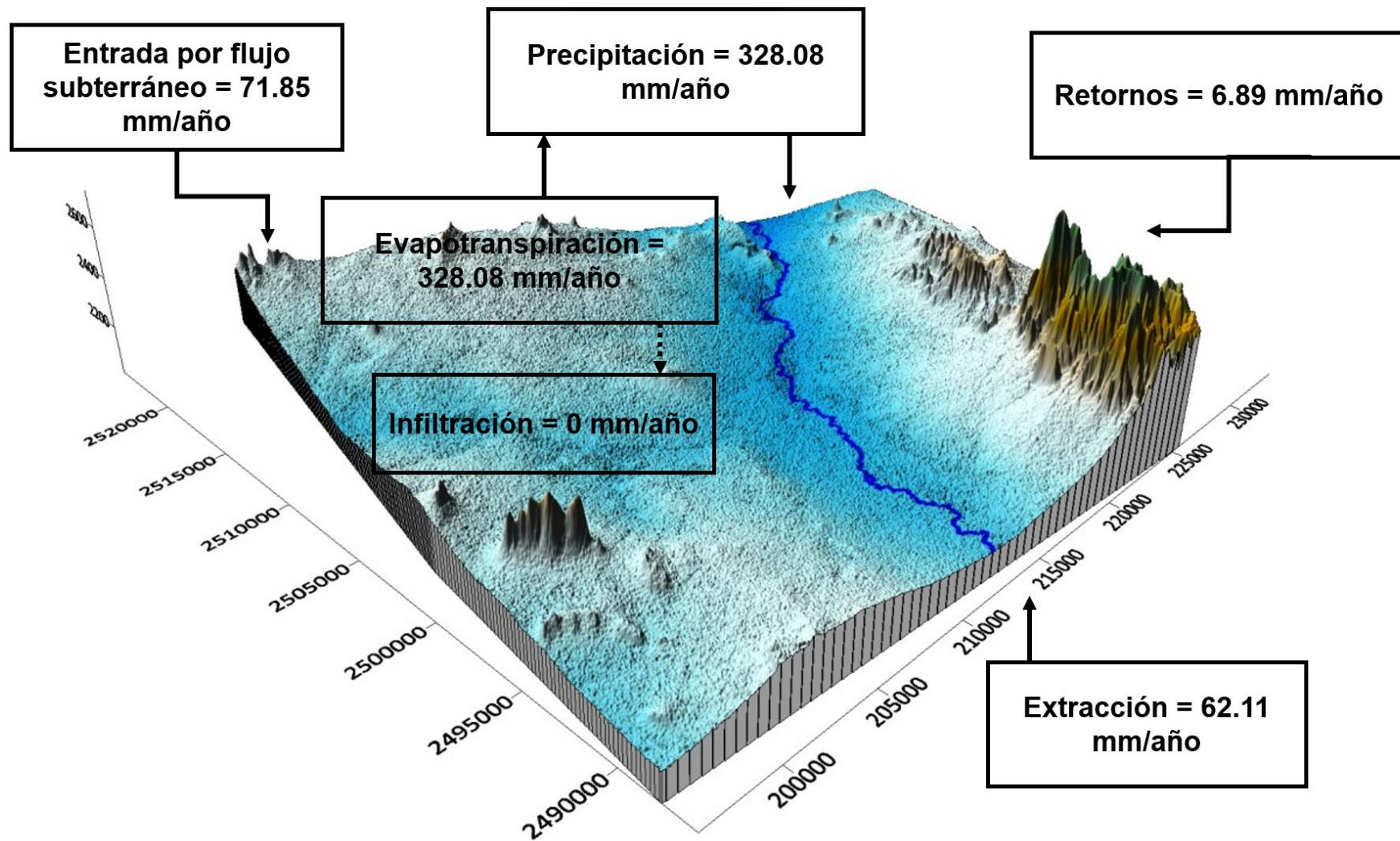


Figura 29. Balance hídrico superficial-subterráneo.

4.- Evaluación de la variabilidad climática

4.1 Introducción

En este capítulo se detalla la evaluación de la variabilidad climática en la región de estudio, considerando esto necesario para la evaluación de posibles escenarios futuros.

Se ha analizado dos variables climáticas: la precipitación total y la temperatura media (mensuales y anuales) para un periodo comprendido entre 1980 a 2018.

En primer lugar, se efectuó un análisis de tendencias a través de la herramienta estadística Mann-Kendall y se estimó las magnitudes de cambio de dichas tendencias a través del método de Sen's Slope.

4.2 Estaciones meteorológicas en la región de estudio

Considerando el polígono administrativo del acuífero de Salinas de Hidalgo se ubicaron las estaciones meteorológicas que se localizarán al interior y 30 km hacia el exterior de este. La ubicación de las estaciones se obtuvo del archivo tipo KML que contiene la red de estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional donde se seleccionaron un total de 20 estaciones, de las cuales 11 están ubicadas en el Estado de San Luis Potosí y 9 en el Estado de Zacatecas.

Se solicitaron los registros históricos de dichas estaciones a la Comisión Nacional del Agua a través de las direcciones locales de San Luis Potosí y Zacatecas, los cuales fueron proporcionados en formato digital (hoja de cálculo). Se realizó un filtrado de las estaciones con base en pruebas estadísticas para evaluar su calidad a través de criterios de homogeneidad e independencia de los registros históricos.

4.3 Pruebas de homogeneidad e independencia

En específico se aplicaron dos pruebas: Helmert y Anderson para revisar la homogeneidad e independencia de los datos respectivamente, estas a los registros históricos de la precipitación máxima diaria para las 20 estaciones mencionadas en un periodo comprendido desde 1980 hasta 2018.

La homogeneidad hace referencia a una serie de datos formados por una secuencia de valores de una variable que han sido observados bajo las mismas (o semejantes) condiciones y con el mismo (o semejante) instrumento (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2019).

Con la independencia se busca que la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento no dependa de la ocurrencia de los datos que le preceden y que tampoco influya en los datos futuros (Orozco-Ramírez, 2015).

4.3.1 Prueba de Helmer

La prueba estadística de Helmer consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo, se crea una secuencia (S), en contraste, si una desviación es seguida por otra de signo contrario, se crea un cambio (C). Para cada año, excepto el primero, se definen las secuencias o cambios. Si la serie es 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 depende de la longitud del registro (n) (Campos-Aranda, 1998):

$$S - C = 0 \pm \sqrt{n - 1} \text{ o bien } S - C = \pm \sqrt{n - 1}$$

Donde

S = Número de secuencias

C = Número de cambios

C = Número de registros

4.3.2 Prueba de Anderson

La independencia es verificada a través de la persistencia, la cual se cuantifica con base en el coeficiente de correlación serial del orden k , el cual indica que tan fuertemente es afectado un evento por el anterior a él (Campos-Aranda, 2010).

El coeficiente de correlación serial de orden 1 (r_1), se cuantifica para un registro o serie anual de máximos de tamaño n , haciendo parejas x, y de un dato con el siguiente,

después ese con el que sigue y así sucesivamente, formando parejas como n-1 y aplicando la siguiente ecuación:

$$r_{xy} = \frac{[\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})(yi - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (yi - \bar{y})^2}} = \frac{Covarianza}{\sqrt{Sx^2 * Sy^2}}$$

La prueba de Anderson indica que cuando el valor calculado de r_1 no excede al intervalo definido por los límites de control Lc , no es estadísticamente diferente de cero y por lo tanto, la persistencia no existe. Los límites de control quedan definidos como:

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

El signo que se utiliza en la expresión anterior corresponde al de r_1 . La condición de independencia en los datos de una serie anual de máximos hace válidos los resultados del análisis probabilístico o predicciones buscadas.

Se aplicó la prueba de Helmert y Anderson a las 20 estaciones climatológicas seleccionadas para la región de estudio, y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 18. Finalmente se optó por trabajar únicamente con los registros de las estaciones meteorológicas que presentaron independencia en sus registros históricos.

Tabla 18. Resultados de las pruebas de Independencia y Homogeneidad.

Clave	Estación meteorológica	Periodo	Prueba helmert	Prueba anderson
24019	El estribo	1970-2018	NH	NI
24048	Vallejo	1964-2018	NH	I
24055	Peñon blanco	1950-2018	NH	I
24059	Villa de Ramos II	1969-2018	H	NI
24073	La Reforma	1965-2018	H	I
24148	Salinas de Hidalgo	1977-2018	H	I
24150	Guaname	1978-2018	NH	I
24152	Sauz de Calera	1977-2018	H	I

24161	La Herradura	1978-2018	NH	NI
24194	San Rafael	1982-2018	H	I
24196	El Toro	1991-2018	NH	NI
32015	El Rusio	1967-2018	H	I
32024	Guadalupe victoria	1966-2018	NH	I
32033	Loreto	1964-2018	NH	I
32061	Villa hidalgo	1966-2018	H	I
32068	Pinos (smn)	1947-2018	H	I
32114	Villa González Ortega	1978-2018	H	I
32186	El saladillo	2000-2018	H	I
32187	Espíritu Santo	1984-2018	H	I
32188	El Nigromante	1984-2018	H	I
H	Homogénea		I	Independiente
NH	No homogénea		NI	No independiente

4.4 Estimación de datos faltantes

Para realizar el análisis de tendencias de las variables climáticas se requiere contar con una base de datos continuos e independientes que abarquen el máximo número de años posible, sin embargo, la base de datos obtenida de fuentes oficiales presenta vacíos importantes, los cuales pueden deberse a la ausencia del instrumento de lectura, alguna falla de este, error de transcripción, etcétera. Es importante tener en cuenta que estos datos faltantes constituyen una fuente de error, por lo cual deberán ser estimados con el fin de obtener una mejor calidad en los análisis.

4.4.1 Método del promedio aritmético

En este método, los valores faltantes fueron estimados mediante el promedio aritmético de observaciones concurrentes en las estaciones circundantes que tienen características similares con la estación objetivo (Yozgatligil *et al.*, 2012). Entonces la estimación se obtiene mediante:

$$Px = \frac{1}{n}(Px1 + Px2 + \dots + Pxn)$$

$Px = \text{Dato faltante}$

$n = \text{número de datos concurrentes}$

$Pxn = \text{Dato concurrente en estación circundante}$

Se aplicó este método para los registros de precipitación total y temperatura media faltantes, utilizando los datos de al menos dos o más estaciones cercanas a la estación en estudio, así mismo se contempló que no existiera un desnivel topográfico importante entre las estaciones a utilizar.

4.4.2 Método racional deductivo

En ocasiones no existen datos de estaciones cercanas y circundantes a la estación incompleta, por lo tanto, existe la posibilidad de estimar datos faltantes mediante datos de la misma estación en estudio.

(Campos, 1998) estableció que se puede estimar el valor mensual faltante por medio del método Racional Deductivo, utilizando un simple promedio aritmético de los valores contenidos en el registro para ese mes, lo anterior se considera válido únicamente si es un solo año (o máximo dos) el faltante y tal promedio se realiza con diez datos como mínimo (o 20 años en el caso de datos mensuales). En resumen, el método Racional Deductivo permite estimar los registros mensuales faltantes, apoyándose en la información que brindan los años completos, mediante la siguiente expresión:

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

Donde:

$P_i = \text{Valor de precipitación mensual desconocido (mm)}.$

$\sum P = \text{Suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos (mm)}.$

$S_i = \text{Porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes}.$

4.5 Estimación de valores medios

La estimación de valores medios a nivel local (por estación) se realizó mediante el método de promedio aritmético para el caso de la temperatura media y mediante la suma de los registros de precipitación durante cada mes del periodo de tiempo analizado.

La estimación de valores medios a nivel regional se obtuvo mediante el método de Isoyetas descrito en el capítulo 3. Sin embargo, con el objetivo de optimizar este proceso se utilizaron dos herramientas computacionales: el programa “Golden Surfer” y “Quantum Gis”, a continuación, se detalla el proceso:

- a) Preparación de un archivo tipo .xls con las coordenadas de las estaciones meteorológicas, y los valores mensuales o anuales de la variable climática.
- b) Generación de un archivo tipo ráster mediante el software Surfer utilizando el archivo .xls anterior y haciendo uso del interpolador tipo Kriggin.
- c) Se realizó un recorte del archivo ráster delimitando únicamente la zona correspondiente a la Región Centro-Sur.
- d) Con la herramienta de procesos “Curva Hipsométrica”, se calculó el área debajo de isolíneas desde el valor mínimo hasta el máximo de cada ráster, a intervalos de 5 mm para la precipitación y 0.5 °C para la temperatura.
- e) Se aplicó la fórmula general del método de Isoyetas calculando las áreas entre las isolíneas, así como los valores medio de éstas, para finalmente obtener un valor promedio de la variable en estudio.

4.6 Análisis de tendencias

4.6.1 Prueba Mann-Kendall

La prueba de Mann Kendall es una prueba estadística ampliamente utilizada para el análisis de tendencias en climatología y en series temporales hidrológicas. Hay dos ventajas de usar esta prueba. Primero, es una prueba no paramétrica y no requiere

que los datos estén distribuidos normalmente. En segundo lugar, la prueba tiene baja sensibilidad a las rupturas abruptas debido a series de tiempo no homogéneas. Los valores de los datos se evalúan como una serie temporal ordenada.

Cada dato se compara con todos los valores de datos subsiguientes. Siendo $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ un conjunto de n datos y donde x_j representa el dato en el tiempo j . La prueba de Mann-Kendall está dado por:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k)$$

Donde:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 1 \text{ si } x_j - x_k > 0$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = 0 \text{ si } x_j - x_k = 0$$

$$\text{sign}(x_j - x_k) = -1 \text{ si } x_j - x_k < 0$$

Un valor positivo muy alto de S es un indicador de una tendencia creciente, y un valor negativo muy bajo indica una tendencia decreciente. Sin embargo, es necesario calcular la probabilidad asociada con S y el tamaño de la muestra, n , para cuantificar estadísticamente la importancia de la tendencia.

Se ha descrito una prueba de aproximación normal que podría usarse para conjuntos de datos con más de 10 valores, siempre que no haya muchos valores empatados dentro del conjunto de datos.

$$VAR(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)]$$

Donde n es el número de datos, g es el número de grupos ligados (un grupo ligado es un conjunto de datos que tienen el mismo valor) y t_p es el número de datos en el grupo p^{th} .

Se calcula una prueba estadística normalizada Z :

$$Z_s = \frac{S - 1}{[\text{VAR}(S)]^{\frac{1}{2}}} \text{ si } S > 0$$

$$Z_s = 0 \text{ si } S = 0$$

$$Z_s = \frac{S + 1}{[\text{VAR}(S)]^{\frac{1}{2}}} \text{ si } S < 0$$

Se calcula la probabilidad asociada con esta prueba estadística normalizada Z. La función de densidad de probabilidad para una distribución normal con una media de 0 y una desviación estándar de 1 viene dada por la siguiente ecuación:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

Se dice que la tendencia es decreciente si Z es negativo y la probabilidad calculada es mayor que el nivel de significancia. Se dice que la tendencia es creciente si Z es positivo y la probabilidad calculada es menor que el nivel de significancia. Si la probabilidad calculada es menor que el nivel de significación, no hay tendencia (Alhaji *et al.*, 2018).

4.6.2 Estimación de la magnitud de cambio

Si existe una tendencia lineal en una serie de tiempo, entonces la pendiente real o magnitud de cambio por unidad de tiempo se puede estimar utilizando un procedimiento no paramétrico simple desarrollado por Sen.

Si el modelo lineal se puede describir como:

$$f(t) = Qt + B$$

Donde Q es la pendiente y B es una constante. Para obtener una estimación de la pendiente Q, las pendientes de todas las parejas de datos son calculadas:

$$Qi = \frac{Xi - Xj}{i - j} \quad i = 1, 2, 3, 4 \dots N \quad j > k$$

Si hay n valores de X_j en la serie de tiempo, obtenemos tantos $N = n(n - 1)/2$ como estimaciones de pendiente Q_i . El estimador de pendiente de Sen's es la mediana de estos N valores de Q_i . Los N valores de Q_i son ordenados de menor a mayor y el estimador de Sen's es:

$$Q = f(x) = \begin{cases} Q_{N+1/2} & \text{si } N \text{ es impar} \\ \frac{1}{2} (Q_{\frac{N}{2}} + Q_{\frac{N+1}{2}}) & \text{si } N \text{ es par} \end{cases}$$

Se obtiene un intervalo de confianza bilateral del $100(1 - \alpha) \%$ sobre la pendiente estimada mediante la técnica no paramétrica basada en la distribución normal. El método es válido para n tan pequeño como 10 a menos que haya muchos empates (Alhaji *et al.*, 2018).

4.6.3 Detección de rupturas

Las series temporales pueden contener saltos abruptos que dividan a la serie en dos subperiodos. La prueba no paramétrica de Pettit es ampliamente utilizada en la literatura para detectar la ocurrencia de un salto abrupto o punto de cambio significativo en la media de una serie temporal. Esta prueba es particularmente útil cuando se desconoce la localización del punto de cambio (García Marín *et al.*, 2017).

También es aplicable para la comprobación de un punto de cambio desconocido.

- Hipótesis nula H_0 : esta estima que no existe cambio.
- Hipótesis alternativa H_1 : indica que existe cambio.

El proceso para la aplicación de esta prueba consiste en (Idoia-Zabalza, 2019):

- 1) Calcular el estadístico de la prueba, U_k .

$$U_k = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{signo}(x_j - x_i)$$

Siendo

$$\text{signo}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

La representación gráfica muestra el punto de cambio.

2) Calcular K .

$$K = \max_{1 \leq k \leq N} |U_k| = \max_{1 \leq k \leq N} (|K_+|, |K_-|)$$

Donde:

K_+ : máxima U_k para cambio decreciente.

K_- : máxima U_k para cambio creciente.

3) Calcular el nivel de confianza asociado a K_+ y K_- .

$$\rho = e^{\left[\frac{-6 \cdot K^2}{N^3 + N^2}\right]}$$

La hipótesis nula no se rechaza cuando:

$$\rho > \alpha \text{ siendo } \alpha = 0.05$$

4.7 Resultados por estación meteorológica

4.7.1 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la precipitación total

Tabla 19. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la precipitación total.

CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
24048	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	1.11	0.00	0.00	1.76	0.00	0.00	0.00	3.85
24055	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.60	0.26	0.17	1.50	0.17	0.00	-0.08	3.52
24073	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.13	0.77	0.43	-0.24	2.06	0.05	0.00	0.00	2.50
24148	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.83	1.42	-0.46	1.33	-0.19	0.01	-0.17	2.51
24150	0.00	0.00	0.00	-0.25	-0.18	-0.46	-0.66	-0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	-4.09
24152	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.50	0.24	2.23	0.00	0.06	0.00	4.88
24194	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.20	0.95	0.66	-0.32	1.89	-0.02	0.00	-0.11	3.28
32015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.22	0.60	0.28	1.64	0.03	0.00	-0.14	3.98
32024	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.54	0.00	0.71	1.33	-0.13	0.00	-0.16	1.64
32033	0.00	0.00	0.00	-0.19	-0.03	0.64	-0.01	0.12	2.31	-0.41	-0.01	-0.14	1.17
32061	0.00	0.20	0.00	-0.08	0.21	1.24	1.30	0.40	1.58	0.00	0.00	-0.09	5.37
32068	-0.37	0.00	0.01	0.00	0.00	1.70	0.39	0.27	1.91	-0.23	0.00	0.00	4.07
32114	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	1.27	-0.50	0.22	1.08	-0.26	0.00	-0.14	1.94
32186	0.00	0.00	0.13	0.00	-0.44	1.88	1.08	1.78	3.93	0.75	0.80	0.00	12.08
32187	0.00	0.00	0.00	-0.17	-0.44	0.40	-0.56	-0.19	0.92	-0.90	0.09	0.00	-1.95
32188	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.82	0.16	0.60	2.29	0.22	0.08	0.00	5.74

De acuerdo con la Tabla 19, se analizó la precipitación media mensual correspondiente a 16 estaciones climatológicas durante los años 1980 a 2018, se observó como principal resultado que 13 estaciones muestran una tendencia positiva (incremento) para el mes de septiembre, esta magnitud de cambio está entre 1.08 y 2.31 mm/año, en particular, las estaciones ubicadas en la región de estudio (24055, 24148 y 32114) presentaron una pendiente de 1.50, 1.33 y 1.08 mm/año, respectivamente.

Con respecto a los valores de precipitación anual, se observó tendencia positiva en 7 estaciones analizadas, la magnitud de cambio positiva se encontró entre 1.17 y 5.74 mm/año.

Tabla 20. Rupturas la serie de tiempo de la precipitación total por estación.

CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
24048		1993				1998			1994				2005
24055									2000			1990	
24073													
24148							2001		2001				
24150													
24152									1995				2001
24194							2001		2001				2001
32015									1989				2001
32024												1991	
32033									2001				
32061		2000							2001				2001
32068									1993				
32114									1988				
32186		2001											
32187													
32188									2000				2001

De acuerdo con la Tabla 20, se analizó la precipitación media mensual correspondiente a 16 estaciones climatológicas durante los años 1980 a 2018, se observó que 11 estaciones muestran una ruptura en su serie de tiempo para el mes de septiembre, esto ocurrió entre los años 1988 y 2001, en particular, las estaciones ubicadas en la región de estudio (claves: 24055, 24148 y 32114) la ruptura se presentó en 2000, 2001 y 1988 respectivamente.

Con respecto a los valores de precipitación anual, se observó un punto de ruptura en 6 estaciones analizadas para el año 2001.

4.7.2 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la temperatura media

Tabla 21. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura media.

CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
24048	-0.08	-0.05	-0.12	-0.08	-0.11	-0.10	-0.10	-0.09	-0.08	-0.10	-0.09	-0.07	-0.08
24055	0.06	0.04	0.01	-0.01	-0.03	-0.04	-0.01	-0.03	-0.02	-0.02	0.00	0.02	0.00
24073	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02
24148	-0.02	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	-0.01	0.00	-0.01
24150	-0.05	-0.02	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	-0.02	-0.03	-0.03	0.00	0.00	0.00	-0.02
24152	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	-0.01	0.07	0.03	0.04	0.05	0.03	-0.02	0.03
24194	-0.09	-0.05	-0.09	-0.09	-0.07	-0.07	-0.08	-0.06	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.08
32015	-0.11	-0.08	-0.06	-0.08	-0.08	-0.11	-0.09	-0.07	-0.05	-0.08	-0.11	-0.13	-0.08
32024	0.05	0.05	0.04	0.03	0.01	0.00	0.02	0.03	0.00	0.03	0.03	0.02	0.03
32033	-0.02	0.00	-0.01	-0.02	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.01
32061	-0.08	-0.05	-0.03	-0.03	-0.05	-0.08	-0.04	-0.05	-0.04	-0.07	-0.09	-0.08	-0.06
32068	-0.04	-0.02	0.00	-0.01	0.02	-0.03	0.00	0.01	-0.05	-0.02	-0.05	-0.05	-0.03
32114	-0.03	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.02	-0.04	0.00
32186	-0.04	-0.03	0.00	-0.06	0.09	0.00	-0.01	0.05	0.04	0.02	0.03	0.00	0.03
32187	-0.06	-0.04	-0.02	0.02	0.02	-0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.07	-0.07	-0.02
32188	-0.07	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04	-0.03	-0.04	-0.02	-0.02	-0.04	-0.11	-0.08	-0.50

De acuerdo con la Tabla 21, se analizó la temperatura media mensual correspondiente a 16 estaciones climatológicas durante los años 1980 a 2018, se observó que 6 estaciones muestran una tendencia negativa (decremento) para el mes de diciembre, esta magnitud de cambio osciló entre -0.05 y -0.13 °C/año, en particular, la estación clave 24055 presenta incremento en enero y febrero (0.06 y 0.04 °C respectivamente), la 24148 y 32114 no presentan cambios; respecto a los valores de temperatura media anual, se observan incrementos y decrementos en 2 y 4 estaciones respectivamente.

Tabla 22. Rupturas en la serie de tiempo de la temperatura media por estación.

CLAVE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
24048	2002		2002	2002	2001	2002	2002	2002	2006	2005	2002	2002	2002
24055	2006	2007											
24073		1992					1991	1991	1991				1992
24148													
24150													
24152				1988			1997						
24194	1995			1992			2009		1996	1995	2001	1995	1994
32015	1990	1990	1991	1991	1991	1990	1990	1990	1990	1990	1995	1995	1990
32024	1992	1993		1997	1994		1993	1995		1992			1993
32033	1996										1994	1994	1992
32061	1991	1990	1990	1991	1991	1990	1990	1990	1990	1990	1994	1994	1990
32068									1989				1989
32114				1997									
32186			2000										
32187	1996										1998	1994	
32188	1997					2003	2003		2004		1998	1996	2003

De acuerdo con la Tabla 22, se analizó la temperatura media mensual correspondiente a 16 estaciones climatológicas durante los años 1980 a 2018, se observó que 9 estaciones muestran una ruptura en su serie de tiempo para el mes de enero, esta se da entre los años 1991 y 2006. Con respecto a los valores de temperatura anual, se observó un punto de ruptura en 9 estaciones analizadas entre los años 1990 y 2003.

4.8 Resultados a nivel regional

4.8.1 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la precipitación total

Tabla 23. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la precipitación total mensual

PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980-2018	-0.01	0.01	0.02	-0.11	-0.20	0.73	0.67	-0.09	1.39	-0.17	0.00	-0.16

De acuerdo con la Tabla 23 la serie de precipitación media mensual a escala regional muestra una tendencia positiva durante el mes de septiembre, con una pendiente de 1.39 mm/año.

Tabla 24. Rupturas en la serie de tiempo de la temperatura media

PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980-2018									2001			

De acuerdo con la Tabla 24 la serie de precipitación media mensual a escala regional presenta una ruptura para el mes de septiembre a partir del año 2001.

4.8.2 Resultados de tendencias, magnitud de cambio y rupturas en la temperatura media

Tabla 25. Magnitud de cambio en las tendencias significativas de la temperatura media.

PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980-2018	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00

De acuerdo con la Tabla 25 la serie de temperatura media mensual a escala regional no presenta tendencias durante el periodo analizado.

Tabla 26. Rupturas en la serie de tiempo de la temperatura media.

PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980-2018												

De acuerdo con la Tabla 26 la serie de temperatura media mensual a escala regional no presenta rupturas durante el periodo analizado.

5.- Implementación del modelo numérico de flujo de aguas subterráneas

5.1 Modelo conceptual de la Región Centro-Sur del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo

Para resolver cualquier problema de agua subterránea, el hidrogeólogo debe recopilar y analizar datos de campo relevantes y articular aspectos importantes de los sistemas de aguas subterráneas, la síntesis de lo que se sabe sobre el sitio es un modelo conceptual.

Cuanto más se aproxima el modelo conceptual a la realidad, es más probable que el modelo numérico proporcione pronósticos razonables. El nivel de detalle necesario está determinado por el objetivo del modelo, los datos de campo disponibles y los límites prácticos en la construcción del modelo numérico (Lekula *et al.*, 2018).

Definimos un modelo conceptual como una representación cualitativa de un sistema de aguas subterráneas que se ajusta a los principios hidrogeológicos y se basa en información geológica, geofísica, hidrológica e hidrogeoquímica.

5.1.1 Componentes del modelo conceptual

Un modelo conceptual al 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 (ver Figura 31). Aunado a lo anterior, se debe integrar toda la información que complementa la conceptualización del modelo, por ejemplo, el análisis de la composición química del agua subterránea.

5.1.2 Fronteras

Se ha considerado como frontera de no flujo los límites de la cuenca superficial sur (obtenida mediante el estudio hidrológico superficial y detallado en el capítulo 2), ya que de acuerdo con las direcciones de flujo se observa la convergencia del flujo desde las zonas topográficamente más altas hacia la zona centro de la cuenca sur, por lo tanto, se asume que las lagunas constituyen la zona de descarga del agua subterránea.

5.1.3 Estratigrafía

Con respecto a la estratigrafía, se hace referencia al trabajo de Tesis de (Salazar, 2019), el cual tuvo como objetivo general realizar una correlación geohidrológica y geofísica electromagnética en el Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí.

Del análisis y procesamiento de tres secciones geoeléctricas en la zona del valle del acuífero de Salinas realizadas por (Salazar, 2019), se identificaron los estratos que conforman el subsuelo con sus respectivos espesores, y se agruparon en unidades hidrogeológicas con sus respectivas capacidades de transmitir y almacenar agua, ver Tabla 27.

Como resultado, se determinaron tres unidades diferentes; la Unidad 1 que se divide en 1A y 1B, comprendió resistividades de 1 a 50 ohms, contiene material sedimentario de relleno y arcillas, su condición hidrológica varía desde permeable hasta poco permeable según sea el caso. La Unidad 2, comprendió resistividades bajas/medias (50-207 ohms) y se conforma por secuencias sedimentarias y volcánicas, depositadas en un ambiente de cuenca. La Unidad 3 comprendió resistividades muy altas (300-1400 ohms); se conforma por secuencias sedimentarias con un alto grado de compactamiento y muy baja permeabilidad.

Una vez identificadas las distintas unidades, se realizó una correlación con la litología de la zona, y se asignó una condición de permeabilidad, en una escala desde lo impermeable hasta permeable.

Tabla 27. Unidades geoelectricas, reportadas por Salazar (2019).

Unidades	Resistividades (Ohm)	Litología	Formaciones	Condiciones
Unidad 1A	7-50	Conglomerado-relleno sedimentario	Conglomerado Zaragoza.	Permeable/impermeable
Unidad 1B	1-7	Arcillas	Arcillas, relleno sedimentario.	Impermeable
Unidad 2	50-207	Caliza, Caliza-lutita, Roca ignea (basalto e ignimbrita), Caliza-limolita,	Indidura, Las Joyas, La Peña, Cupido, Riolita Panalillo	Permeable/ (medianamente permeable)
Unidad 3	300-1400	Arenisca-Lutita Caliza-Arenisca Caliza-Lutita	Fm. Caracol, Taraises, Cuesta del Cura	Poco permeable

Después realizar el análisis de las secciones, se concluyó que en la parte central de la zona de estudio se encuentra el acuífero más productivo y por ende con mayor importación para su explotación, este corresponde a material de depósito del Cuaternario, el cual es producto de la fragmentación de rocas más grandes y fue denominado por (Salazar, 2019) como el Graben de Salinas de Hidalgo, ver Figura 30.

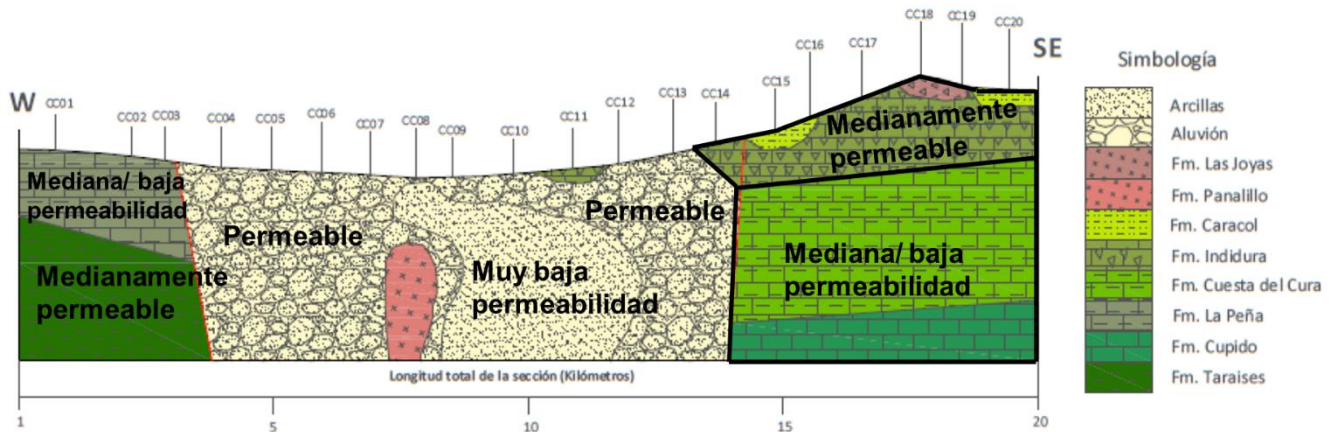


Figura 30 Sección hidrogeológica centro.

5.1.4 Dirección y elevación del nivel freático

Las elevaciones de nivel freático en la zona oscilan entre los 2200 y 2060 m.s.n.m.m; los vectores de flujo sugieren una dirección preferencial de flujo desde la zona Noroeste hacia la franja con mayor presencia de pozos de extracción; es visible un

cono de depresión en la parte central del acuífero, posiblemente asociado a los volúmenes de extracción.

5.1.5 Fuentes de aprovechamiento

Se tomaron los datos reportados en el Registro Público de Derechos del Agua con fecha de corte al 31 de marzo de 2022, en la cual se reportó una concesión total de 26,509,919 m³/año de extracción, y una zona de libre alumbramiento conformada por 962 constancias, de las cuales se desprenden el mismo número de anexos y fuentes de extracción; y un volumen de extracción 22,836.09 m³/año. Finalmente, el volumen de extracción en todo el acuífero administrativo resultó igual a 48,478,236.79 m³/año, de acuerdo con la delimitación de la Región Centro-Sur, en ella se tiene una extracción de 43,447,517.90 m³/año, es decir, un 90 % del total; por lo tanto, las coordenadas de cada aprovechamiento y sus respectivos volúmenes serán implementados en el modelo numérico.

5.1.6 Balance hídrico

De acuerdo con el análisis realizado, se estima que en la Región Centro-Sur para el periodo comprendido entre 1988 y 2018 predomina una temperatura media anual del orden del 16.72°C, una precipitación medial anual del de 367.85 mm; que consiguiente al estimar la evapotranspiración real, esta se calculó en 351.37 mm/año. Debido a los valores de precipitación y evapotranspiración real, y tal como se detalló en el capítulo 3 al ocurrir las precipitaciones en la zona el agua se evapora rápidamente. Bajo el método de M. Coutagne se estimó un coeficiente de infiltración de 4.2 % con respecto al total de la precipitación media anual.

Por lo consiguiente, se despreció la entrada por flujo vertical al acuífero y se consideraron como dos entradas por flujo subterráneo a la región de estudio, una en la zona N-O y otra al Sur del acuífero, las cuales se estimaron con la Ley de Darcy y cuyos resultados se mostraron en las Tablas 13 al 16. La estimación de las variables climatológicas y el cálculo del balance hídrico se puede consultar en el capítulo 2.

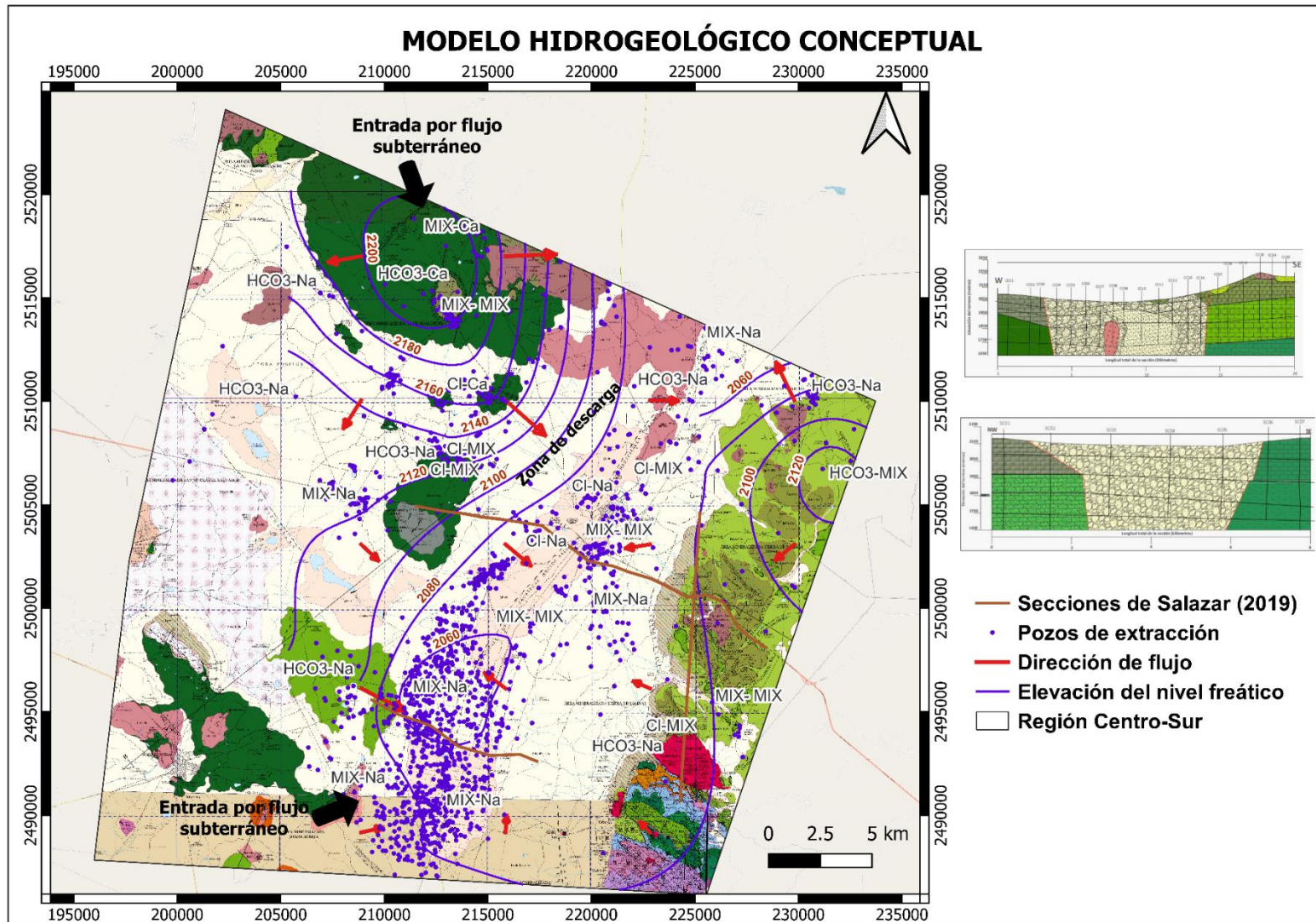


Figura 31. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Región Centro-Sur de Salinas de Hidalgo.

5.2 Diseño del modelo numérico

Los modelos tridimensionales simulan el flujo en las tres dimensiones espaciales y pueden incluir explícitamente todas las unidades hidroestratigráficas que afectan el flujo de agua subterránea. Por lo general, cada unidad hidroestratigráfica es una capa del modelo, pero se utilizan más capas cuando es necesario calcular la distribución vertical de las cargas dentro de una unidad hidroestratigráfica.

Un modelo tiene límites superiores e inferiores, así como laterales, y el modelador debe especificar las condiciones a lo largo de todos los límites del dominio.

El límite superior típicamente es el nivel freático. El límite inferior por lo general es un contacto con material relativamente impermeable y está representado por una condición de límite sin flujo.

5.2.1 Dimensión espacial (dominio)

La extensión horizontal del modelo numérico se definió con base en lo siguiente:

- A. Límites del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo.
- B. Ubicación de los pozos de extracción concesionados y publicados en el Registro Público de Derechos del Agua
- C. Ubicación de las norias y pozos de observación monitoreados por León-González 2020.
- D. Análisis de las configuraciones históricas de la elevación de nivel freático.
- E. Delimitación de la cuenca hidrográfica sur.
- F. Análisis de los resultados del análisis de la calidad del agua subterránea reportada por Cadenas (2021).

Como resultado del análisis de los puntos anteriores (A-F), se definió un polígono de tal manera que estuviera delimitado por la cuenca de aportación superficial, y que también abarcara los puntos de extracción y monitoreo y, por último, que su forma sea coherente con las equipotenciales medidas en años anteriores, el dominio del modelo quedó definido como se muestra en la Figura 32.

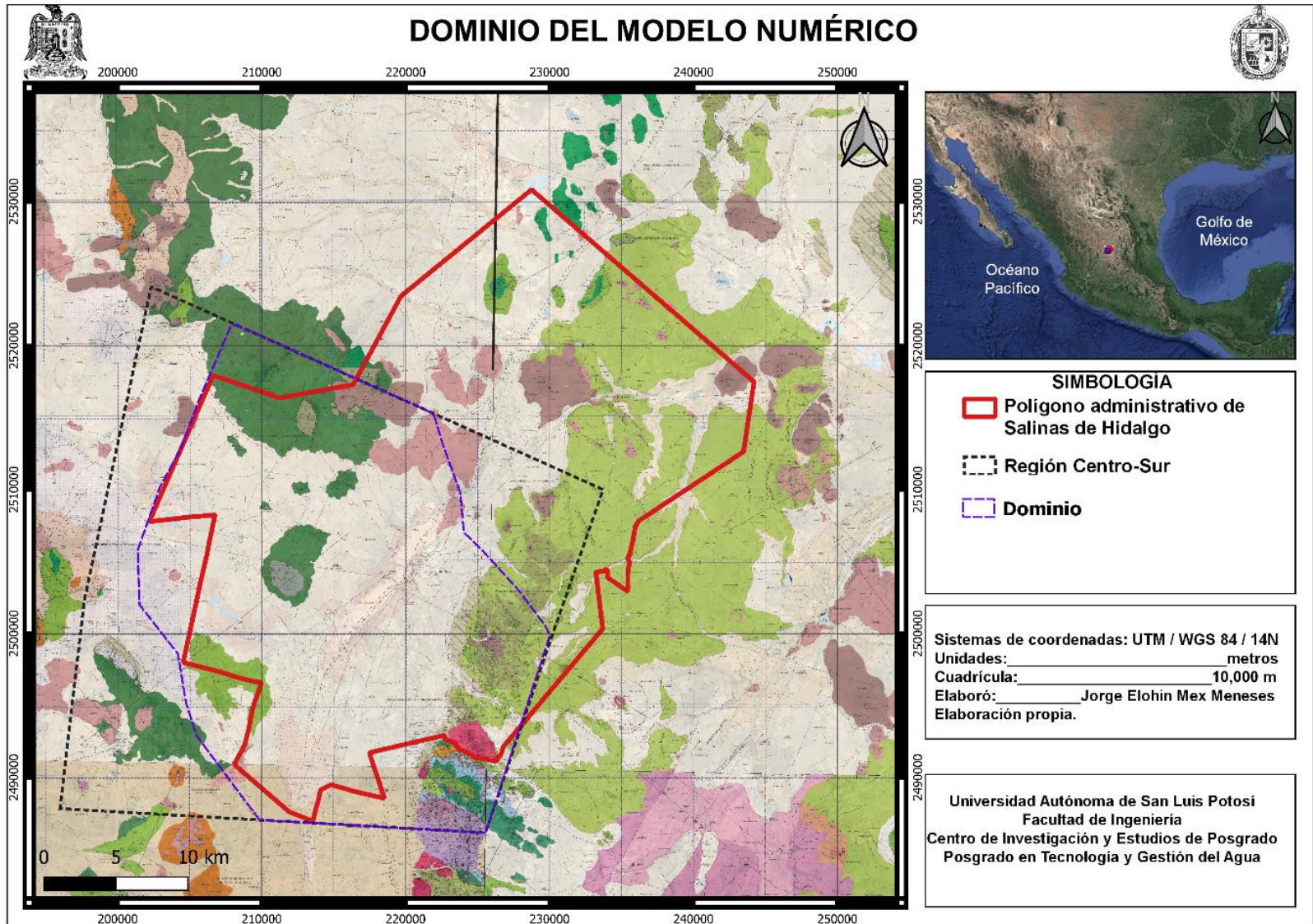


Figura 32. Dominio del modelo numérico.

Con respecto a la extensión vertical, se construyó un modelo tridimensional conformado por 5 capas, con un espesor promedio entre 50 y 150 metros de espesor, cuyas elevaciones fueron definidas con base en el modelo digital de terreno (ver Figura 33).

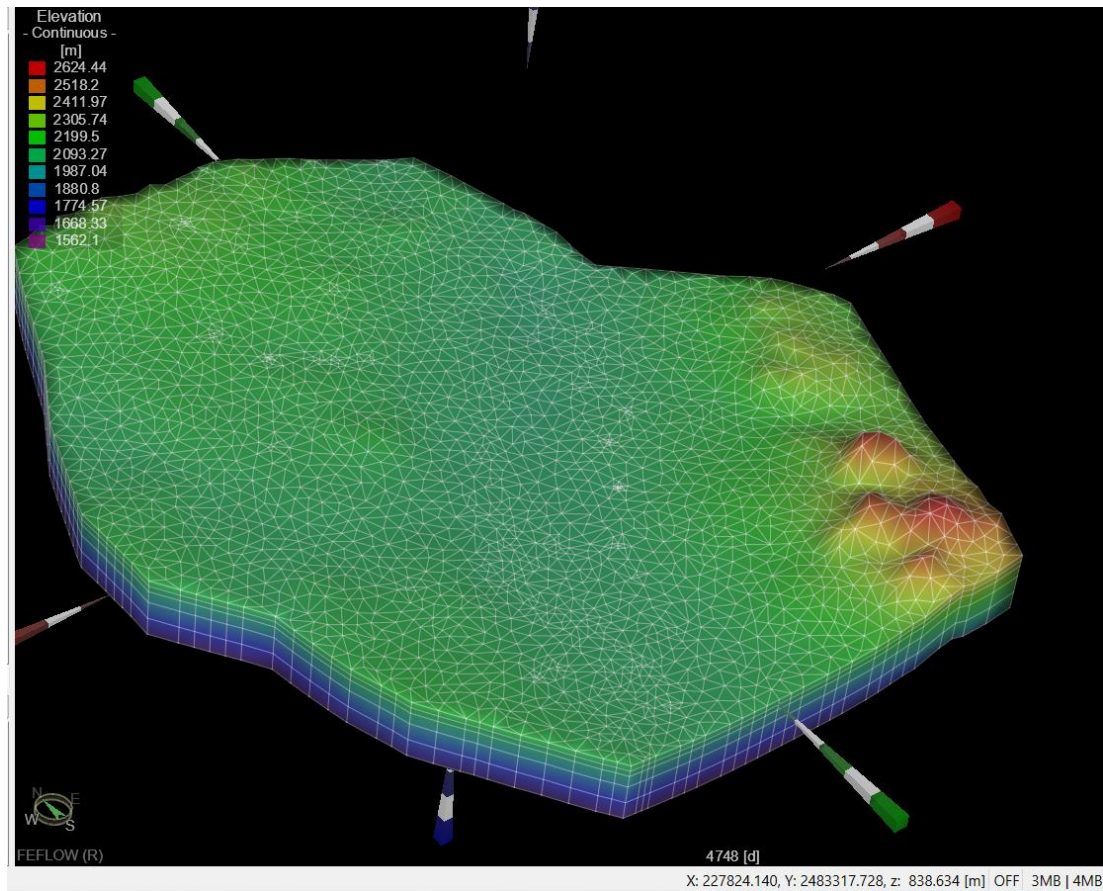


Figura 33. Discretización vertical del modelo.

5.2.2 Discretización espacial

Se discretizó la malla del modelo en 5249 elementos triangulares, de aproximadamente 500 m por lado; esto mediante el generador automático de malla "Triangle", cada elemento se conformó por sus respectivos nodos y en cada pozo de extracción y observación se asignó un nodo, ver Figura 34.

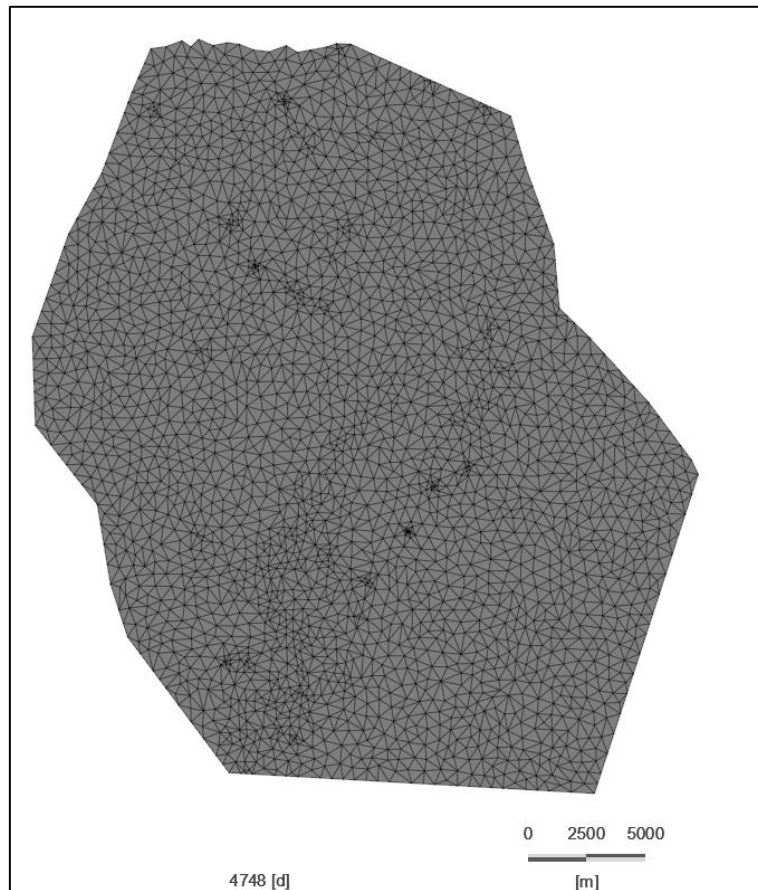


Figura 34. Discretización espacial del modelo numérico.

5.2.3 Discretización temporal

El periodo de tiempo para la simulación en estado transitorio en un inicio fue de 29 años, comenzando la simulación el 1 de junio de 1994 hasta el 18 de marzo de 2023, se eligió esta fecha inicial ya que fue el primer día que se tiene registro de extracciones publicadas en el REPDA; sin embargo; en el proceso de calibración en estado transitorio era complicado lograr un buen ajuste ya que, al asignarle las condiciones iniciales en el día 1 de junio de 1994, los valores de carga hidráulica se elevaron por encima de su valor medido ya que no existía un bombeo suficiente que abatiera el nivel en los pozos. Por la razón antes descrita, se acotó al modelo, comenzando las simulaciones en el año 2007 (ver Figura 35), ya que en este año ya se contaba con un volumen de extracción lo suficientemente importante que simulaba la realidad del

sistema, por lo tanto, el modelo fue corrido desde el 2007 al 2023, calibrado para los años 2017 y 2019; y validado con mediciones del año 2023.

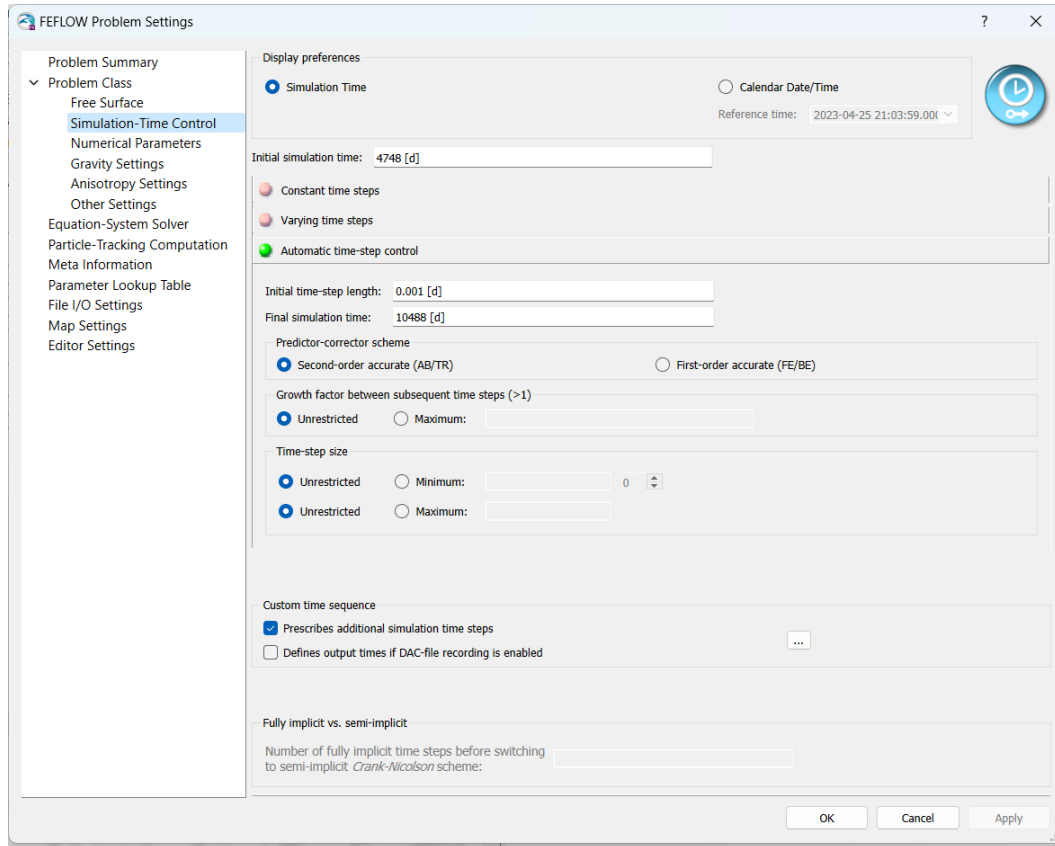


Figura 35. Ajustes de tiempo de simulación.

5.2.4 Propiedades hidrogeológicas

Los valores iniciales de las propiedades hidráulicas iniciales fueron los reportados por (León, 2020), y calibrados mediante el ajuste manual de estos, a prueba y error hasta lograr un buen ajuste; los parámetros calibrados fueron; conductividad hidráulica, rendimiento específico y porosidad. Se consideró la conductividad hidráulica en la dirección x equivalente a la conductividad hidráulica en dirección y (horizontales); y la conductividad hidráulica en z (vertical) un orden de magnitud menor a estas dos. Los valores iniciales de los parámetros hidrogeológicos fueron tomados del trabajo de León

(2020) y manipulados hasta lograr una calibración aceptable en términos del NRMS (menor al 10%).

5.2.5 Condiciones de frontera

Extracción por pozos multicapa.

Para la asignación de los pozos de bombeo se utilizó la base de datos del Registro Público de Derechos del Agua, el cual reportaba para la Región Centro-Sur un total de 1714 aprovechamientos (pozos concesionados y alumbrados libremente), sin embargo, fue imposible implementar ese número de pozos, ya que al ubicar cada uno de ellos en un nodo, la malla del modelo numérico se construía con elementos muy pequeños y por ende por más de 12,000 nodos, por lo tanto, el tiempo de cómputo necesario no era factible. Dado lo anterior, se agruparon los pozos en sitios de extracción equivalentes en un radio no mayor a 100 m de distancia, por lo cual el número de pozos en el modelo fue pasó de 1714 a 668, los cual en su conjunto representaron el mismo efecto de extracción que los pozos originales, ver Figura 36. Pozos de extracción en el modelo.

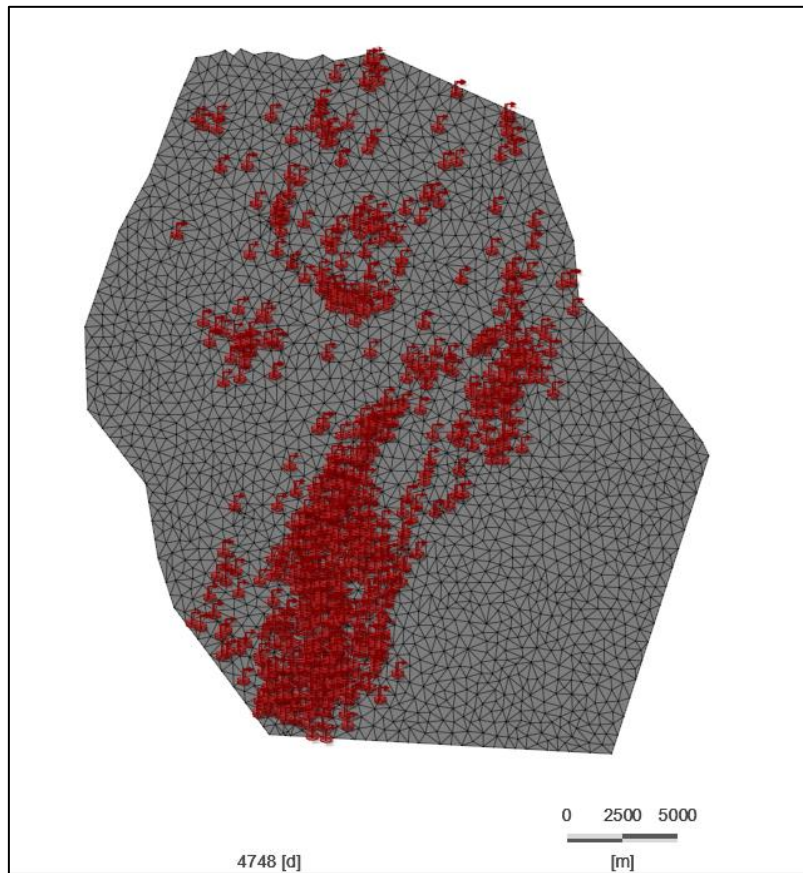


Figura 36. Pozos de extracción en el modelo.

Entradas por flujo subterráneo.

Se consideraron dos entradas por flujo subterráneo en el modelo, una ubicada al Noroeste y otra al Sur del dominio, estas se establecieron con base en el análisis de las isólineas de elevación del nivel freático, de la evolución de la calidad del agua subterránea y de estudios previos realizados por (CONAGUA,2020). Estas condiciones de frontera fueron de segundo orden o tipo Neumann; con valores de $4.3e-7$ y $5e-7$ m/s respectivamente; generando un volumen de entrada al modelo del orden de $273,894.8$ m³/día. Este volumen implementado fue mayor al estimado para el balance hídrico del capítulo 3; y esto se justifica numéricamente ya que, si el volumen ingresado por la condición de frontera no resultaba significativamente al volumen de extracción por los pozos, los niveles se abatían en exceso, provocando que no se lograra una calibración del modelo, ver Figura 37.

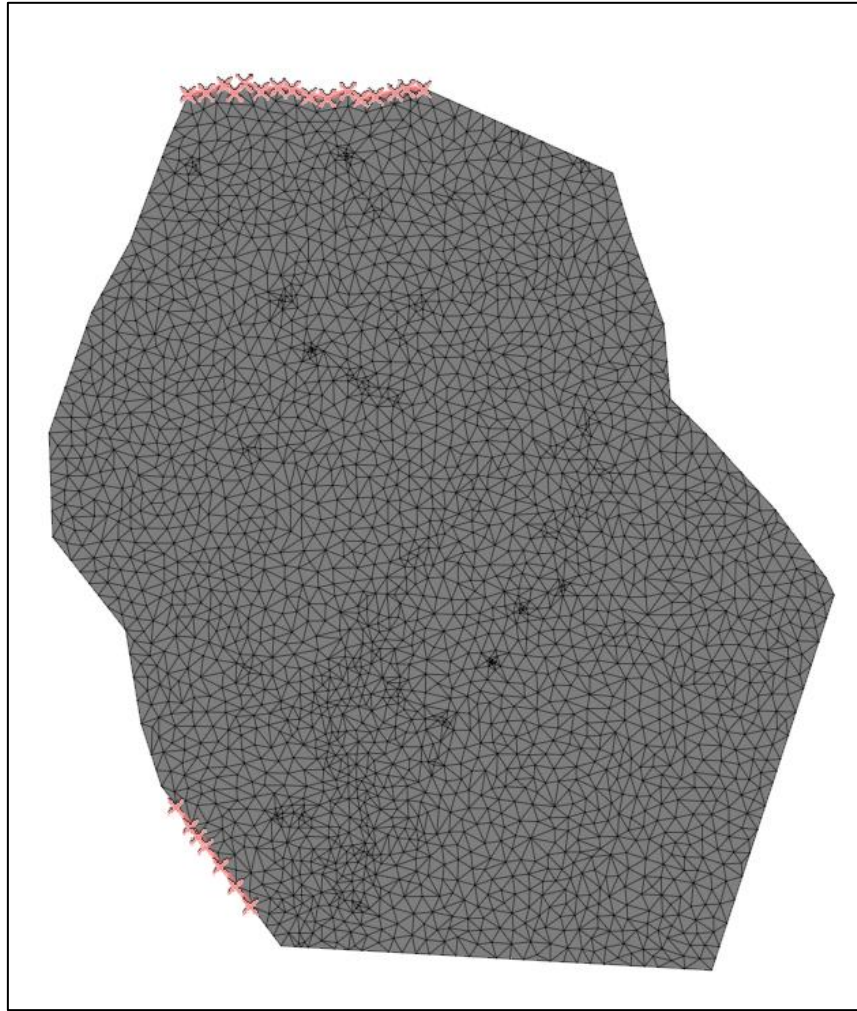


Figura 37. Entradas por flujo subterráneo.

5.2.6 Pozos de observación

Como resultado de los censos de aprovechamiento realizados por (León, 2020) en los años 2017 y 2017; y el recorrido de marzo de 2023; se asignó en la primera capa del modelo los diferentes pozos de observación con sus respectivas mediciones en distintas fechas. Para los años 2017, 2019 y 2023 se analizaron 36, 35 y 19 pozos de observación, respectivamente, ver Figura 38.

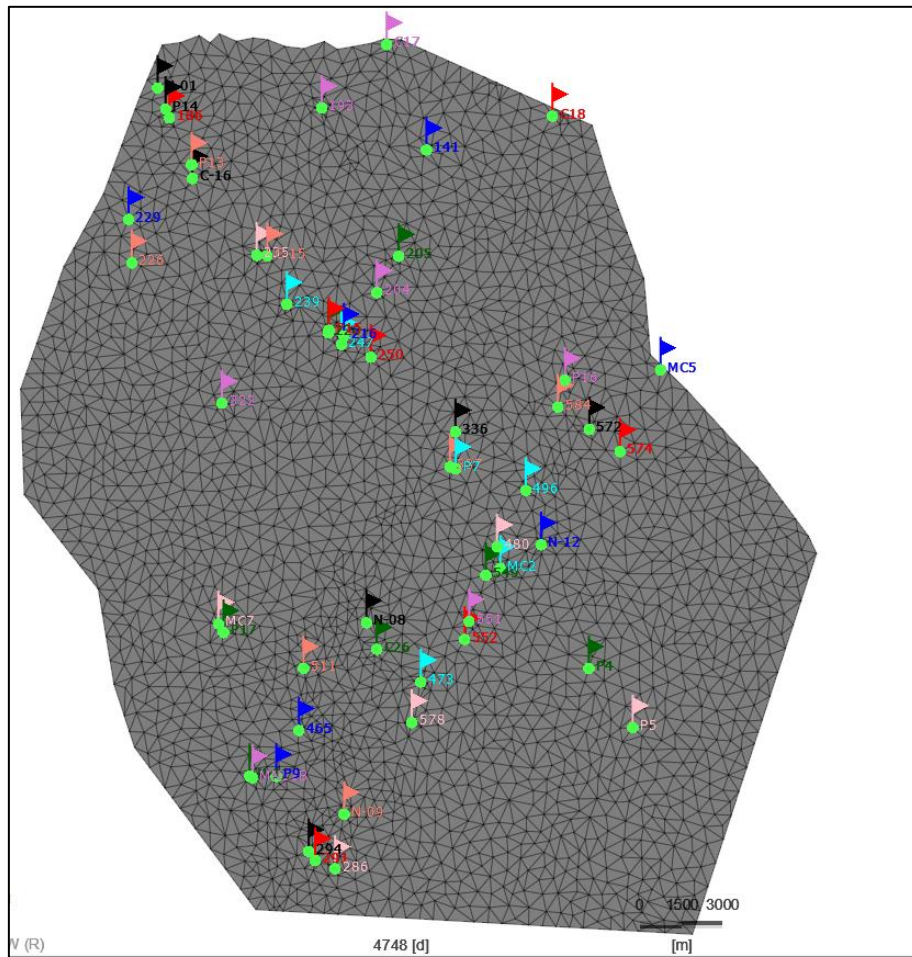


Figura 38. Pozos de observación.

5.3 Calibración del modelo numérico

El objetivo de la calibración de un modelo numérico es 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. Es un proceso de prueba y error y constituye la parte fundamental del proceso de modelado, tiene como fin demostrar que el modelo es capaz de representar simplificada la realidad.

5.3.1 Cargas hidráulicas

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

$h_m = \text{carga hidráulica modelada}$

$h_s = \text{carga hidráulica medida}$

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:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{h_m \max - h_m \min}$$

En el proceso de calibración, se buscó un valor de NRMSE por debajo del 10%, con el objetivo de que el 90% de los pozos estudiados representará en buena medida la realidad.

Se utilizaron los valores de carga hidráulicas medidas en 2017 y 2019 para calibrar el modelo (Figura 32 y 33), y las mediciones de 2023 para validarlo, es decir, para confirmar si el modelo calibrado con dos fechas era capaz de simular el año 2023, sin una manipulación de 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 esperarían ambos conjuntos de datos ajustaría a una recta de 45°.

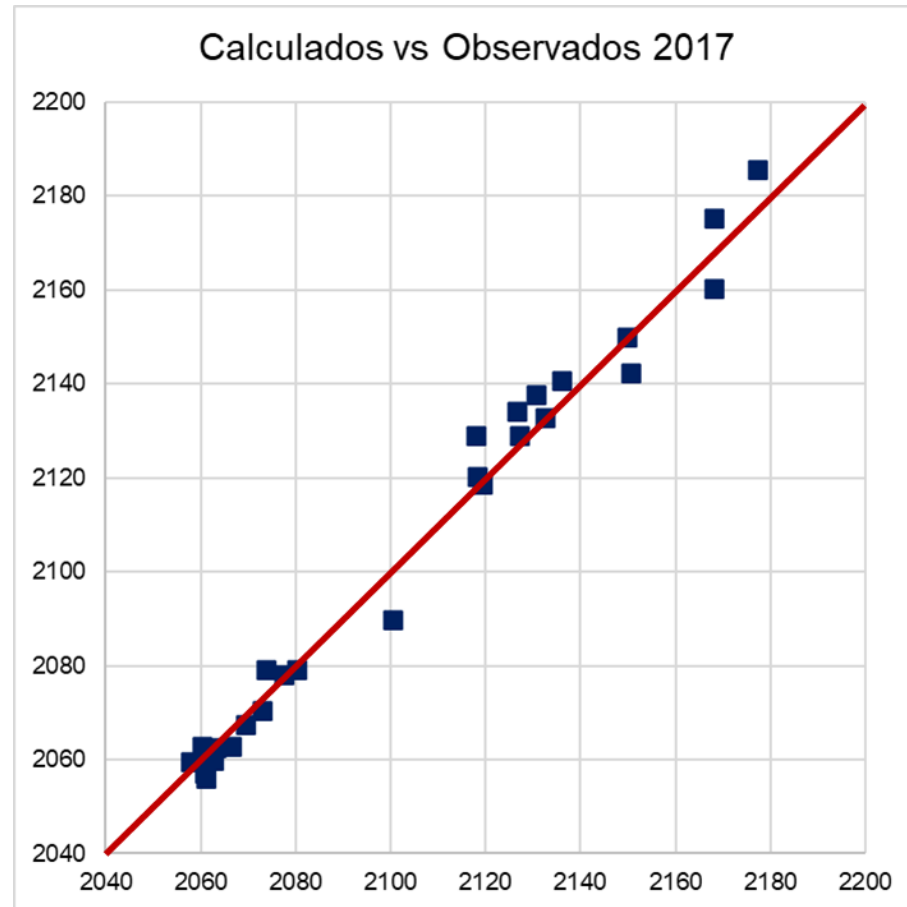


Figura 39. Comparación de datos simulados y datos medidos para el año 2017.

Como se observa en la Figura 39, el modelo ajusta para el año 2017 con un NRMSE del 3.87 % y un error absoluto de 4.72 metros.

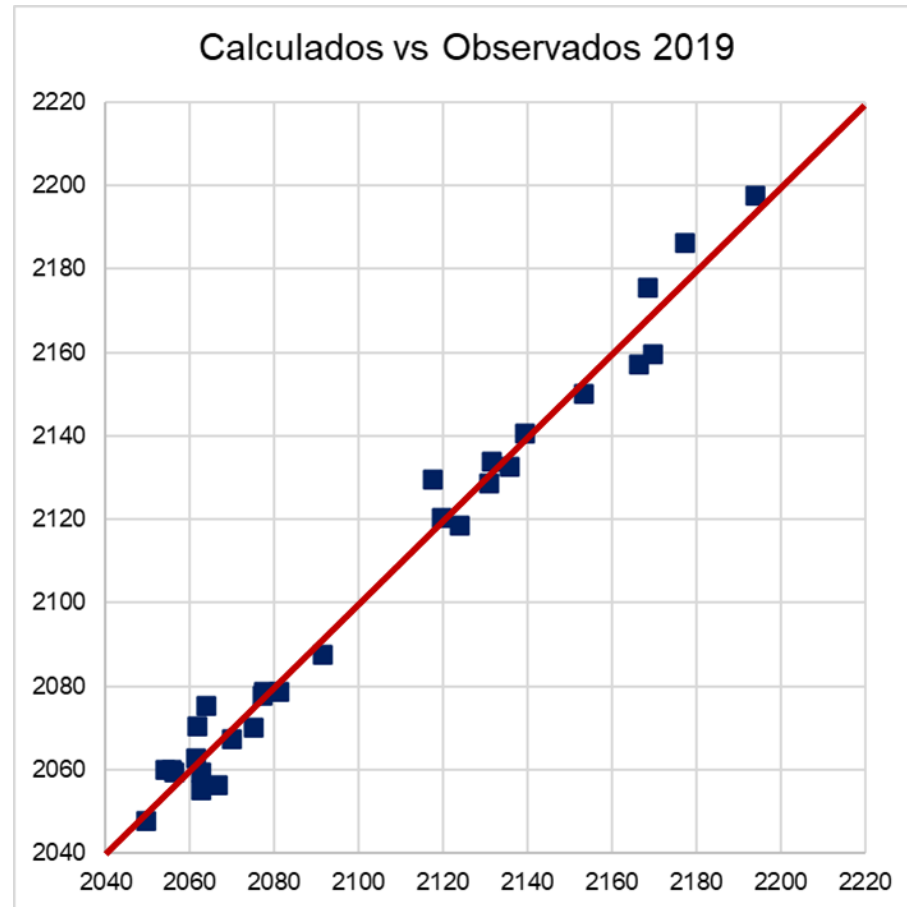


Figura 40. Comparación de datos simulados y datos medidos para el año 2019.

Como se observa en la Figura 40, el modelo ajusta para el año 2019 con un NRMSE del 5.19 % y un error absoluto de 5.08 metros.

Posteriormente, para el proceso de validación con los datos del año 2023, se tiene un NRMSE del 7.65% y un error absoluto de 4.45 metros ver Figura 41. En el periodo de calibración se logró el objetivo de contar con un modelo numérico calibrado con un error promedio del 6% que se traduce en un error de 5 m, lo cual es aceptable considerando los gradientes hidráulicos de la zona y los cambios en la topografía.

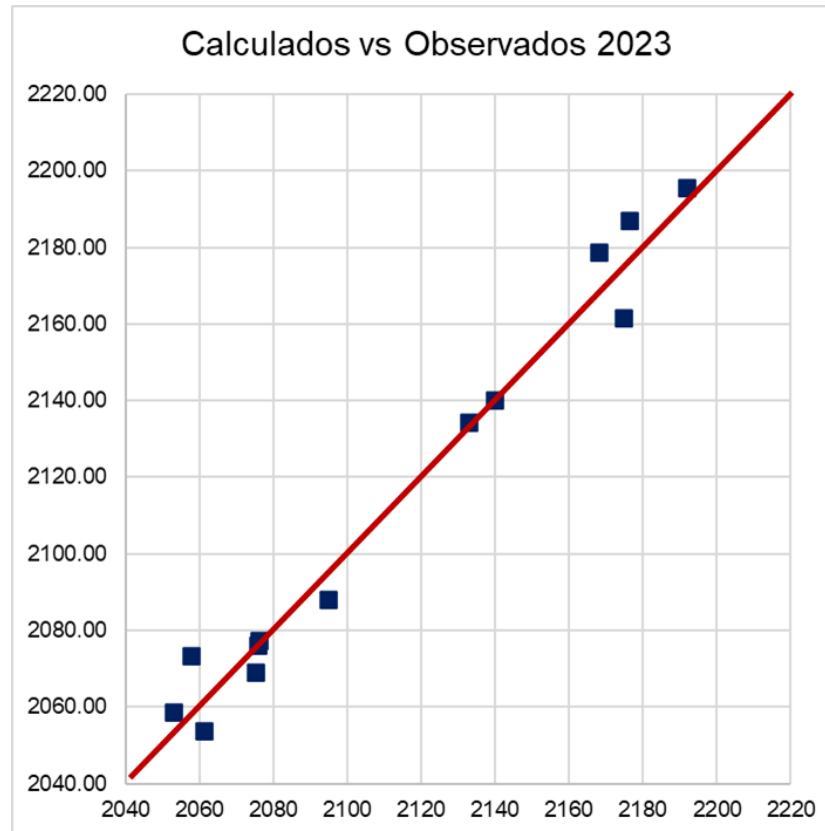


Figura 41. Validación del modelo para el 2023.

5.3.2 Balance hídrico

Otro punto para considerar en 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 28.

Tabla 28. Comparativo entre volúmenes modelados y estimados

Día	Estimado		Modelado	
	Entrada flujo por flujo subterráneo (m3/d)	Extracción por bombeo	Entrada flujo por flujo subterráneo (m3/d)	Extracción por bombeo
8390 (2017)	135,208.35	134,412.46	256,436.00	133,401.94
8985 (2019)	152,055.00	135,660.31	256,415.00	134,779.90
10488 (2023)	151,234.50	135,660.31	256,237.00	136,860.50

Como se observa en la Tabla 28, el volumen de extracción por bombeo modelado es coincidente con el simulado, sin embargo, para las entradas por flujo subterráneo el volumen modelado es mayor al estimado mediante la Ley de Darcy; esto se explica debido a que las entradas en el modelo deben superar las salidas, de lo contrario los niveles se abatían significativamente y, por lo tanto, no se lograba un buen ajuste.

El arreglo matemático que produce una buena calibración para el modelo para cada uno de los medios geológico quedó definido como se muestra en la Tabla 29 y agrupados en términos de sus propiedades hidrogeológicas. Así mismo, se muestra en las Figuras 43 a 47 los mapas de conductividad hidráulica en dirección x en las diferentes capas del modelo numérico; recordando que la conductividad en x es igual la conductividad en y, y éstas diez veces mayor que la conductividad en dirección vertical.

Tabla 29. Propiedades hidrogeológicas calibradas

Clave	Kx= Ky (m/d)	Kz (m/d)	n	Ss	Unidad	Condición	Descripción	Layer
QptB-TB	4.3322	0.4332	0.0010	0.0010	1	Medio permeable/medianamente permeable	BASALTO TOBA BASALTICA	1,2,3,4,5
Qhola	0.0053	0.0005	0.0200	0.0010	2	Medio con muy baja permeabilidad	LACUSTRE	1,2,3,4,5
Peñón Blanco	0.0010	0.0001	0.0100	0.0010	2	Medio con muy baja permeabilidad	GRANITO	1,2,3,4,5
ToR-TR	4.3281	0.4328	0.0010	0.0010	3	Medio permeable/medianamente permeable	RIOLITA TOBA RIOLITICA	1,2,3,4,5
ToBvR- TR	2.1780	0.2178	0.0010	0.0010	3	Medio permeable/medianamente permeable	BRECHA RIOLITICA TOBA RIOLITICA	1,2,3,4,5
TeoCgp	3.2670	0.3267	0.3000	0.0010	4	Medio permeable	CONGLOMERADO POLIMICTICO	1,2,3,4,5
TplQptAr- Cgp	4.4463	0.4446	0.4700	0.0090	4	Medio permeable	ARENISCA CONGLOMERADO POLIMICTICO	1,2,3,4,5
Qhoal	3.7679	0.3768	0.3000	0.0010	4	Medio permeable	ALUVION	1,2,3,4,5
Arcillas	0.1089	0.0109	0.3000	0.0010	5	Medio permeable	RELLENO SEDIMENTARIO CON ARCILLAS	1,2,3,4,5
Cz-Lu	5.4450	0.5445	0.0500	0.0010	6	Medio medianamente permeable/baja permeabilidad	CALIZA LUTITA	1,2,3,4,5
KbeAr-Lu	2.1641	0.2164	0.1000	0.0007	6	Medio medianamente permeable/baja permeabilidad	ARENISCA LUTITA	1,2,3,4,5
KbeAr-Cz	2.0137	0.2014	0.1000	0.0010	6	Medio medianamente permeable/baja permeabilidad	ARENISCA CALIZA	1,2,3,4,5
KseAr-Lu	2.0126	0.2013	0.1000	0.0010	6	Medio medianamente permeable/baja permeabilidad	ARENISCA LUTITA	1,2,3,4,5
KtCz-Lm	2.0126	0.2013	0.0300	0.0010	6	Medio medianamente permeable/baja permeabilidad	CALIZA LIMOTITA	1,2,3,4,5

En términos de la conductividad hidráulica y de acuerdo con la Tabla 29, se observa que no existen diferencias importantes entre los valores calibrados de las diferentes unidades hidrogeológicas, a excepción de las unidades 2 y 5 (medios arcillosos) que resultaron uno y dos órdenes de magnitud menores a los valores de conductividad

correspondientes a las unidades 1,3,4 y 6, respectivamente (Figura 42). Sin embargo, en cuestión de los valores de porosidad (n) si existen diferencias importantes, ya que los medios catalogados como permeables mostraron valores entre los 0.30 y 0.47, mientras que los medios con baja permeabilidad hasta porosidad de 0.001. Con respecto a los valores de almacenamiento, se obtuvieron valores característicos de un acuífero confinado, entre los 0.0007 y 0.0010. Con respecto a valores teóricos de conductividad, las unidades 1,3,4 y 6 pudieran relacionarse a arenas limpias o arenas sedimentarias, la unidad 5 corresponde teóricamente a limos o rocas ígneas y finalmente la unidad 2 a rocas calizas o dolomitas.

Tabla 30. Comparativo entre las conductividades obtenidas y las reportadas por León 2020.

Clave	Kx (m/d)	n	Ss	Unidad	Kx (m/d) León 2020	n León 2020	Relación Kx/Kx León
QptB-TB	4.3322	0.001	0.0010	1	4.1299	0.20	105%
Qhola	0.0053	0.020	0.0010	2	0.0048	0.55	109%
Peñón Blanco	0.0010	0.010	0.0010	2	0.0048	0.55	20%
ToR-TR	4.3281	0.001	0.0010	3	3.9744	0.10	109%
ToBvR-TR	2.1780	0.001	0.0010	3	3.9744	0.10	55%
TeoCgp	3.2670	0.300	0.0010	4	4.5792	0.40	71%
TplQptAr-Cgp	4.4463	0.470	0.0090	4	4.5792	0.40	97%
Qhoal	3.7679	0.300	0.0010	4	4.5792	0.40	82%
Arcillas	0.1089	0.300	0.0010	5	4.4150	0.38	2%
Cz-Lu	5.4450	0.050	0.0010	6	1.8481	0.20	295%
KbeAr-Lu	2.1641	0.100	0.0007	6	1.8481	0.20	117%
KbeAr-Cz	2.0137	0.470	0.0010	6	1.8481	0.20	109%
KseAr-Lu	2.0126	0.100	0.0010	6	1.8481	0.20	109%
KtCz-Lm	2.0126	0.030	0.0010	6	1.8481	0.20	109%

En la Tabla 30, se presenta un comparativo entre los valores de conductividad hidráulica obtenidos en el presente trabajo y los reportados en el modelo numérico previo, se calculó una relación entre ambos a fin de compararlos, como se observa, para las unidades 1,2,3,4 y 6, los resultados son muy similares con una relación casi de 1; sin embargo, es importante mencionar que algunos estratos de esas mismas unidades presentan relaciones diferentes de uno, esto se explica ya que a pesar de que se agruparon los medios en unidades, no necesariamente tienen las mismas propiedades hidráulicas, estas pueden diferir por sus condiciones de compactación. La unidad 5 si presentó un valor de un orden de magnitud menor con respecto al del modelo previo.

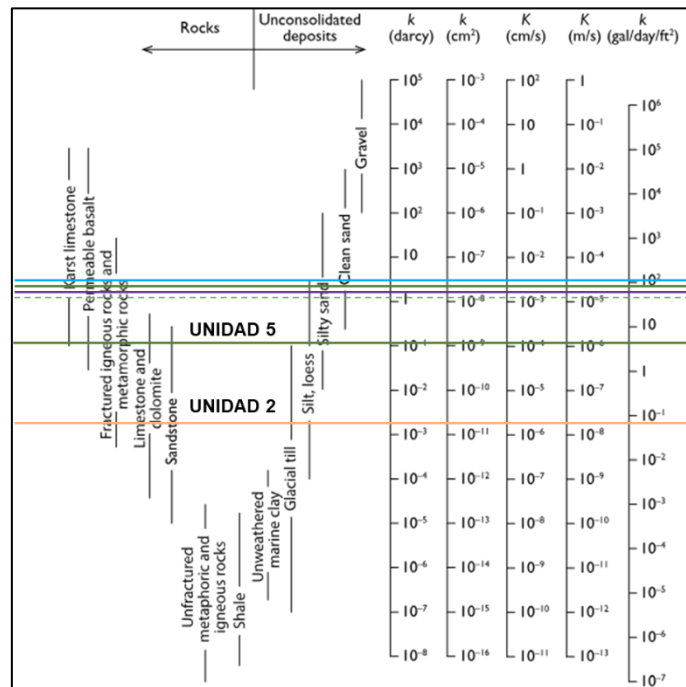


Figura 42. Comparación de valores de conductividad calibrados con valores teóricos.

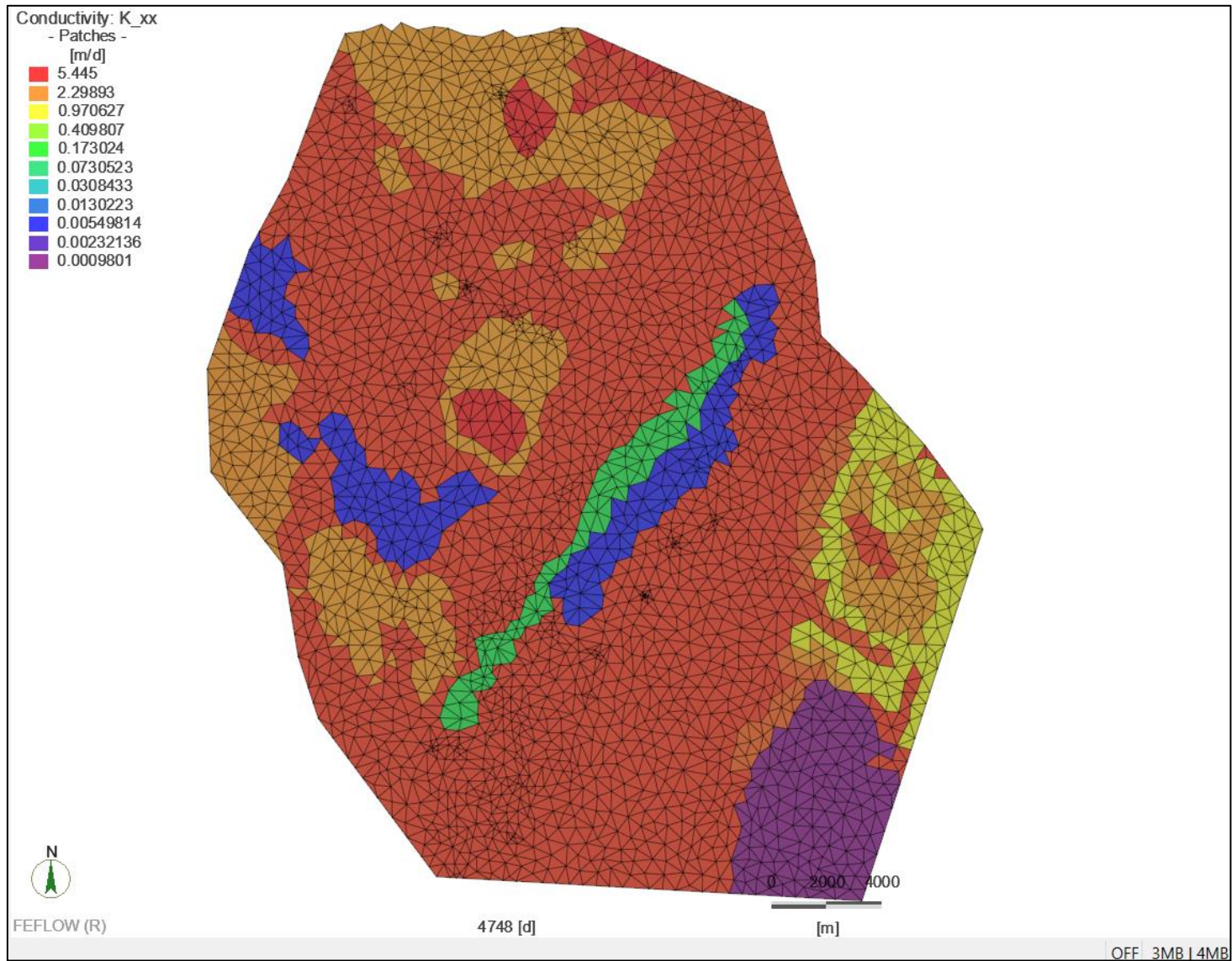


Figura 43. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 1.

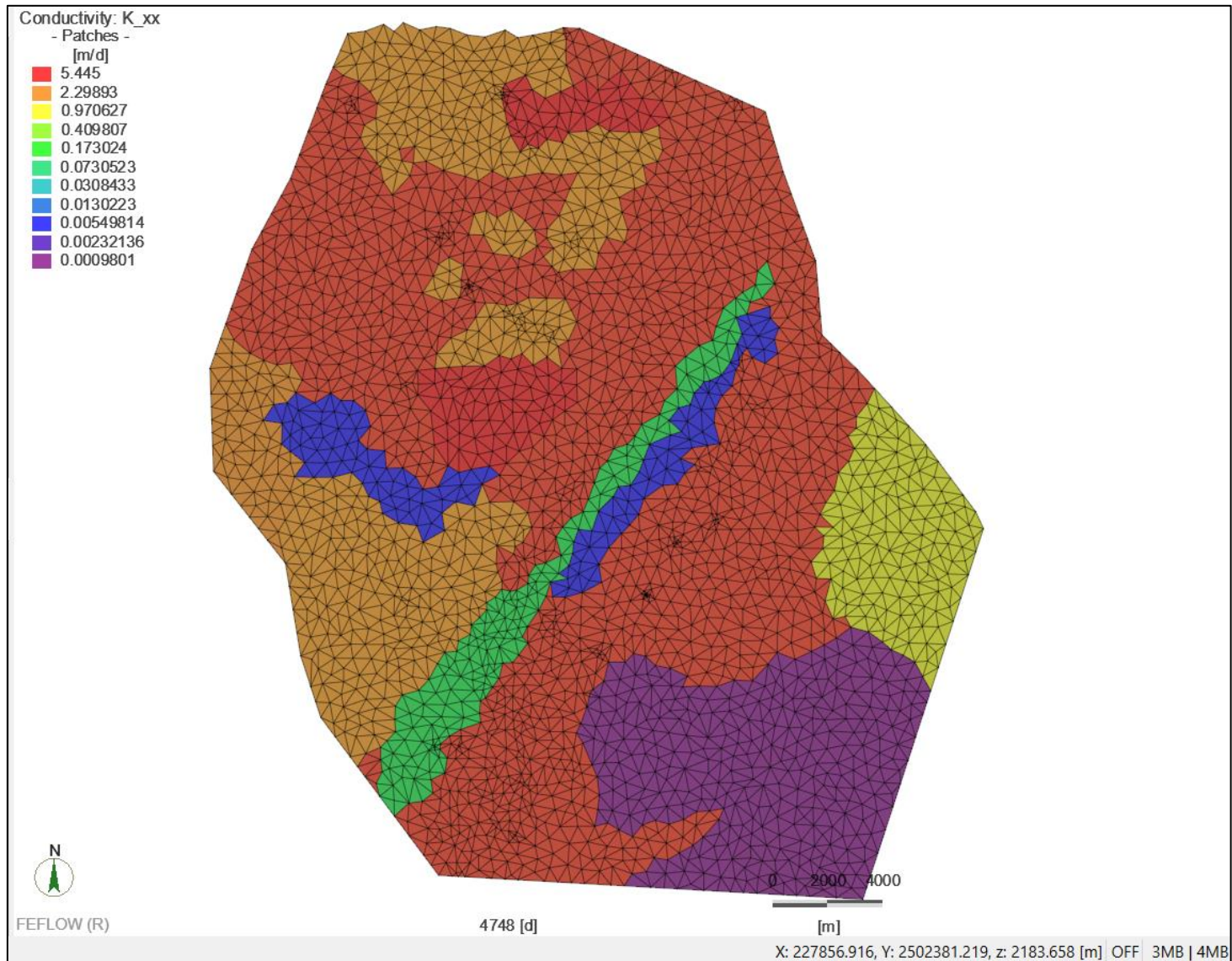


Figura 44. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 2.

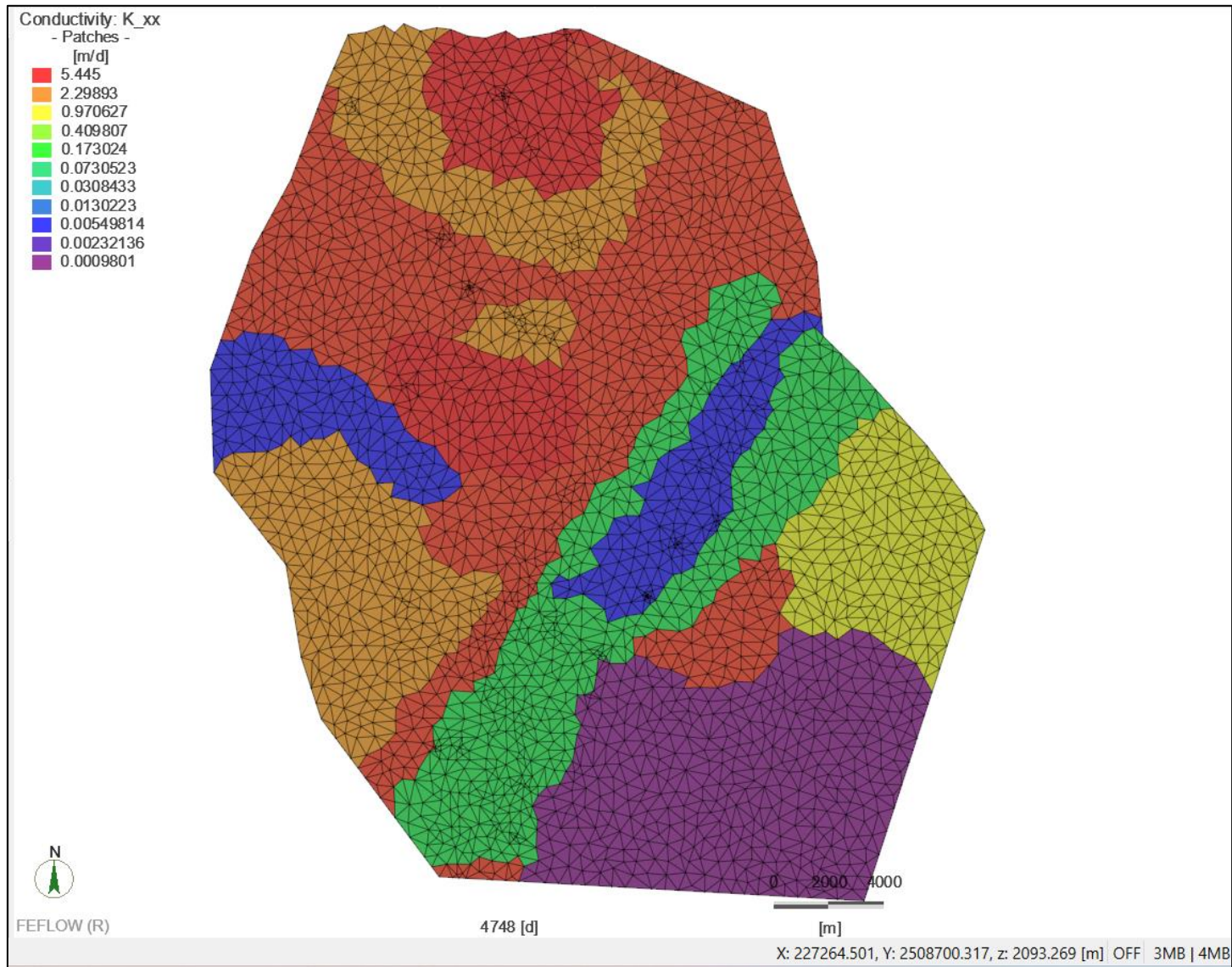


Figura 45. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 3.

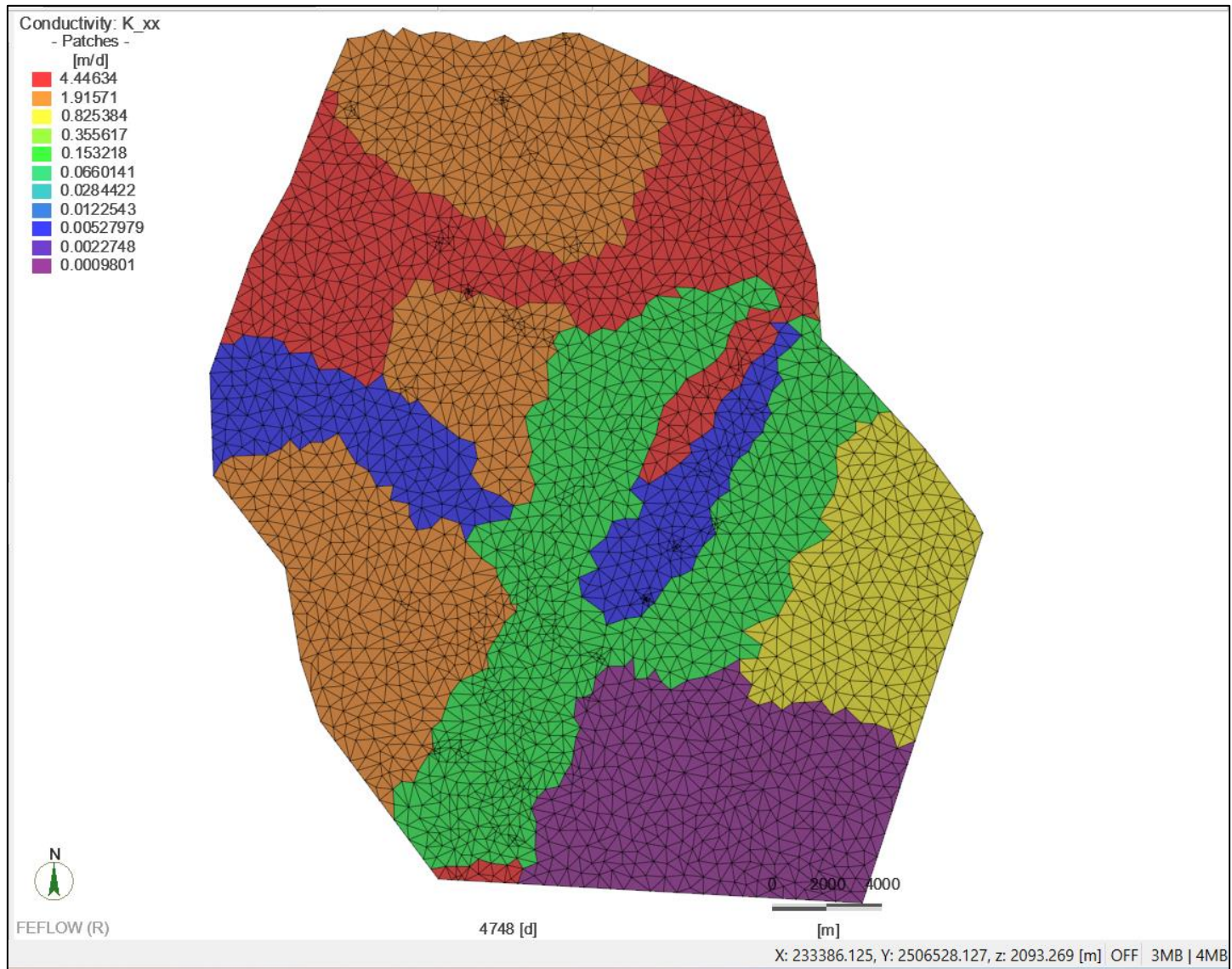


Figura 46. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 4.

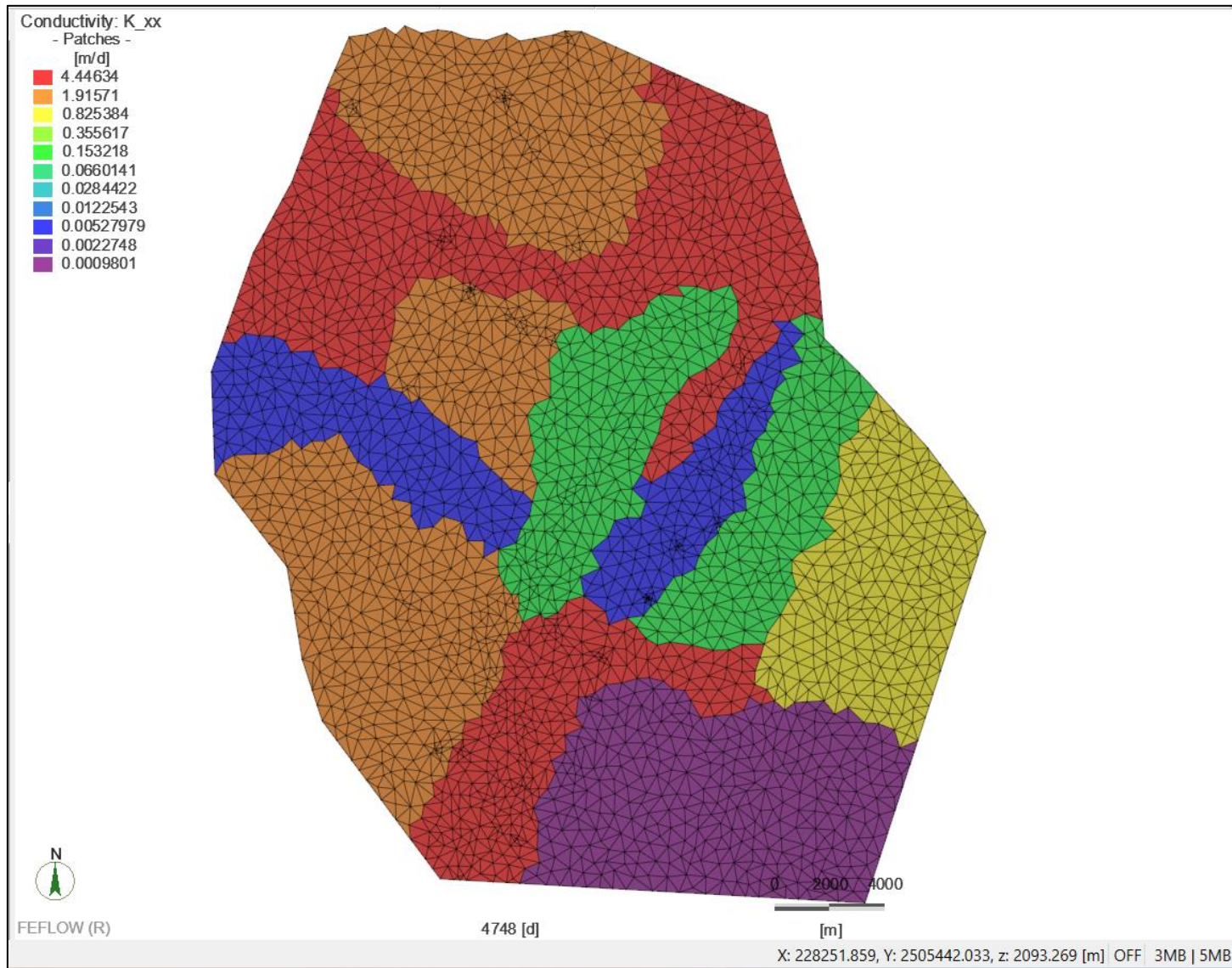


Figura 47. Conductividad hidráulica en dirección X, capa 5.

5.3.3 Análisis de sensibilidad

La implementación del análisis de sensibilidad tiene como objetivo estudiar el comportamiento de las salidas del modelo ante la manipulación de los parámetros de entrada. Calibrado el modelo numérico para los años 2017 y 2019, y validado con los datos del 2023, 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 mostradas en la Tabla 29; incrementándolos desde 120 a 160 % y disminuyéndolos desde 80 hasta 120%; seguidamente se evaluó el comportamiento del modelo en términos del NRMS (Figura 48).

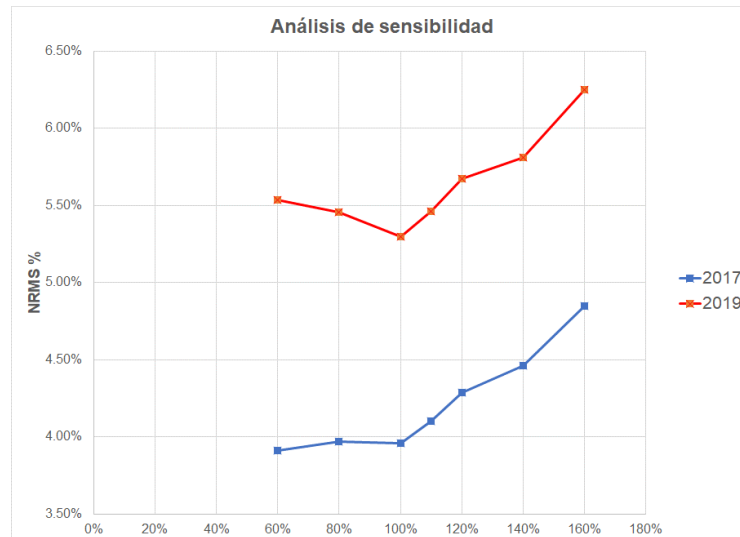


Figura 48. Análisis de sensibilidad.

De acuerdo con la Figura 48 se obtuvo que, al incrementar y disminuir los valores de la conductividad hidráulica, el modelo responde a la manipulación de los parámetros de entrada, ya que se incrementó el NRMS, y, por lo tanto, disminuyó la calidad de la calibración.

6.- Evaluación ante los escenarios actual y futuros

Una vez se ha calibrado el modelo numérico, se implementaron cuatro escenarios de modelación a la Región Centro-Sur del Acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, esto con el objetivo de evaluar el comportamiento de los niveles del agua subterránea hacia futuro proyectando los sistemas de flujo hasta el año 2038, es decir, 16 años hacia el futuro, ya que el modelo fue calibrado con 16 años de registros (desde 2007 a 2023). A continuación, se describe cada escenario con sus respectivos resultados.

6.1 Escenario 1: Condiciones actuales sin cambios hasta 2038 (actual)

Para este escenario se utilizó el modelo numérico calibrado y cuyos volúmenes de extracción fueron incrementados en 15%, y se proyectaron asumiendo que estos volúmenes serán se mantendrán constantes hasta el año 2038, ya que de acuerdo con el último estudio de disponibilidad y administrativamente en la región no se tiene un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones.

6.1.1 Resultados Escenario 1: Condiciones actuales sin cambios hasta 2038

Elevación y dirección del nivel freático bajo el escenario 1

De acuerdo con la Figura 49, se observa que los niveles del agua subterránea fluctúan entre 2025 y 2228 msnm; con dirección preferencial desde las zonas topográficamente altas hacia la zona del Valle de Salinas, y se mantienen las entradas por flujo horizontal al norte y sur de la región de estudio; las menores elevaciones corresponden a la zona con mayor densidad de extracciones y las direcciones de flujo no presentan cambios significativos con respecto a las condiciones actuales, sin embargo, en la Figura 50 se muestran los cambios en términos de la elevación del nivel freático entre el periodo 2023 a 2038.

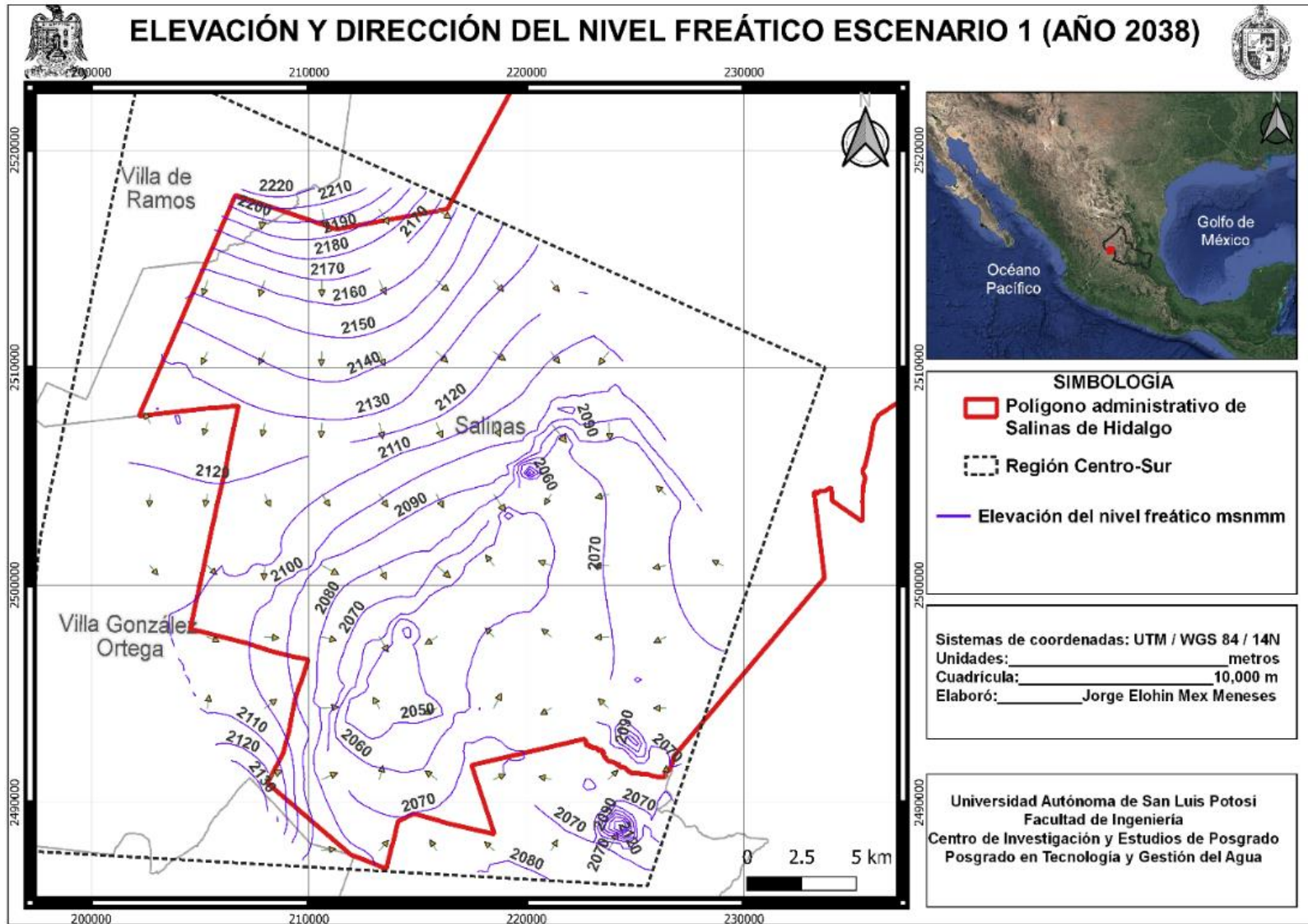


Figura 49. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 1.

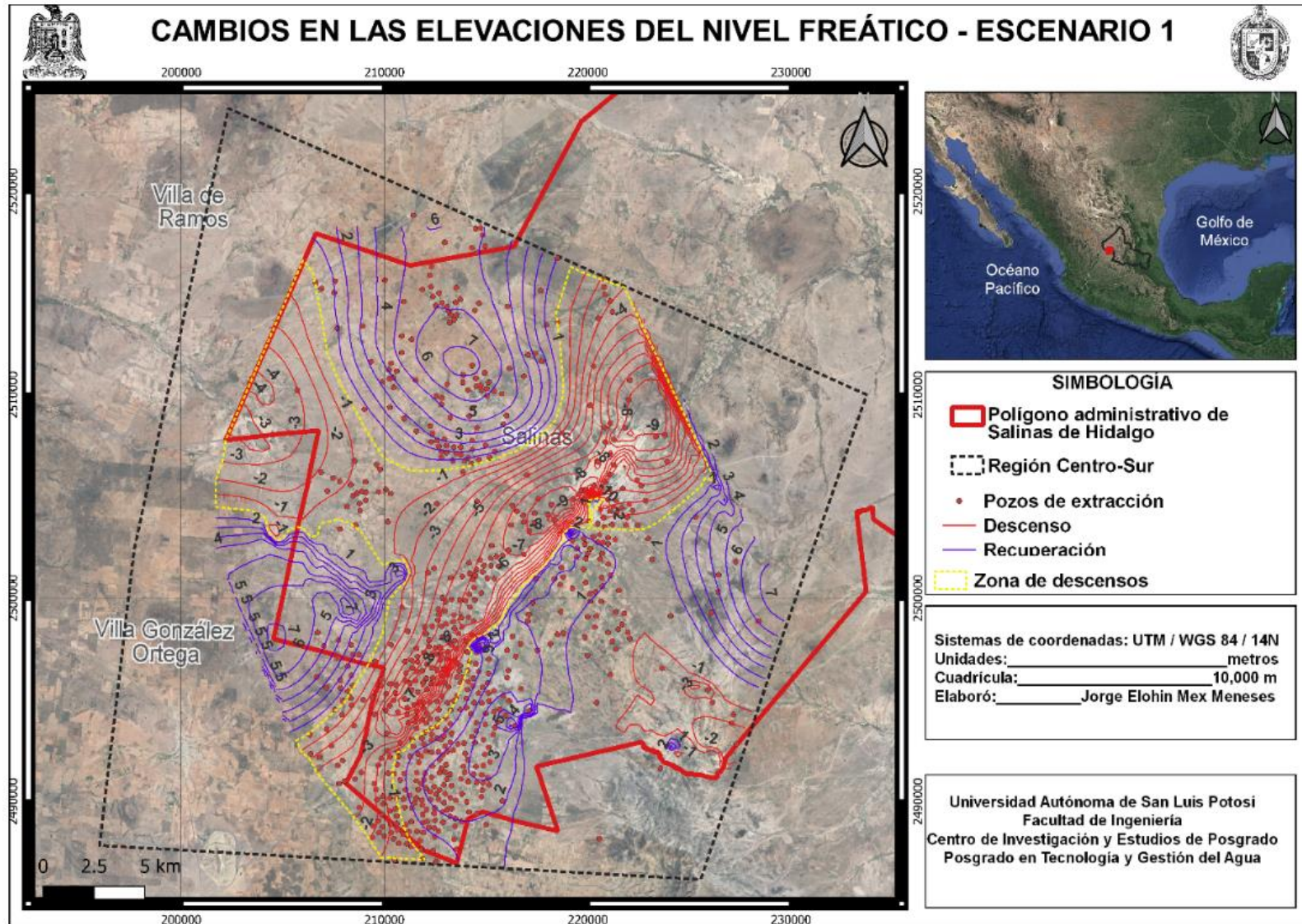


Figura 50. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 1.

En la Figura 50, se enmarcó en la figura irregular color amarillo la zona que presenta los mayores abatimientos, como se observa, estos llegan a ser desde los 0.02 hasta los de 50.53 metros, y en promedio de 14.40 m con respecto a los niveles del año 2023 y coinciden con la zona de mayor presencia de pozos.

Tabla 31. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 1

Día	Entrada por flujo horizontal (m³/día)	Extracción por bombeo (m³/día)
10488 (2023)	256,237.7	136,860.5
10958 (2024)	256,169.7	136,860.5
11323 (2025)	256,112.5	136,860.5
11688 (2026)	256,053.6	136,860.5
12053 (2027)	255,995.5	136,860.5
12419 (2028)	255,937.6	136,860.5
12784 (2029)	255,345.5	136,860.5
13149 (2030)	255,800.0	136,860.5
13514 (2031)	255,744.4	136,860.5
13880 (2032)	255,690.8	136,860.5
14245 (2033)	255,638.1	136,860.5
14610 (2034)	255,586.6	136,860.5
14975 (2035)	254,176.8	136,860.5
15341 (2036)	255,485.2	136,860.5
15706 (2037)	255,438.3	136,860.5
16071 (2038)	255,394.7	136,860.5

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 31 se tiene un decrecimiento de las entradas por flujo horizontal, al pasar de 256,237.7 a 255,394.7 m³/día para los años 2023 y 2038 respectivamente; es decir, una reducción de 843 m³/día en el periodo analizado.

6.2 Escenario 2: Condiciones oficiales sin cambios hasta 2038 (actual oficial)

Para este escenario se utilizó el modelo numérico calibrado y los volúmenes de extracción reportados en el REPDA y se proyectó asumiendo que estos volúmenes se mantendrán constantes hasta el año 2038, ya que administrativamente en la región no se tiene un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones.

6.2.1 Resultados Escenario 2: Condiciones oficiales sin cambios hasta 2038

Elevación y dirección del nivel freático bajo el escenario 2

De acuerdo con la Figura 51, se observa que los niveles del agua subterránea fluctúan entre 2028 y 2228 msnm; con dirección preferencial desde las zonas topográficamente altas hacia la zona del Valle de Salinas, y confirman las entradas por flujo horizontal al norte y sur de la región de estudio; las menores elevaciones corresponden a la zona con mayor densidad de extracciones y las direcciones de flujo no presentan cambios significativos con respecto a las condiciones actuales, sin embargo, en la Figura 52 se muestran los cambios en términos de la elevación del nivel freático entre el periodo 2023 a 2038

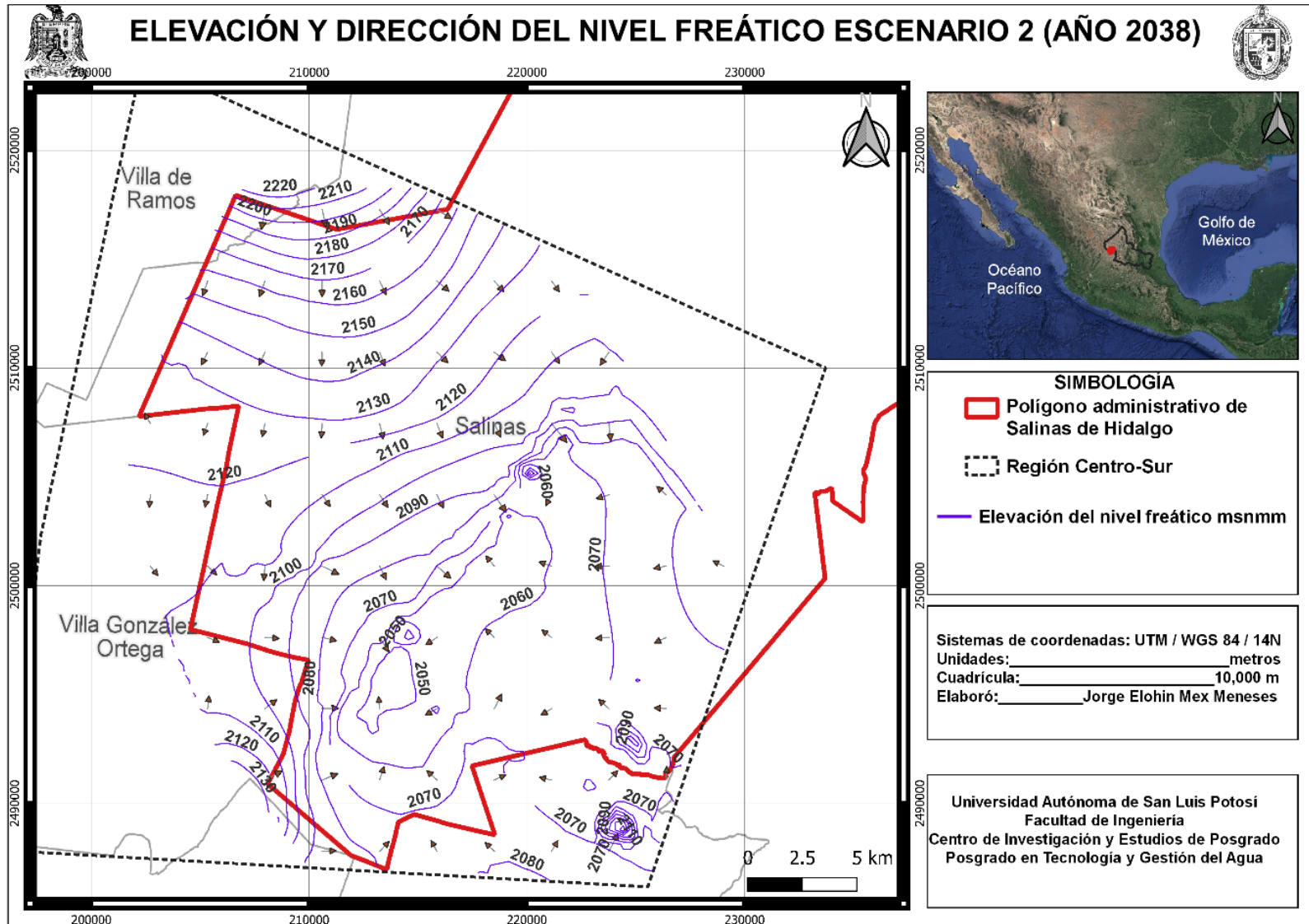


Figura 51. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 2.

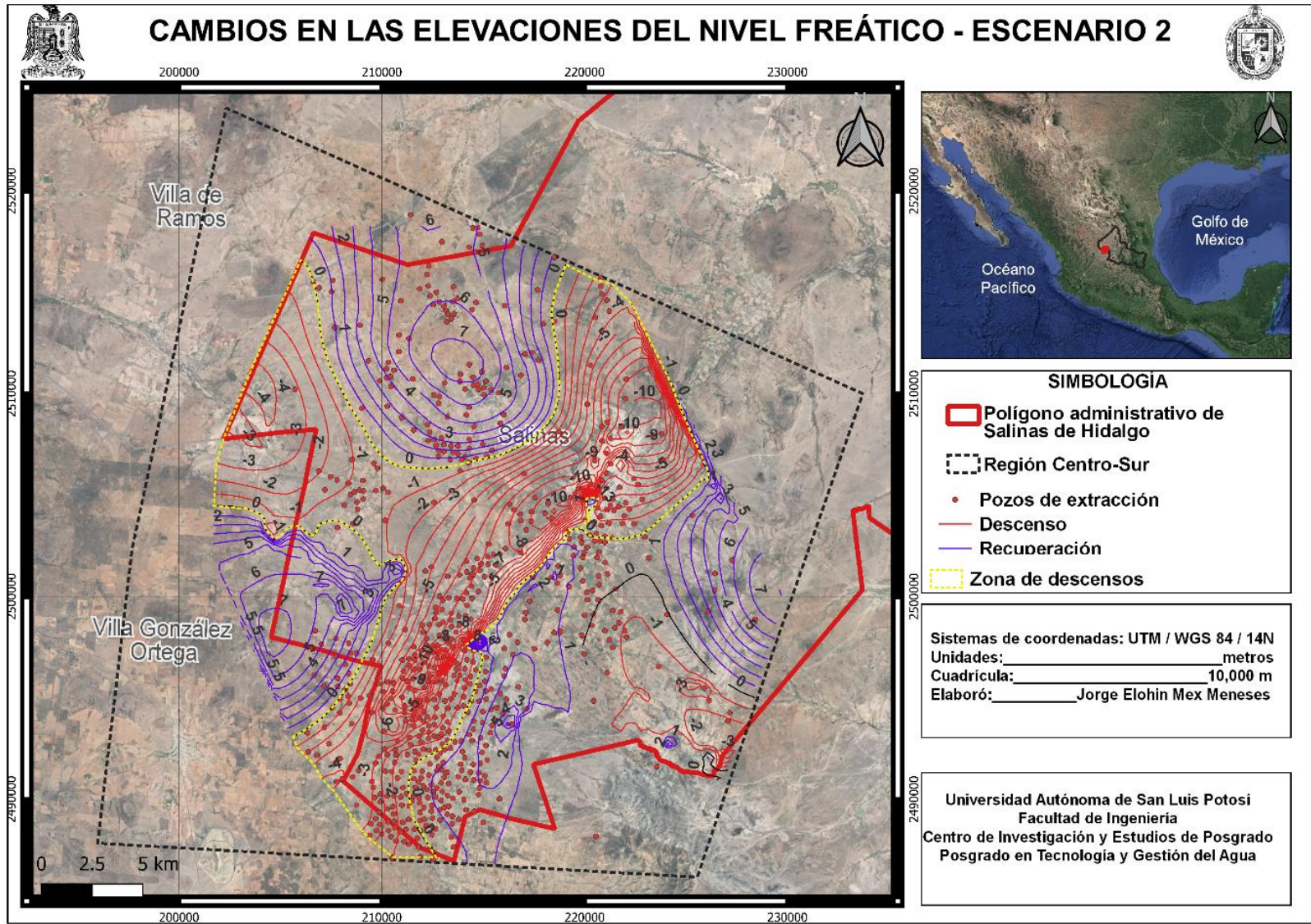


Figura 52. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 2.

En la Figura 52, se enmarcó en la figura irregular color amarillo la zona que presenta los mayores abatimientos, como se observa, estos llegan a ser desde los 0.02 hasta los de 53.77 metros, y en promedio de 14.35 m con respecto a los niveles del año 2023 y coinciden con la zona de mayor presencia de pozos.

Tabla 32. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 2

Día	Entrada por flujo horizontal (m ³ /día)	Extracción por bombeo (m ³ /día)
10488 (2023)	256,267.4	119,009.2
10958 (2024)	256,199.6	119,009.2
11323 (2025)	256,143.4	119,009.2
11688 (2026)	256,086.5	119,009.2
12053 (2027)	256,030.8	119,009.2
12419 (2028)	256,014.9	119,009.2
12784 (2029)	255,903.6	119,009.2
13149 (2030)	255,843.5	119,009.2
13514 (2031)	255,792.0	119,009.2
13880 (2032)	255,742.1	119,009.2
14245 (2033)	255,693.0	119,009.2
14610 (2034)	255,645.3	119,009.2
14975 (2035)	255,597.2	119,009.2
15341 (2036)	255,551.4	119,009.2
15706 (2037)	255,509.8	119,009.2
16071 (2038)	255,469.3	119,009.2

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 32 se tiene un decrecimiento de las entradas por flujo horizontal, al pasar de 256,267.4 a 255,469.3 m³/día para los años 2023 y 2038 respectivamente; es decir, una reducción de 798.1 m³/día en el periodo analizado.

6.3 Escenario 3: Condiciones actuales proyectadas hasta 2038 (futuro)

Para este escenario se utilizó el modelo numérico calibrado y cuyos volúmenes de extracción oficiales fueron incrementados en 15%, seguidamente se proyectaron los

sistemas de flujo asumiendo que los volúmenes de extracción se incrementarán tendencialmente hasta el año 2038, para la implementación de la tendencia, se analizó el comportamiento de los volúmenes oficiales desde 1994 a 2021 (Figura 53), en el cual se identificaron dos tendencias, y para este escenario 3 se utilizó la identificada entre 2015 y 2021, ya que en este periodo la pendiente es menos pronunciada.

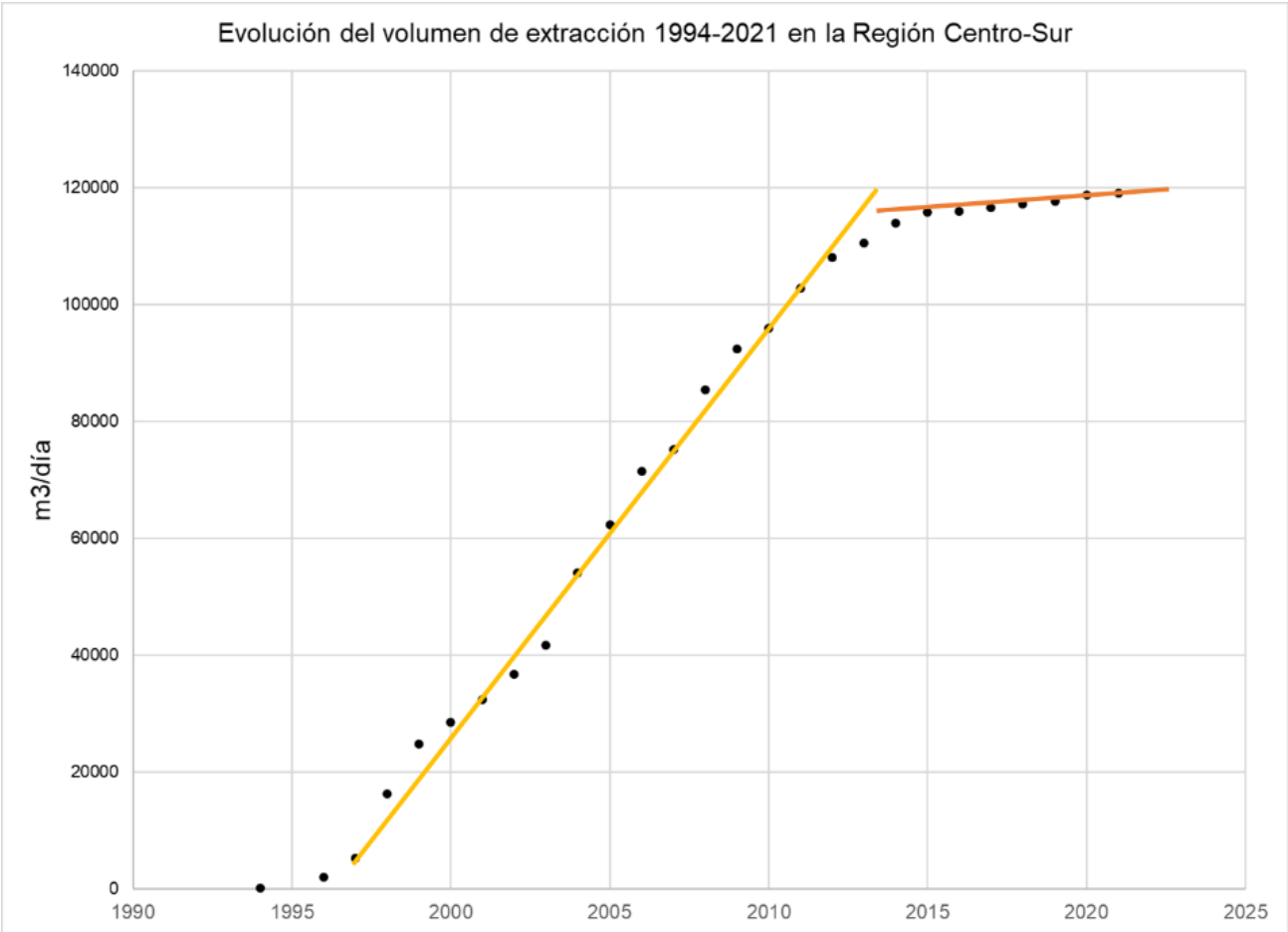


Figura 53. Evolución del volumen de extracción Región Centro-Sur.

6.3.1 Resultados Escenario 3: Condiciones actuales proyectadas hasta 2038

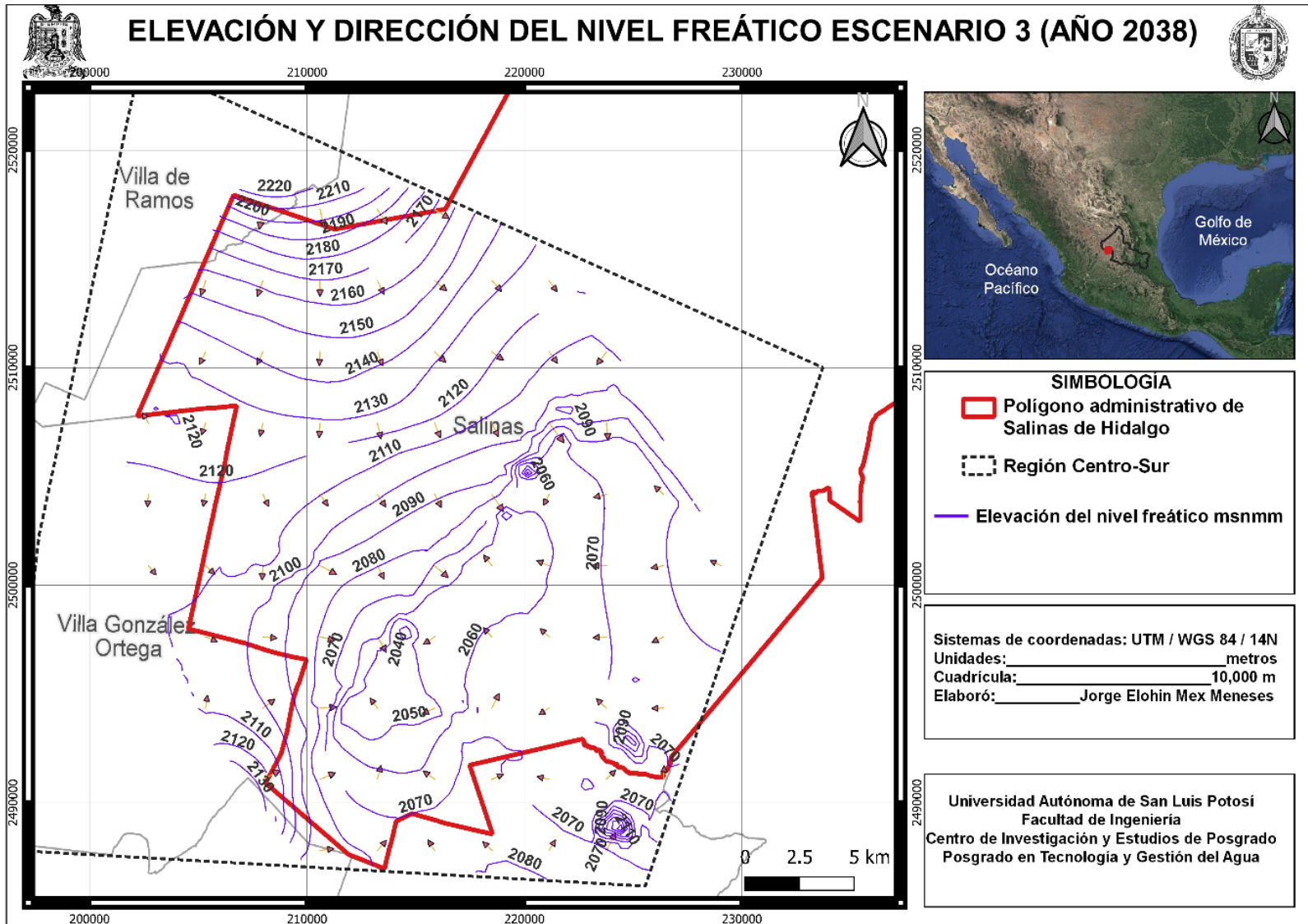


Figura 54. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 3.

De acuerdo con la Figura 54, se observa que los niveles del agua subterránea fluctúan entre 2027 y 2228 msnm; con dirección preferencial desde las zonas topográficamente altas hacia la zona del Valle de Salinas, y confirman las entradas por flujo horizontal al norte y sur de la región de estudio; las menores elevaciones corresponden a la zona con mayor densidad de extracciones y las direcciones de flujo no presentan cambios significativos con respecto a las condiciones actuales, sin embargo, en la Figura 55 se muestran los cambios en términos de la elevación del nivel freático entre el periodo 2023 a 2038.

Tabla 33. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 3

Día	Entrada por flujo horizontal (m³/día)	Extracción por bombeo (m³/día)
10488 (2023)	256,265.9	136,860.5
10958 (2024)	256,194.1	137,782.2
11323 (2025)	256,135.8	138,498.0
11688 (2026)	256,074.2	139,213.8
12053 (2027)	256,012.4	139,929.6
12419 (2028)	255,951.7	140,647.4
12784 (2029)	255,885.4	141,363.2
13149 (2030)	255,811.4	142,079.0
13514 (2031)	255,750.6	142,794.8
13880 (2032)	255,695.1	143,512.6
14245 (2033)	255,640.1	144,228.4
14610 (2034)	255,586.0	144,944.2
14975 (2035)	254,174.5	145,660.0
15341 (2036)	255,479.3	146,377.8
15706 (2037)	255,429.6	147,093.6
16071 (2038)	255,383.1	147,809.4

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 33 se tiene un decrecimiento de las entradas por flujo horizontal, al pasar de 256,265.9 a 255,383.1 m³/día para los años 2023 y 2038 respectivamente; es decir, una reducción de 882.8 m³/día en el periodo analizado.

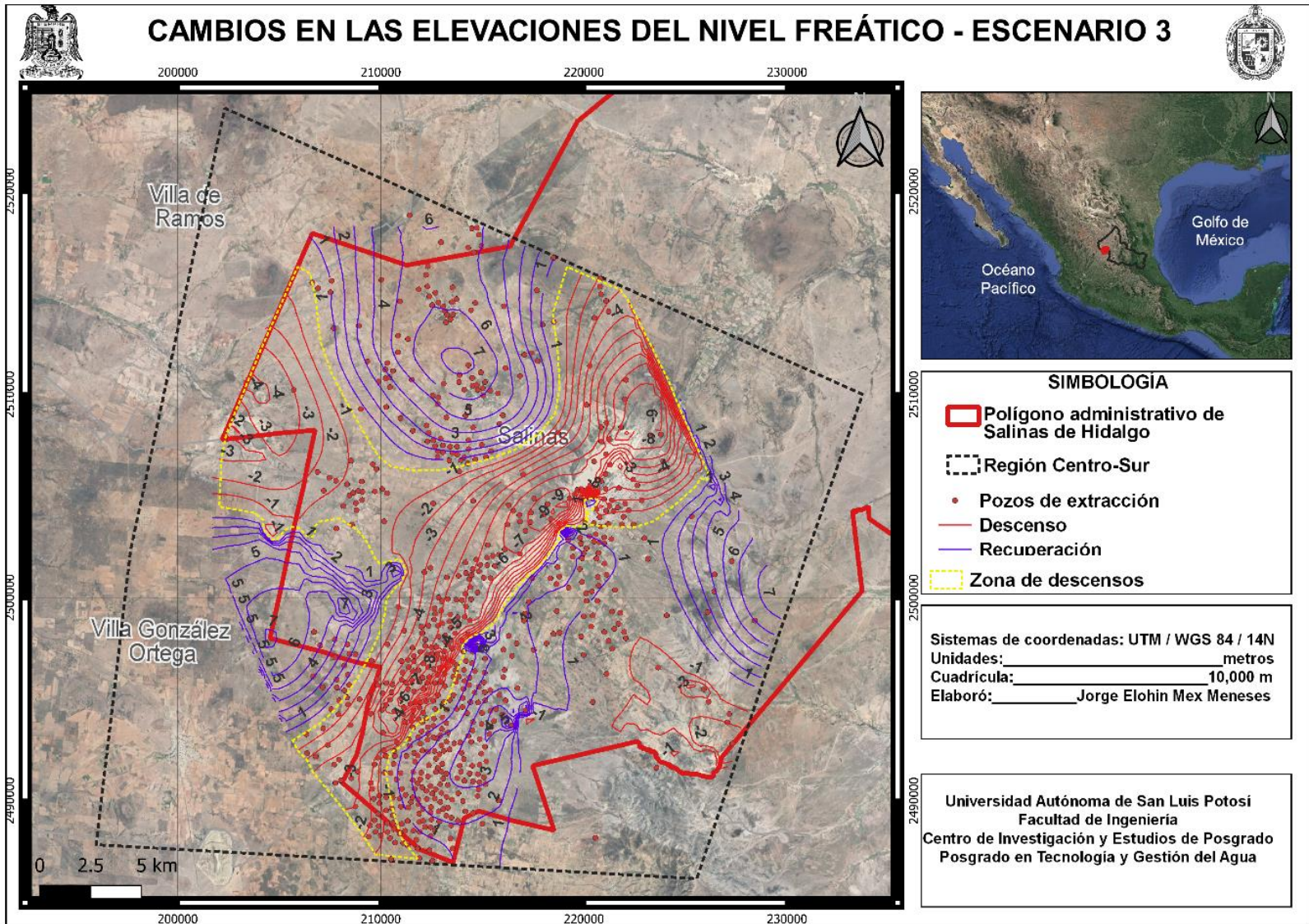


Figura 55. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 3.

En la Figura 55, se enmarcó en la figura irregular color amarillo la zona que presenta los mayores abatimientos, como se observa, estos pueden ser desde los 0.02 hasta los de 53.45 metros, y en promedio de 14.40 m con respecto a los niveles del año 2023 y coinciden con la zona de mayor presencia de pozos.

6.4 Escenario 4: Condiciones actuales con incremento de la entrada por flujo subterráneo proyectadas hasta 2038 (futuro)

Para este escenario se utilizó el modelo numérico calibrado y cuyos volúmenes de extracción oficiales fueron incrementados en 15% y, considerando al mismo tiempo un incremento del 2.60 % de la condición de frontera de entrada por flujo lateral, el cual fue definido con la tendencia detectada en la serie de precipitación de 1980 a 2018 a escala regional, analizada en el capítulo 4.

La magnitud del cambio mediante el método de Sens resultó igual a 1.9 mm/año para el mes de septiembre, recordando que el periodo de simulación abarcó desde 2007 a 2038, es decir, 31 años, se esperaría un incremento de 58.9 mm al final de la simulación, el cual se traduce en un aumento del 16% de la precipitación con respecto a la media anual histórica (367.84 mm), finalmente, considerando que septiembre es de los meses más lluviosos y aporta el 16% de la lluvia que cae en un año, trasladando el incremento de la precipitación a una escala de tiempo anual, este sería del 2.60 %.

6.4.1 Resultados Escenario 4: Condiciones actuales e incremento de entrada lateral hasta 2038

Elevación y dirección del nivel freático bajo el escenario 4

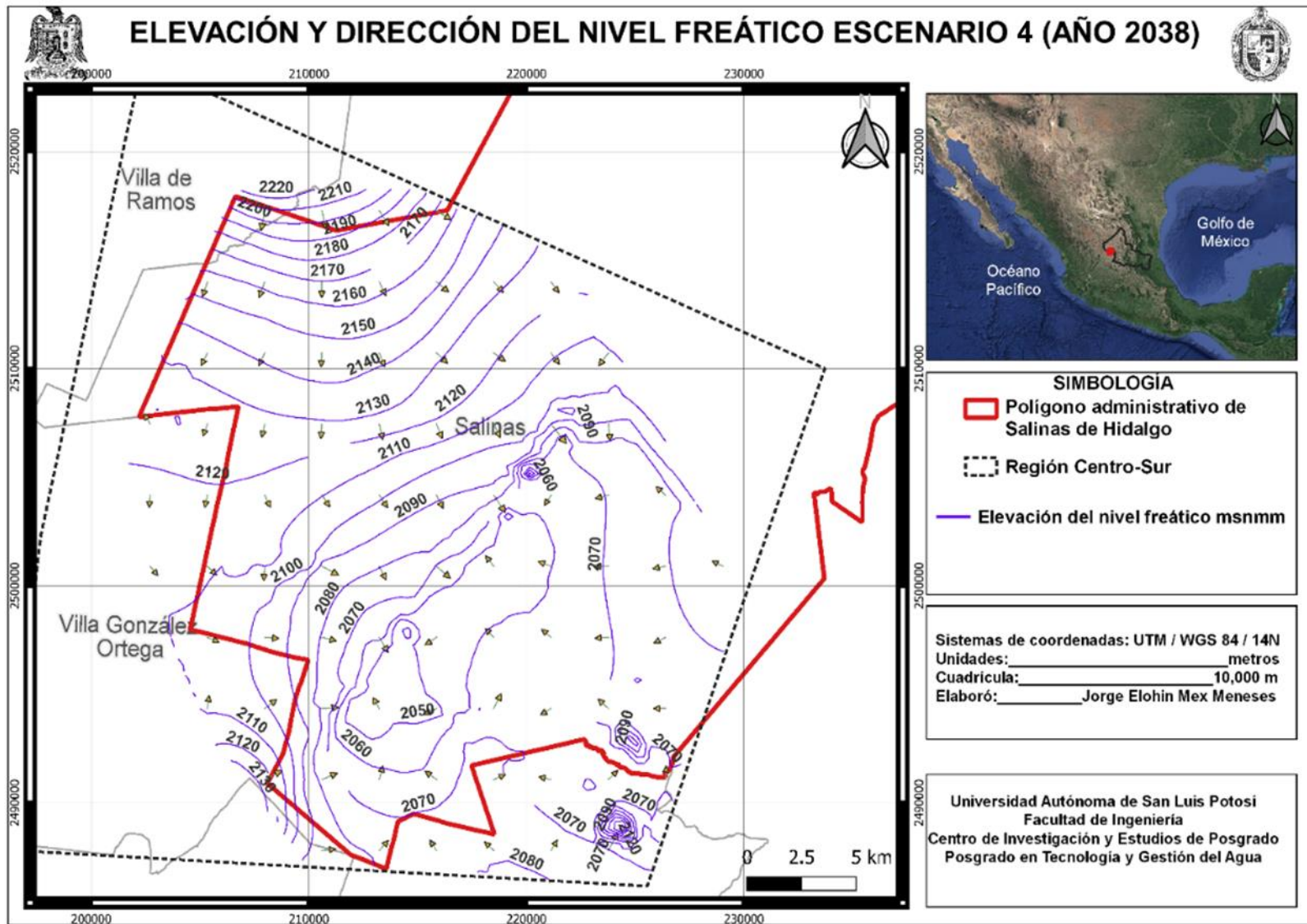


Figura 56. Elevación del nivel freático año 2038 escenario 4.

De acuerdo con la Figura 56, se observa que los niveles del agua subterránea fluctúan entre 2026 y 2236 msnm; con dirección preferencial desde las zonas topográficamente altas hacia la zona del Valle de Salinas, y confirman las entradas por flujo horizontal al norte y sur de la región de estudio; las menores elevaciones corresponden a la zona con mayor densidad de extracciones y las direcciones de flujo no presentan cambios significativos con respecto a las condiciones actuales, sin embargo, en la Figura 57 se muestran los cambios en términos de la elevación del nivel freático entre el periodo 2023 a 2038.

Abatimientos en el periodo 2023-2038 bajo el escenario 4

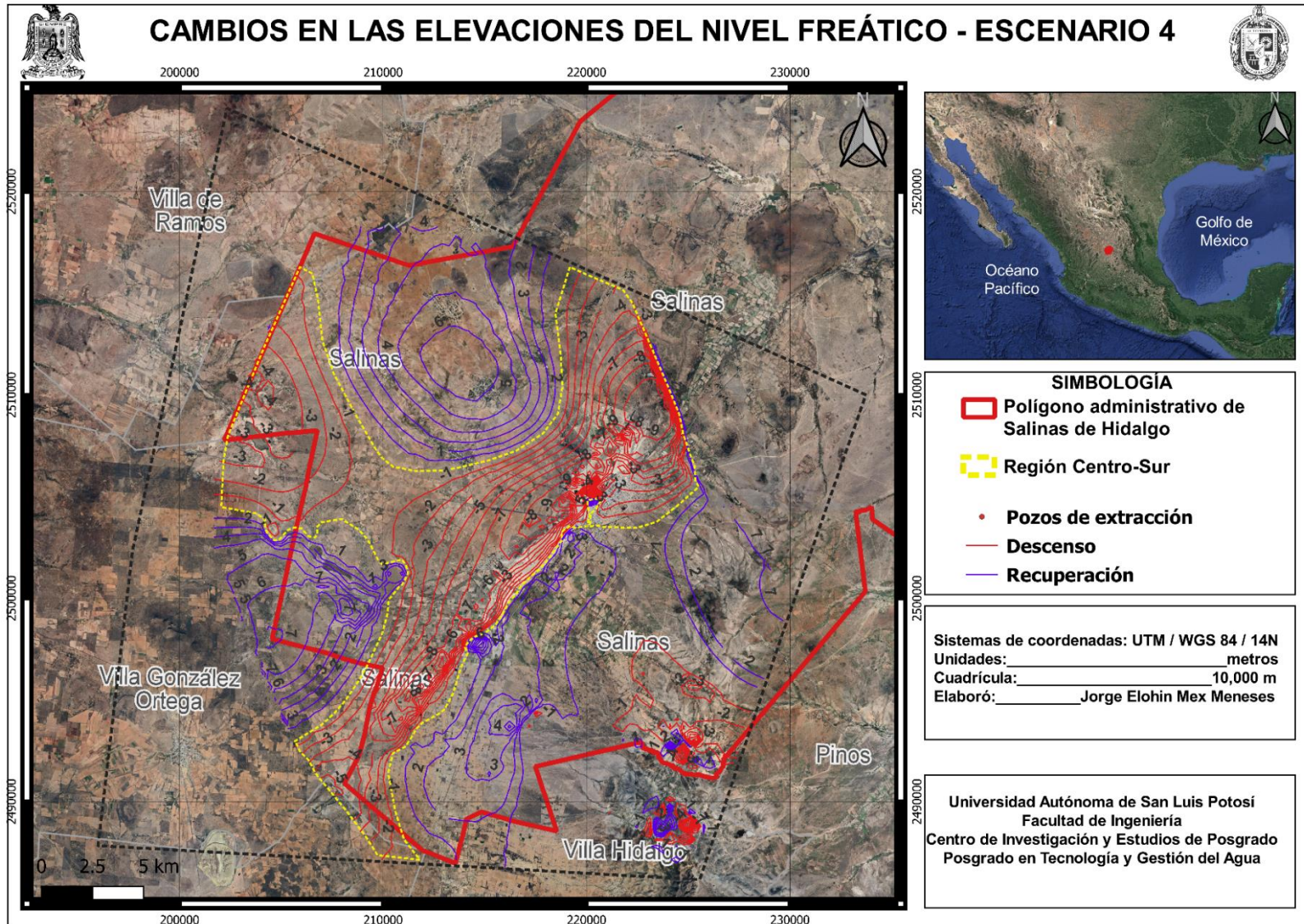


Figura 57. Abatimientos generados durante 2023 a 2038 escenario 4.

En la Figura 57, se enmarcó en la figura irregular color amarillo la zona que presenta los mayores abatimientos, como se observa, estos llegan a ser desde los 0.02 hasta los de 50.53 metros, y en promedio de 14.38 m con respecto a los niveles del año 2023 y coinciden con la zona de mayor presencia de pozos.

Tabla 34. Evolución de las entradas y salidas del modelo numérico escenario 4

Día	Entrada por flujo horizontal (m³/día)	Extracción por bombeo (m³/día)
10488 (2023)	263,604.20	136,860.5
10958 (2024)	263,553.30	136,860.5
11323 (2025)	263,510.00	136,860.5
11688 (2026)	263,464.90	136,860.5
12053 (2027)	263,418.70	136,860.5
12419 (2028)	263,371.40	136,860.5
12784 (2029)	263,322.10	136,860.5
13149 (2030)	263,273.30	136,860.5
13514 (2031)	263,226.40	136,860.5
13880 (2032)	263,180.30	136,860.5
14245 (2033)	263,134.50	136,860.5
14610 (2034)	263,454.40	136,860.5
14975 (2035)	263,036.60	136,860.5
15341 (2036)	262,987.10	136,860.5
15706 (2037)	262,944.70	136,860.5
16071 (2038)	262,906.50	136,860.5

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 34 se tiene un decrecimiento de las entradas por flujo horizontal, al pasar de 263,604.20 a 262,906.50 m³/día para los años 2023 y 2038 respectivamente; es decir, una reducción de 697.70 m³/día en el periodo analizado.

6.5 Resumen bajo los distintos escenarios

En este apartado, se hace una comparación de los resultados obtenidos bajo los diferentes escenarios de modelación.

Tabla 35. Resumen de los escenarios de simulación

Escenario	Día	Entrada por flujo horizontal (m ³ /día)	Extracción por bombeo (m ³ /día)	Entrada - Extracción	Abatimiento máximo (m)	Abatimiento promedio (m)
1	16071	255,394.7	136,860.5	118,534.2	53.50	14.40
2	16071	255,469.3	119,009.2	136,460.1	53.77	14.35
3	16071	255,383.1	147,809.4	107,573.7	53.45	14.40
4	16071	262,906.5	136,860.5	126,046.0	53.36	14.38

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 35, el escenario 4 (incremento de la entrada por flujo subterráneo) genera en la zona de extracción un menor abatimiento máximo (53.36 m), sin embargo, en términos del abatimiento promedio el escenario 2 representa un menor valor (14.35 m) y una mayor diferencia entre las entradas y salidas, es decir, mayor disponibilidad de agua en el acuífero. De los 4 escenarios analizados, el que tiene más sustentos para describir la realidad a tiempo futuro es el escenario 1, ya que las extracciones en el acuífero seguramente están por encima de lo concesionado y en teoría deben mantenerse constantes o disminuir. Como se observa el aumento por la variabilidad climática parece no tener tanta influencia en los abatimientos, al únicamente incrementar en un 2.60% la entrada por flujo subterráneo, este efecto no se ve reflejada significativamente.

En la Figura 58, se muestra la evolución temporal del abatimiento en el periodo 2024 a 2038, se observa que el escenario 3 produce mayor abatimiento al final de la predicción, sin embargo, este valor es apenas 5 cm mayor a los que se generan bajo los otros escenarios, las cuatro curvas muestran un pendiente equivalente a 0.14 m/año. El escenario 4 presenta tan solo 2 cm menos en abatimiento promedio con respecto al escenario 1, recordando que ambos tienen el mismo volumen de extracción.

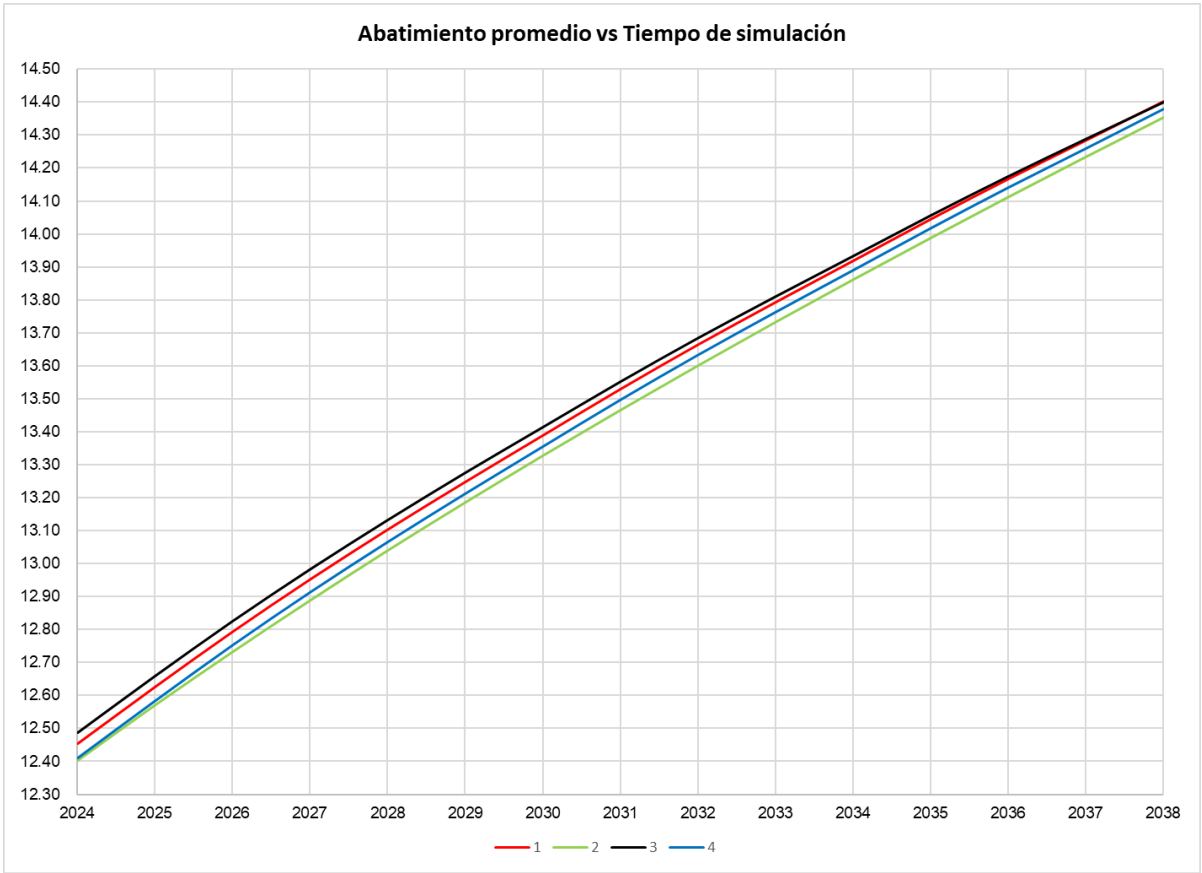


Figura 58. Evolución del abatimiento promedio en el periodo 2024-2038.

6.6 Zona con mayores abatimientos bajo el escenario más crítico

6.6.1 Relación entre la zona de mayor abatimiento y familias de agua

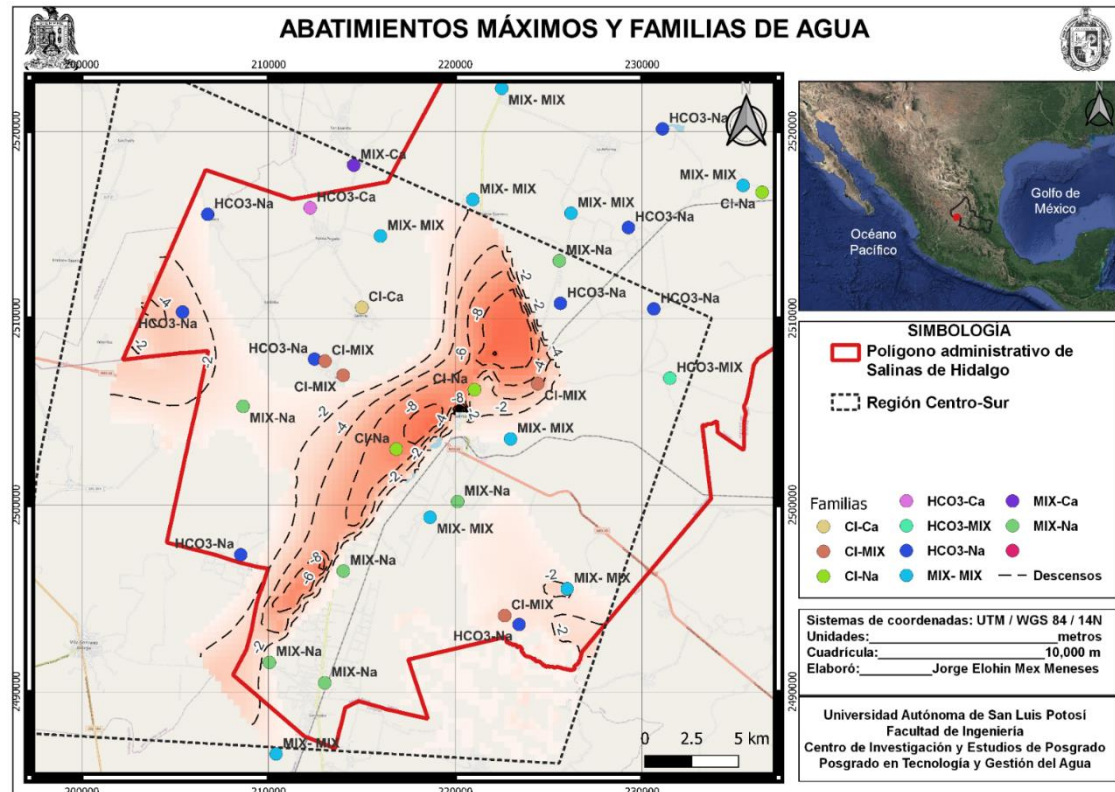


Figura 59. Relación abatimientos y familias de agua.

De acuerdo con la Figura 59, se observa que los abatimientos ocurren en la zona con presencia familias de agua CI-Na, por lo tanto, es probable que en años futuros estas aguas experimenten cambios en su composición, posiblemente aumentado su salinidad.

6.6.3 Relación entre la zona de mayor abatimiento y la calidad de agua para uso y consumo humano

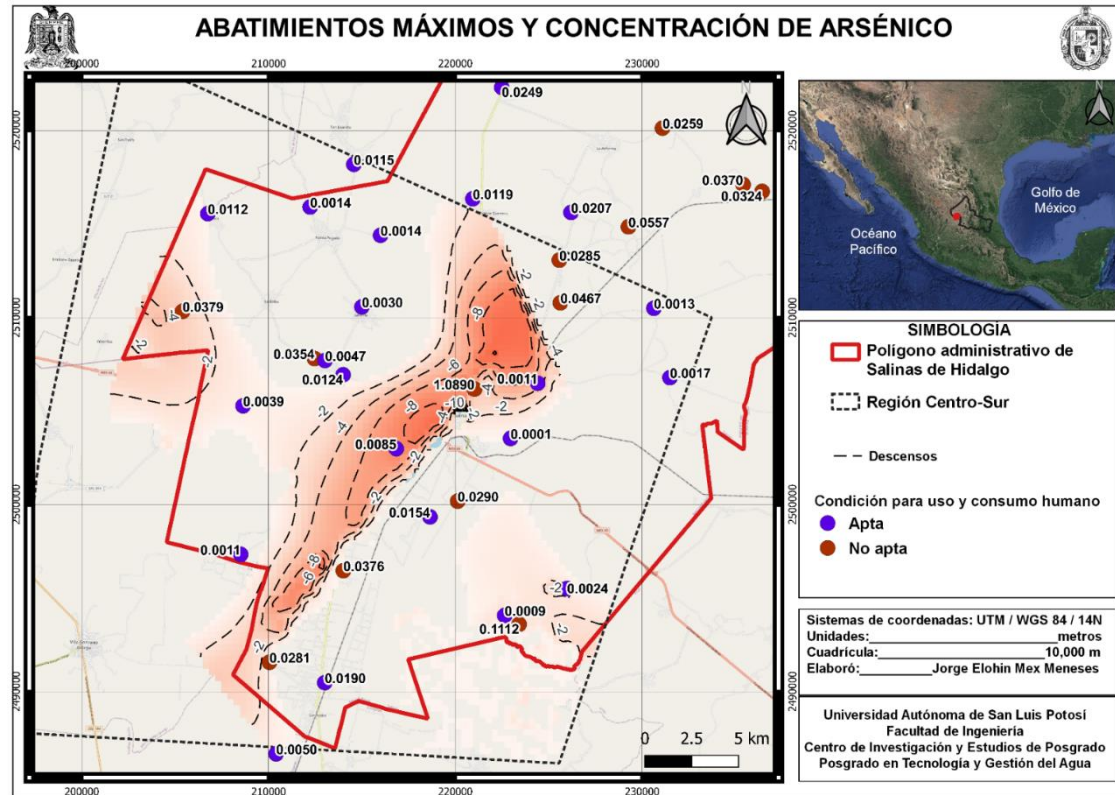


Figura 61. Relación abatimientos y concentración de arsénico en mg/L.

De acuerdo con la Figura 61 y acuerdo a los resultados de (Cadenas, 2021) en su mayoría las aguas cercanas a la zona de mayor abatimiento no sobrepasan el límite permisible de As (0.025 mg/l) según la NOM-127-SSA, las aguas no aptas se encuentran mayormente al norte, por lo que, en las condiciones actuales parece no existir una relación entre los descensos y la concentración de arsénico, sin embargo, en un futuro pudieran existir cambios en sus composición.

6.6.4 Relación entre la zona de mayor abatimiento y la calidad de agua para riego

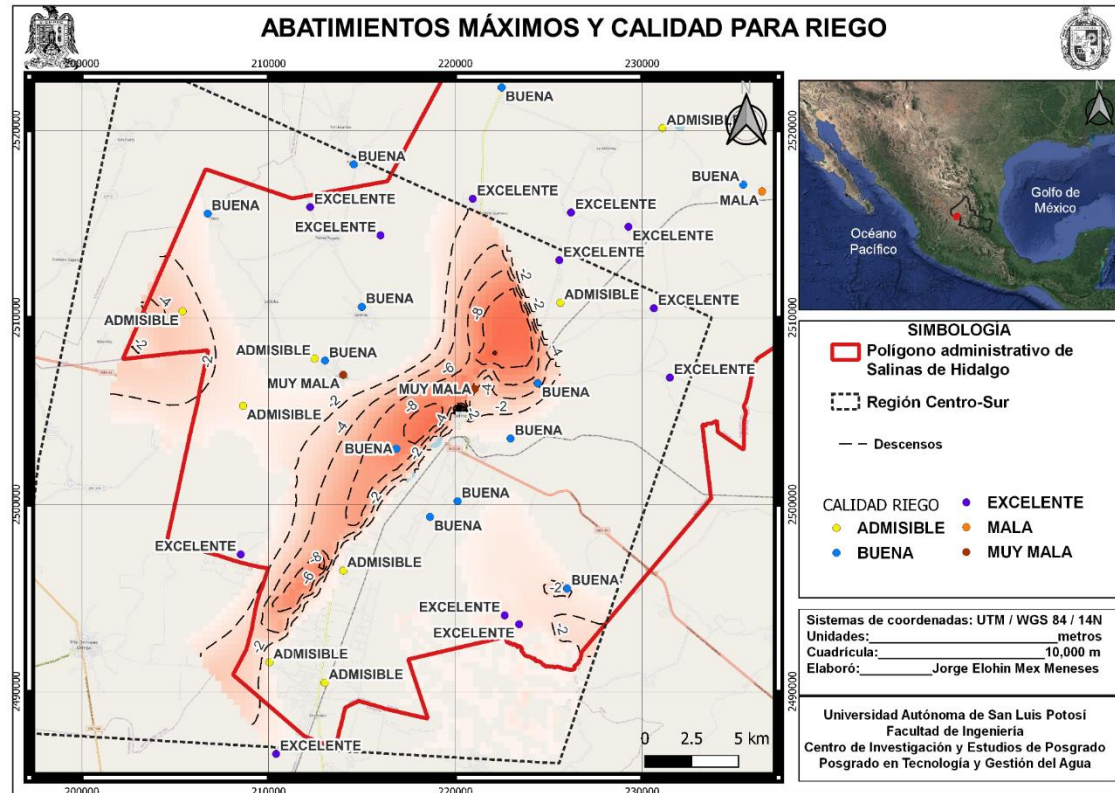


Figura 62. Relación abatimientos y calidad de agua para riego.

De acuerdo con la Figura 62, en general las aguas son aptas para riego, la zona de mayor abatimiento abarca puntos con condición buena, sin embargo, se debe bajo un descenso importante de los niveles se puede generar un cambio en la calidad del agua y sobre todo en términos de la concentración de cloruros, los cuales pudieran influir en la calidad para riego.

6.6.5 Relación entre la zona de mayor abatimiento y los volúmenes concesionados

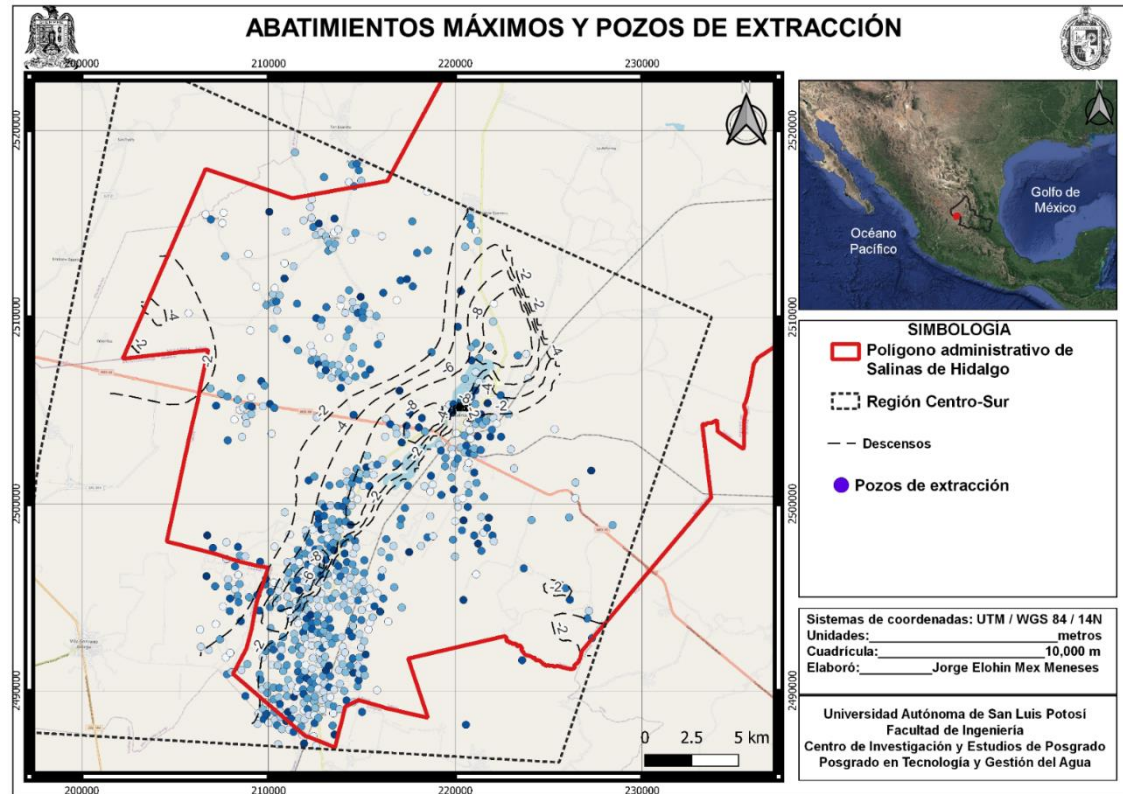


Figura 63. Relación abatimientos y volumen de extracción.

De acuerdo con la Figura 63, la zona con mayor densidad de pozos se ubica al sur de la zona con más abatimientos, lo que sugiere que los descensos son productos de la extracción combinado con las propiedades de los medios, así mismo, en la zona de entrada por flujo subterráneo existe menor densidad de pozos y por consiguiente menores abatimientos.

7.- Recomendaciones sobre el manejo de extracciones

La Organización Mundial de las Naciones Unidas (ONU) ha adoptado un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Cada objetivo tiene metas específicas que deben alcanzarse en los próximos 15 años, en particular para el tema del agua, se estableció el objetivo de desarrollo sostenible 6 “Agua limpia y saneamiento” (Organización Mundial de Las Naciones Unidas [ONU], 2015).

Entre las metas que se destacan para este objetivo y tienen relación con el presente trabajo, están:

6.4 De aquí a 2030, aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.

6.5 De aquí a 2030, implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.

6.6 Apoyar y fortalecer la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento.

De acuerdo con la (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2018) la gobernanza es el abanico de reglas, prácticas y procesos (formales e informales) políticos, institucionales y administrativos a través de los cuales se toman e implementan decisiones. En un esquema de gobernanza, los intereses de los actores son tomados en consideración, y los tomadores de decisiones rinden cuentas sobre su gestión. La gobernanza efectiva del agua es un medio y una condición de éxito para la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos. Más que un sector, el agua como recurso tiene características que lo hace altamente sensible a la gobernanza.

En este sentido, se establecen a continuación una serie de recomendaciones en función de los resultados obtenidos en el presente trabajo, resaltando que busca garantizar el recurso hídrico para las futuras generaciones:

1.- De acuerdo con datos del REPDA, apenas el 4.32% de las extracciones en el acuífero administrativo se destina a un uso público urbano, por lo tanto, se sugiere que este volumen debe mantenerse como prioritario en la asignación de nuevos

aprovechamientos considerando las respectivas proyecciones a futuro, y deben ubicarse fuera de la zona de descensos máximos y cercanos a los puntos donde no se rebasan los límites permisibles de arsénico u otros elementos nocivos para la salud.

2.- Es necesario establecer que las autoridades correspondientes tengan coherencia entre los resultados de los estudios técnicos de disponibilidad del acuífero administrativo y el otorgamiento de concesiones, ya que de acuerdo con el REPDA se autorizaron títulos en el año 2021 aun cuando el acuífero se había reportado como sobreexplotado en 2015.

4.-De acuerdo con el modelo numérico, fue necesario aumentar los volúmenes de extracción en un 15% (porcentaje que pudiera estar subestimado), esto solamente es un indicio de que existen pozos con extracción no autorizada, se sugiere llevar inspecciones periódicas y aleatorias de los aprovechamientos con concesión e informar a la población sobre las consecuencias de alumbrar libremente las aguas subterráneas.

5.-En función de los resultados arrojados por el modelo numérico, en la región centro-sur del acuífero, hacia el año 2038 pudieran existir abatimientos de hasta 14.40 metros bajo el escenario actual de extracciones, por lo tanto, cuando exista volumen disponible para otorgar concesiones, se sugiere únicamente autorizar en la zona noroeste, cercana a la entrada por flujo subterráneo.

6.- Se sugiere la realización de pruebas de bombeo como requisito para la asignación de pozos de aprovechamiento, ya que, de acuerdo con la visita realizada en la zona, se tuvo conocimiento por parte de los concesionarios la afectación por la extracción de pozos cercanos, así mismo, con el objetivo de establecer un gasto máximo de extracción para los pozos en la zona y así evitar grandes abatimientos.

7.- El uso más importante del agua en esta zona es el agrícola, de acuerdo con el índice Wilcox y a los resultados del modelo numérico, la mejor zona para ubicar nuevos aprovechamientos es la noroeste, cerca de la condición de frontera de entrada.

8.- Se sugiere realizar una actualización de los censos de aprovechamiento de la zona, debido a que esto puede cambiar la condición de sobreexplotación del acuífero y también los datos reales de extracción proporcionarían una mayor confiabilidad al modelo numérico implementado.

9.- La zona recomendada para las extracciones, debe ser estudiada en estudios previos, si bien está constituida por material sedimentario, también afloran materiales con mediana permeabilidad, es por ello se sugiere realizar mayores campañas de caracterización.

Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones derivadas del presente estudio, en función de los objetivos específicos planteados.

La extensión de la Región centro-sur del acuífero administrativo de Salinas se definió con base en la cuenca de aportación superficial y criterios hidrogeológicos, de acuerdo con datos del REPDA concentra el 90% del volumen concesionado, por lo tanto, es la zona con mayor relevancia para el abastecimiento público urbano y las actividades agrícolas.

Se partió de un modelo numérico previo del acuífero administrativo, al cual se le detectaron aspectos con la posibilidad de ser mejorados, mismos que fueron tomados en cuenta en la elaboración del presente modelo, el cual tiene como principal ventaja que es capaz de extrapolar sus resultados hasta el año 2038 y está basado en un modelo conceptual más sólido al considerar la composición química del agua subterránea.

Se recopiló información vectorial de fuentes oficiales, que ayudó a la caracterización de la zona en sus aspectos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos e hidrogeoquímicos; los cuales ayudaron en la integración del modelo conceptual.

Se realizó un estudio hidrológico superficial, el cual sugiere que en esta zona ocurre una precipitación medial anual del orden de 367.84 mm; una temperatura media anual de 16.72 °C, mismas que se traducen en una evapotranspiración real de 343.03 mm, es decir, del 95% de la precipitación, por lo cual, apenas un 5% podría infiltrar y un porcentaje mucho menor recargar el acuífero en forma vertical.

Con respecto al estudio hidrológico subterráneo, se emplearon configuraciones de nivel freático correspondientes a tres años de medición para la estimación de las entradas por flujo subterráneo detectadas mediante el análisis de las equipotenciales, estas resultaron del orden de 135,205 m³/día, 155,055 m³/día y 151,234.50 m³/día; para los años 2017, 2019 y 2023, respectivamente.

Al realizar el balance hídrico entre la parte superficial y subterránea, se comprobó que el acuífero presenta condiciones de sobreexplotación o está muy cercano a este, ya que las extracciones superan la recarga natural del acuífero, lo cual confirma los estudios técnicos presentados por Conagua (2020), y sugiere la necesidad de contar con herramientas técnicas para su gestión.

Se realizó el análisis de tendencias de variables climáticas, la precipitación media mensual en 13 de 16 estaciones climatológicas mostró una tendencia positiva (incremento) para el mes de septiembre (1988-2018), esta magnitud de cambio se estimó entre 1.08 y 2.31 mm/año, en particular, las estaciones ubicadas en la región de estudio (claves: 24055, 24148 y 32114) presentaron una pendiente de 1.50, 1.33 y 1.08 mm/año, respectivamente. La serie de precipitación media mensual a escala regional también muestra una tendencia positiva durante el mes de septiembre, con una pendiente de 1.39 mm/año. La serie de temperatura media mensual a escala local y regional no presentaron tendencias durante el periodo analizado.

Una vez que se han descrito las características físicas de la región en estudio, y se han analizado las series de tiempo de precipitación y temperatura; y se estimó el balance hídrico, con todos esos elementos fue posible integrar el modelo conceptual hidrogeológico de la Región Centro-Sur, el cual sugiere un acuífero de tipo libre, heterogéneo y conformado principalmente por rocas ígneas y sedimentarias en las partes más altas, un relleno con material sedimentario y arcillas en las zonas bajas correspondientes a los depósitos más recientes. El acuífero no recibe una recarga importante por flujo vertical dados los altos valores de evapotranspiración, las entradas al sistema ocurren por flujo horizontal y las salidas mediante pozos de extracción, que en su mayoría se destinan al uso agrícola.

El proceso de modelación comenzó después de integrar el modelo conceptual, seguidamente se implementó un modelo numérico tridimensional conformado por 5 capas, las cuales tuvieron en promedio entre 50 y 150 metros de espesor; conformado por una malla de 5249 elementos triangulares, de aproximadamente 500 m por lado, el cual fue calibrado para un periodo de simulación entre 2007 y 2023, mediante mediciones realizadas en los años 2017 y 2019 con un NRMS de 3.87 y 7.65 % respectivamente; y validado con mediciones de campo del año 2023, Finalmente al modelo calibrado se le realizó un análisis de sensibilidad y este comprobó que es sensible a variaciones en los valores de conductividad hidráulica. El modelo implementado es capaz de extrapolar sus resultados hasta el año 2023.

En el proceso de calibración del modelo numérico, fue necesario realizar un incremento de los volúmenes de extracción del 15%, lo cual sugiere que existe un volumen de extracción mayor al concesionado, y esto confirma la hipótesis planteada. Una vez se tuvo el modelo calibrado, se implementaron cuatro escenarios de modelación futuros, con el objetivo de evaluar el comportamiento de los niveles del agua subterránea hacia el año 2038, el escenario 4 generaría en la zona de extracción un menor abatimiento máximo puntual (53.36 m), sin embargo, en términos del abatimiento promedio el escenario 2 representaría un menor valor (14.35 m) y una mayor diferencia entre las entradas y salidas, es decir, mayor disponibilidad de agua subterránea. De acuerdo a los resultados, el efecto de las extracciones tiene mucho mayor peso sobre los abatimientos que el incremento de la entrada por flujo lateral. En función de los resultados arrojados por el modelo numérico, se observó que los abatimientos bajo los cuatro escenarios se concentraban en una zona en particular, la cual fue definida como la zona de mayores descensos, misma que está ubicada sobre el medio geológico con Qhola, con características de baja conductividad hidráulica. De acuerdo con la delimitación de la zona de mayores descensos y la correlación con aspectos de calidad de agua, tales como el índice Wilcox y la presencia del elemento Arsénico, los resultados muestran que los abatimientos no están influyendo sobre la presencia de elementos como el Arsénico, se sugiere que de existir nuevos aprovechamientos en la zona sean ubicados cercanos a la entrada de flujo subterráneo ubicada al Noroeste, ya que se tiene buena calidad para el riego y consumo humano, sin embargo, debe realizarse un análisis más a fondo de todos los parámetros permisibles para ambos usos, lo cual quedó fuera del alcance de este proyecto. Una vez se ha caracterizado la zona, se ha implementado el modelo numérico y se realizaron predicciones, el presente trabajo se finalizó aceptando la hipótesis planteada, se sugiere en estudios futuros retomar el modelo numérico para ser alimentado con mayor número de mediciones de carga hidráulica y de ser posible, complementar el modelo de flujo con un modelo de transporte de solutos.

Referencias

- Alan E. Kehew. (2001).** *Applied Chemical Hydrogeology*.
- Alhaji, U. U., Yusuf, A. S., Edet, C. O., Oche, C. O., & Agbo, E. P. (2018).** Trend Analysis of Temperature in Gombe State Using Mann Kendall Trend Test. *Journal of Scientific Research and Reports*, 20(3), 1–9.
<https://doi.org/10.9734/jsrr/2018/42029>
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015).** *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005).** *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema.
- Baalousha, H. M. (2012).** Characterisation of groundwater–surface water interaction using field measurements and numerical modelling: a case study from the Ruataniwha Basin, Hawke’s Bay, New Zealand. *Appl Water Sci*, 109–118.
- Cadenas, S. (2021).** *Caracterización hidrogeoquímica del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, S.L.P.* [Licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Campa–Uranga, M. F., & Coney, P. J. (1983).** Tectono–stratigraphic terranes and mineral resource distribution in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040–1051.
- Campos, D. (1998).** *Procesos del Ciclo Hidrológico* (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Ed.; 3rd ed.). Universitaria Potosina.
- Campos-Aranda, D. (2010).** *Introducción a la hidrología urbana*. Printego.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2012).** *Glosario general de términos del Desarrollo de la Base Metodológica para el Inventario Nacional de Humedales de México*.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2019).** *Atlas del Agua en Comisión Nacional del Agua*. www.gob.mx/conagua
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2020).** *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Salinas de Hidalgo (2403), Estado de San Luis Potosí*.

- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA]. (2018).** *Estadísticas del agua en México*. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983).** *Hidrología Subterránea Custodio y Llamas Tomo II* (Vol. 2). Omega.
- Del Pilar, M., Hernández, M., Trovatto, M., & González, N. (2013).** *Estimación de la recarga en zonas áridas según distintos métodos. Área medanosa del Sur de Península Valdés*.
- Domínguez Mora, R., Esquivel Garduño, G., Méndez Antonio, B., Mendoza Reséndiz, A., Liliana Arganis Juárez, M., & Carrizosa Elizondo, E. (2008).** *Manual del Modelo para pronóstico de escurrimiento*.
- El Alfy, M. (2014).** Numerical groundwater modelling as an effective tool for management of water resources in arid areas. *Hydrological Sciences Journal*, 59(6), 1259–1274. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.836278>
- Estrada, F. (2013).** *El Agua de San Luis Potosí, Contaminación y Saneamiento*.
- Fetter Jr., C. W. (2001).** *Applied Hydrogeology (4th Edition)* (4th ed.).
- García Marín, A., Luis, J., Ruiz, A., José, Ayuso-Muñoz, L., Estévez, J., Nicolás, F., & Chinchilla, C. (2017).** *Trend analysis and changes in temperature values in the province of Cadiz (south-western Spain)*.
- Ghazaw, Y., Ghumman, A. R., Al-Salamah, I., & Khan, Q. U. Z. (2013).** Investigations of Impact of Recharge Wells on Groundwater in Buraydah by Numerical Modeling. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 713–724.
- Humphrey, W. E. (1949).** Geology of the sierra de los Muertos Área, México. *Geological Society of America Bulletin*, 60, 80–176.
- Huyakorn, P., & Pinder, G. (1983).** *Computational Methods in Subsurface Flow* (Academic Press, Ed.).
- Idoia-Zabalza, O. (2019).** *ANÁLISIS DE TENDENCIAS DE LAS VARIABLES ASOCIADAS A LA PRECIPITACIÓN EN GIPUZKOA* [Licenciatura]. Universidad Pública de Navarra.
- Imlay, R. W. (1986).** Evolution of the Coahuila Peninsula, México; parte 4. *Geological Society of American Bulletin*, 47, 1091–1152.

- Imlay, R. (1937).** Geology of the middle part of the sierra de Parras, Coahuila. *Geological Society of America Bulletin*, 48, 606–619.
- Imlay, R. (1938).** Ammonites of the Taraises Formation of the northern Mexico. *Geological Society of American Bulletin*, 49, 539–602.
- Instituto Nacional de Estadística [INEGI]. (2002a).** *Síntesis de Información geográfica del estado de San Luis Potosí.*
- Instituto Nacional de Estadística [INEGI]. (2002b).** *Estudio hidrológico del Estado de San Luis Potosí.* INEGI.
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019).** *Glosario Meteorológico.*
<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/Anexo+10.+Glosario+meteorol%C3%B3gico.pdf/6a90e554-6607-43cf-8845-9eb34eb0af8e>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2015).** *Guía para la interpretación de cartografía Uso del suelo y vegetación Escala 1:250 000 Serie V.*
- International Ground Water Modeling Center [IGWMC]. (1993).** *IGWMC Software Catalog.*
- Labarthe, G., & Aguillón R. (1986).** *Cartografía Geológica 1:50,000. Hojas Salinas y Villa de Ramos, Estados de San Luis Potosí y Zacatecas.* Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., & Aguillón-Robles, A. (1982).** Estudio Geológico Minero del Área de Peñón Blanco, estados de San Luis Potosí y Zacatecas. *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*, 76.
- Lekula, M., Lubczynski, M. W., & Shemang, E. M. (2018).** Hydrogeological conceptual model of large and complex sedimentary aquifer systems – Central Kalahari Basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 106, 47–62.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.006>
- León, N. (2020).** *Modelo numérico de flujo de agua subterránea y estrategias de gestión hídrica del acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí [Maestría].* Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Moustadraf, J., Razack, M., & Sinan, M. (2008).** Evaluation of the impacts of climate changes on the coastal Chaouia aquifer, Morocco, using numerical modeling. *Hydrogeology Journal*, 16, 1411–1426.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la C. y la C. (UNESCO). (2015).** *Aguas subterráneas y cambio climático*.
https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000242861_spa
- Organización Mundial de Las Naciones Unidas. (2015).** *Agua Limpia y Saneamiento: Por qué es importante*.
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos. (2018).** *Diálogos por la sostenibilidad del agua en México* (OECD Studies on Water). OECD.
<https://doi.org/10.1787/9789264292659-en>
- Orozco-Ramírez, C. (2015).** *ESTIMACIÓN DEL RÉGIMEN HIDROLÓGICO DE EVENTOS* [Licenciatura]. Universidad Santo Tomás de Aquino.
- Pantoja-Alor, A. J. (1972).** *Datos Geológicos-Estratigráficos de la Formación Nazas*.
- Pulido, A. (2001).** Sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible. *Problemática de La Gestión Del Agua En Regiones Semiáridas*, 115–132.
- Reilly, T. E., & Harbaugh, A. W. (2004).** *Guidelines for Evaluating Ground-Water Flow Models*.
- Rodriguez-León, L. (2012).** *Evolución geológica del campo volcánico Salinas–Villa de Ramos* [Maestría]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Salas-García, J., Garfias, J., Llanos, H., & Martel, R. (2011).** Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28, 147–160.
- Salazar, R. (2019).** *Correlación geohidrológica y geofísica-electromagnética en el acuífero administrativo de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí*. [Licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Servicio Geológico Mexicano [SGM]. (2005).** *CARTA GEOLOGICO - MINERA SALINAS DE HIDALGO F14 A61 ESCALA 1:50 000 ESTADOS DE SAN LUIS POTOS Y ZACATECAS*.

- Sikdar, P. (2019).** *Groundwater Development and Management Issues and Challenges in South Asia.*
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1981).** *Métodos de cálculo del balance hídrico : guía internacional de investigación y métodos.* Inst. de Hidrología de España.
- Sullivan, T. P., Gao, Y., & Reimann, T. (2019).** Nitrate transport in a karst aquifer: Numerical model development and source evaluation. *Journal of Hydrology*, 573, 432–448.
- Tardy, M. (1986).** *Contribution á l'étude géologique de la Sierra Madre Oriental du Mexique* [Doctorado]. Université Pierre et Marie Curie de Paris.
- Tejeda, I., Cienfuegos, R., Muñoz, J., & Durán, M. (2003).** Numerical modeling of saline intrusion in Salar de Atacama. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25–34.
- Toth, J. (1963).** *A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins.*
- Tristán-González, M. (2009).** *Evolución Tectono-volcánica durante el Paleógeno en la porción sur-oriente de la Mesa Central.* Universidad Nacional Autónoma de México [Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño Marcella Nanni, H., & líder, autor. (2002).** *Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua* Autores.
- UNAM Instituto de Geofísica. (2021).** *Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México.*
- Yozgatligil, C., Aslan, S., Iyigun, C., & Batmaz, I. (2012).** Comparison of missing value imputation methods in time series: The case of Turkish meteorological data. *Theoretical and Applied Climatology*, 112(1–2), 143–167.
<https://doi.org/10.1007/s00704-012-0723-x>