



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

Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera, Zacatecas como herramienta de actualización y mejora

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Joel Padilla Díaz

Director de tesis:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Codirector:

Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles



San Luis Potosí, S. L. P.

Enero de 2024



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

Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera, Zacatecas como herramienta de actualización y mejora

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Joel Padilla Díaz

Director de tesis:

Dr. Antonio Cardona Benavides

Codirector:

Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles

Comité tutelar:

Dr. Hugo Enrique Júnez Ferreira

Dr. Hermann Rocha Escalante



San Luis Potosí, S. L. P.

Enero de 2024

18 de mayo de 2023

**ING. JOEL PADILLA DÍAZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Antonio Cardona Benavides y Carlos Alfonso Muñoz Robles**, *Asesor y Coasesor 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 18 de mayo del presente, fue aprobado el Temario propuesto:


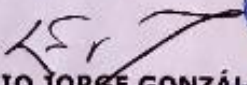
TEMARIO:

"Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera, Zacatecas como herramienta de actualización y mejora"

1. Introducción
2. Metodología para la evaluación del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera
3. Modelo conceptual de las condiciones geológicas e hidrológicas del acuífero Calera
4. Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo
5. Actualización y mejora del modelo numérico de flujo subterráneo
6. Conclusiones.
Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR. DE SAN LUIS POTOSÍ,
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022
del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero
Calera, Zacatecas como herramienta de actualización y
mejora

Ing. Joel Padilla Díaz

Enero 2024

CRÉDITOS INSTITUCIONALES

PROYECTO:

“EVALUACIÓN DE LAS PREDICCIONES DEL PERIODO 2016-2022 DEL MODELO NUMÉRICO DE FLUJO SUBTERRÁNEO DEL ACUÍFERO CALERA, ZACATECAS COMO HERRAMIENTA DE ACTUALIZACIÓN Y MEJORA”

POR:

JOEL PADILLA DÍAZ

DESARROLLADO EN:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FONDOS:

FORDECYT-PRONACES (377899): " FUENTES GEOGÉNICAS Y MECANISMOS DE MOLIZACIÓN DE ARSÉNICO, FLUORURO Y URANIO A SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL" **RESPONSABLE TÉCNICO:** DR. ANTONIO CARDOBA BENADES

AGRADECIMIENTO:

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGIA (CONACYT) POR OTORGAMIENTO DE LA BECA, No. CVU: 1144049, CONVENIO No. 1050941.

PERIODO: SEPTIEMBRE 2021 - AGOSTO 2023

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

Dedicatoria

A mis amados padres, el motivo de ser quien soy
A mis abuelos, los que siempre están y los que estuvieron

Agradecimientos

A mi familia, especialmente a mis padres, quienes siempre han brindado su apoyo en mis proyectos, estando presentes cuando más los necesito.

Al Dr. Antonio Cardona Benavides por otorgarme la oportunidad de participar en sus proyectos de investigación bajo su dirección y permitirme vivir gratas experiencias.

A los doctores Hermann Rocha Escalante, Carlos Alfonso Muñoz Robles y Dr. Hugo Enrique Júnez Ferreira. Gracias por compartirme su tiempo y su conocimiento, sus aportaciones fueron vitales para el desarrollo de esta investigación.

A Citlali, gracias por el cariño, el tiempo y el apoyo brindado en todo sentido, tú eres la pieza clave en mi motivación para desarrollar esta investigación.

A los mejores roommates del mundo Cynthia, Leo, Mariana, Carlos y Mayra, amigos, gracias por el apoyo brindado, los consejos, las comidas compartidas, las experiencias vividas y respaldo en la realización de esta investigación. Espero que nos podamos frecuentar el futuro.

A mis compañeros potosinos que nos acogieron en su ciudad y su casa, Sergio, Diana, Ximena, Rafa y Raúl. Gracias también por las experiencias compartidas con mis compañeros foráneos Juan, Jorge y Álvaro. Finalmente, gracias también a mis compañeros de cubículo, en especial al Sócrates, gracias por el apoyo, el conocimiento y los consejos compartidos.

Índice general

Agradecimientos	a
Índice general	b
Lista de Figuras	f
Lista de tablas	i
Resumen.....	1
Abstract.....	m
1 Introducción.....	1
1.1 Importancia del agua subterránea.....	1
1.2 Relevancia del agua subterránea en México	2
1.3 Modelación numérica.....	3
1.4 Modelos numéricos de flujo de agua subterránea en Calera, Zacatecas	4
1.5 Post auditorías de modelos numéricos	7
1.6 Justificación.....	7
1.7 Objetos de la investigación	8
1.7.1 General	8
1.7.2 Específicos	8
1.8 Hipótesis.....	9
2 Metodología para la evaluación del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera	9
2.1 Evaluación del modelo numérico (Post auditoría)	10
2.1.1 Planeación.....	10
2.1.2 Modelo conceptual.....	10
2.1.3 Construcción	11
2.1.4 Calibración.....	12
2.1.5 Predicciones del modelo	12

2.1.6	Evaluación y observaciones	13
2.2	Actualización del modelo numérico.....	14
2.2.1	Objetivos de la actualización	16
2.2.2	Recopilación de la información	16
2.2.3	Análisis de la información	17
2.2.4	Modelo conceptual.....	18
2.2.5	Modelación numérica.....	20
3	Modelo conceptual de las condiciones geológicas e hidrológicas del acuífero Calera	23
3.1	Descripción del sitio de estudio	23
3.1.1	Ubicación	23
3.1.2	Clima.....	25
3.1.3	Uso de suelo y vegetación.....	26
3.1.4	Fisiografía	28
3.1.5	Hidrología superficial	29
3.1.6	Geomorfología	30
3.1.7	Geología.....	31
3.1.8	Geología estructural	36
3.2	Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica.....	37
3.2.1	Unidades hidroestratigráficas.....	37
3.2.2	Datos de laboratorio y verificación.....	38
3.2.3	Diagramas y facies hidrogeoquímicas	46
3.2.4	Calidad del agua.....	53
3.3	Modelo conceptual del funcionamiento de los sistemas de flujo del acuífero Calera.....	56
4	Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo.....	63

4.1	Aspectos generales	63
4.2	Alcances de la post auditoría.....	63
4.3	Objetivo.....	64
4.4	Planeación	64
4.5	Modelo conceptual y construcción del modelo numérico.....	65
4.6	Análisis de sensibilidad.....	67
4.7	Predicciones del modelo.....	69
4.8	Evaluación y observaciones	72
5	Actualización y mejora del modelo numérico de flujo subterráneo	76
5.1	Introducción	76
5.1.1	Herramientas de modelación.....	76
5.1.2	Ecuaciones	77
5.2	Objetivos del modelo	80
5.3	Datos e implementación del modelo	80
5.3.1	Discretización espacial.....	80
5.3.2	Unidades geológicas	82
5.3.3	Procesamiento de las UH.....	87
5.3.4	SWAT y recarga de agua subterránea.....	88
5.3.5	Red de monitoreo	92
5.3.6	Pozos de bombeo	95
5.3.7	Piezometría inicial	98
5.3.8	Balance de aguas.....	99
5.3.9	Discretización temporal	100
5.3.10	Calibración	100

5.3.11	Validación y análisis de sensibilidad	107
5.3.12	Discusión de la implementación del modelo	109
5.4	Escenario a futuro.....	111
6	Conclusiones.....	114
	Referencias.....	120
	Apéndice digital	124

Lista de Figuras

Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de modelación de agua subterránea, (adaptado de Anderson et al., 2015).....	15
Figura 3.1 Mapa de ubicación del acuífero administrativo Calera 3225	24
Figura 3.2 Precipitación y temperatura de la estación 32003 promediada mensualmente en el periodo de 1958 a 2018.....	26
Figura 3.3 Mapa de uso de suelo y vegetación	27
Figura 3.4 Mapa de la distribución espacial de los aprovechamientos del año 2004	39
Figura 3.5 Diagrama del porcentaje de error en el balance de cargas	40
Figura 3.6 Distribución por porcentaje de familias de agua	46
Figura 3.7 Zonificación para referencia de diagramas.....	48
Figura 3.8 Diagramas de Piper de la Familia HCO ₃ -Ca	49
Figura 3.9 Diagramas de Piper de la Familia HCO ₃ -Mix.....	49
Figura 3.10 Diagramas de Piper de la Familia HCO ₃ -Na y Figura 3.11 Familias de agua restantes	49
Figura 3.12 diagramas de Stiff.....	50
Figura 3.13 Diagrama de Lloyd y Heathcote.....	51
Figura 3.14 Concentraciones de litio en ug/l y Figura 3.15 Temperatura en °C	52
Figura 3.16 Concentraciones de arsénico en el acuífero.....	53
Figura 3.17 Concentraciones de fluoruro en el acuífero.....	54
Figura 3.18 Concentraciones de hierro en el acuífero	55
Figura 3.19 Mapa de ubicación de las secciones A, B y C.....	59
Figura 3.20 Sección A-A' de la evolución geoquímica del agua	60
Figura 3.21 Sección B-B' de la evolución geoquímica del agua	61

Figura 3.22 Sección C-C' de la evolución geoquímica del agua	62
Figura 4.1 Análisis de sensibilidad del modelo de Krienen (2018).....	68
Figura 4.2 Desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones pronosticado para el año 2022	71
Figura 4.3 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2017	74
Figura 4.4 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2018	74
Figura 4.5 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2020	75
Figura 4.6 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2022	75
Figura 5.1 Planta de la discretización espacial del modelo	81
Figura 5.2 Sección transversal del modelo para visualizar las 20 capas	82
Figura 5.3 Ubicación de las secciones geoelectricas. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019).....	85
Figura 5.4 Sección geológica 1. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019)....	86
Figura 5.5 Sección geológica 2. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019)....	86
Figura 5.6 Secciones geológicas de la 3 a la 8. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauich- Kau (2019)	86
Figura 5.7 Secciones geológicas distribuidas espacialmente (Izq.) e incorporación de la topografía (Der.)	87
Figura 5.8 Desarrollo del sistema de fallas (Izq.) y Desarrollo de la geología (Der.)	87
Figura 5.9 Triangulación para adaptar al software de modelación hidrológica Feflow	88
Figura 5.10 Áreas de recarga discretizadas a partir de las HRU de SWAT	91
Figura 5.11 Ubicación de los pozos de observación.....	94
Figura 5.12 Evolución de los volúmenes de extracción. Elaborado por Krienen (2018) y ajustado por Padilla (2023)	96
Figura 5.13 Mapa de ubicación de los pozos de bombeo	97
Figura 5.14 Piezometría del año 1997 utilizada como condición inicial en el modelo	98

Figura 5.15 estimación del balance hídrico para el año 2015 en hm^3	99
Figura 5.16 Calibración en estado transitorio para el año 1997	102
Figura 5.17 Calibración en estado transitorio para el año 2011	103
Figura 5.18 Calibración en estado transitorio para el año 2013	103
Figura 5.19 Calibración en estado transitorio para el año 2015	104
Figura 5.20 Calibración en estado transitorio para el año 2017	104
Figura 5.21 Valores de K calibrados. Vista 2D capa 1 valores de K_h (Izq.) y vista 2D capa 2 valores de K_v (Der.).....	106
Figura 5.22 Calibración en estado transitorio para el año 2022	107
Figura 5.23 Análisis de sensibilidad mediante los parámetros de K y Ss.....	108
Figura 5.24 Diagrama de dispersión del modelo para el año 2060.....	112
Figura 5.25 Comparativa de la piezometría simulada en los años 2022 y 2060.....	113

Lista de tablas

Tabla 3.1 Coordenadas del límite del acuífero Calera	25
Tabla 3.2 Estratigrafía y Unidades Hidroestratigráficas (UH)	36
Tabla 3.3 Propiedades Hidráulicas	38
Tabla 3.4 Estadística básica de las muestras 2004.....	42
Tabla 3.5 Estadística básica de las muestras 2004 (continuación)	43
Tabla 3.6 Matriz de correlación	44
Tabla 3.7 Relación de las Familias de agua con la temperatura y las concentraciones de Litio y STD.....	52
Tabla 4.1 Comparación del modelo conceptual y la construcción del modelo numérico de Krienen.....	65
Tabla 4.2 coordenadas de ubicación de los pozos de observación	70
Tabla 4.3 Concentrado de los resultados de la estadística	73
Tabla 5.1 Unidades geoelectricas, resistividad y UH. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019).....	84
Tabla 5.2 Estimación de la recarga a partir de SWAT (hm ³).....	90
Tabla 5.3 Datos históricos disponibles de pozos de observación	92
Tabla 5.4 Datos oficiales del REPDA y del Censo descrito por Krienen (2018)	96
Tabla 5.5 Datos de Hernández Herrera (2014)	96
Tabla 5.6 Resumen de los datos de balance introducidos en el modelo numérico estimados en hm ³	100
Tabla 5.7 Resumen del análisis estadístico de los datos de calibración del modelo actualizado	105

Tabla 5.8 Comparación entre los valores del modelo conceptual y los simulados en el modelo actualizado. Extracción por año y Recarga acumulada, ambos en hm ³	105
Tabla 5.9 Resumen de valores de conductividad calibrados	106
Tabla 5.10 Resumen estadístico de valores de calibración año 2022	107
Tabla 5.11 Resumen comparativo con modelos previos en el sitio de estudio.....	110

Resumen

Cuando se requiere de una indagar en el agua subterránea para tomar una decisión sobre su disposición o proponer alternativas para recarga o uso sostenible, los modelos numéricos son una gran plataforma para interpretar el flujo de agua subterránea, a su vez permiten generar escenarios predictivos que sustentan las decisiones de gestión. En el acuífero de Calera, Zacatecas, actualmente existe un modelo numérico de flujo subterráneo para el periodo de 1997-2015, y aunque es probable que existan decenas de miles de pronósticos por modelos de aguas subterráneas desde la década de 1960, no existen post auditorías de modelos numéricos en México, ya que los modelos suelen estar diseñados para resolver un problema inmediato, una vez que el modelo ha cumplido este propósito, por lo general se “archiva”. Considerando que existen variaciones impredecibles que pueden generar nuevos cambios en el sistema de aguas subterráneas, los pronósticos del modelo existente pueden distar de los datos reales de campo, por lo tanto, el objetivo general es evaluar las predicciones del modelo numérico de flujo subterráneo calibrado hasta el 2015 del acuífero Calera, Zacatecas, comparándolas con los datos de campo del periodo 2016-2022 y actualizar el modelo. Para cumplir con el objetivo, inicialmente se caracterizaron las condiciones hidrogeológicas del sitio mediante un modelo conceptual, posteriormente se validó el modelo numérico de flujo de agua subterránea existente mediante el uso del programa de cómputo FEFLOW. Después se analizaron las diferencias y semejanzas entre los pronósticos del modelo existente y los datos reales del periodo 2016-2022 por medio de la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE por sus siglas en inglés), y finalmente se actualizará el modelo numérico considerando los datos del periodo 1997-2022 para generar nuevos pronósticos en FEFLOW. Como resultados, se realizó el modelo conceptual del sitio, se interpretaron los sistemas de flujo del acuífero, se actualizó la geología del sitio, se incorporó un modelo de infiltración desarrollado en SWAT, se realizó un análisis NRMSE entre los datos de campo y las predicciones del modelo existente y actualmente el modelo se encuentra en la etapa de calibración. En conclusión, este tipo de modelos permite comprender de una manera profesional el funcionamiento de los acuíferos para llevar a cabo una mejor administración de estos, sin embargo, si no se cuenta con información histórica y detallada de carácter hidrogeoquímico distarán de resultados reales.

Abstract

When it is necessary to investigate groundwater to make decisions regarding its disposal or propose alternatives for recharge or sustainable use, numerical models serve as a valuable platform for interpreting groundwater flow and, in turn, enable the generation of predictive scenarios to support management decisions. In the Calera aquifer, Zacatecas, there is currently a numerical groundwater flow model for the period from 1997 to 2015. Although there are likely tens of thousands of groundwater model forecasts dating back to the 1960s, post-audits of numerical models are not common in Mexico, as models are often designed to address an immediate problem and are typically "archived" once their purpose has been fulfilled. Considering that unpredictable variations can lead to new changes in the groundwater system, the predictions of the existing model may deviate from actual field data. Therefore, the overall objective is to evaluate the predictions of the calibrated numerical groundwater flow model for the Calera aquifer in Zacatecas, up to 2015, by comparing them with field data from the period 2016-2022 and updating the model. To achieve this objective, the hydrogeological conditions of the site were initially characterized through a conceptual model. Subsequently, the existing numerical groundwater flow model was validated using the FEFLOW computer program. Differences and similarities between the forecasts of the existing model and actual data from the 2016-2022 period were analyzed using the Normalized Root Mean Square Error (NRMSE). Finally, the numerical model will be updated, considering data from the period 1997-2022, to generate new forecasts in FEFLOW. As a result, a conceptual model of the site was developed, and the aquifer's flow systems were interpreted. The site's geology was updated, and an infiltration model developed in SWAT was incorporated. An NRMSE analysis was performed between field data and the predictions of the existing model, and the model is currently in the calibration phase. In conclusion, these types of models provide a professional understanding of aquifer functioning to facilitate better management; however, without historical and detailed hydrogeochemical information, they may deviate from real results.

1 Introducción

1.1 Importancia del agua subterránea

El agua subterránea desempeña un papel crucial en el abastecimiento de agua para la humanidad, ya que constituye una fuente de agua potable fundamental, satisfaciendo completamente o en parte las necesidades de hasta el 50% de la población mundial, además, cerca del 43% de toda el agua utilizada en la agricultura proviene de las aguas subterráneas (GW-Proyect 2023).

A nivel mundial (CONAGUA 2019a) estima la disponibilidad de agua promedio anual en 1 386 billones de hectómetros cúbicos (hm^3), de los cuales, 35 billones de hm^3 son agua dulce (2.5%), de esta agua dulce, el 70% no están disponibles al encontrarse en glaciares, nieve o hielo; 10.5 millones de hm^3 se encuentran como agua subterránea y solamente 0.14 billones de hm^3 se encuentran en lagos, ríos, humedad en suelo y aire, humedales y plantas.

Price (2003), estimó que el 95% del agua potable disponible en el mundo corresponde a aguas subterráneas. Del total de agua potable en el mundo, el agua que se utiliza para riego (agricultura y pastos para el ganado) representa un 75%; mientras que el agua que utiliza la industria es aproximadamente un 10% y el consumo doméstico representa el 15% restante (WWAP 2016).

A pesar de lo que comúnmente se piensa, la idea de que existe escasez de agua en el planeta es una falacia, en realidad, lo que se está experimentando es un creciente desequilibrio entre la disponibilidad y la demanda de agua, en gran medida debido al aumento de la población, la contaminación de las fuentes hídricas y una deficiente planificación y gestión de los recursos. (BGR Hannover 2015). A menudo, La gestión de los recursos hídricos carece de criterios técnicos y científicos, lo que puede llevar a estrategias de aprovechamiento inapropiadas (Vargas & Mollard 2005).

El control de los niveles de agua subterránea no resulta sencillo evidentemente, lo que implica que los suministros pueden contaminarse inadvertidamente o ser utilizados de manera intensiva, esto último significa que se extrae más agua del subsuelo de lo que puede ser repuesta de forma sostenible. (WWF 2022)

1.2 Relevancia del agua subterránea en México

De manera frecuente en México cuando se habla del agua dulce se suele pensar en ríos caudalosos como el Usumacinta, el Balsas o el Lerma, o en grandes lagos, como Chapala y Pátzcuaro, sin embargo, a pesar de la vasta extensión de estos cuerpos superficiales, son apenas la punta de un iceberg, ya que en nuestro país el 95% del agua dulce se localiza en el subsuelo, y de ahí proviene el 75% de la que se consume en nuestras ciudades (Cubas *et al* 2017).

La relevancia del agua subterránea se evidencia en la considerable cantidad de volumen que utilizan los principales usuarios. De todo el volumen concesionado para usos consuntivos, el 39.2%, que corresponde a 34,839 hm³ por año hasta 2018, proviene de fuentes subterráneas. Con el objetivo de gestionar adecuadamente el agua subterránea, el país ha sido dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación el 5 de diciembre de 2001 (CONAGUA 2019b).

Para realizar una gestión integral de los recursos hídricos se requiere de una propuesta de uso sostenible del agua con la que se pueda determinar la distribución espacio-temporal que sea conveniente para el uso de las diferentes fuentes de suministro, con la finalidad de satisfacer las demandas actuales, a su vez, esta propuesta debe considerar la definición y cuantificación de las fuentes y demandas de suministro disponibles, garantizando el suministro de agua en función de la regulación de la capacidad del sistema o sistemas, con restricciones económicas, administrativas y ambientales (MCI, IGME & DA 2010).

En nuestro país la organización encargada de gestionar y proteger los recursos hídricos es la Comisión Nacional del Agua (CNA), sin embargo, existen otros organismos auxiliares como los comités técnicos de agua subterránea (Cotas), que son, a su vez, auxiliares de los consejos de cuenca, compuestos esencialmente por usuarios de las aguas subterráneas, por los representantes de la sociedad organizada y por los representantes gubernamentales, teóricamente pueden proponer la planeación hidráulica local y estatal, implementar la vigilancia del cumplimiento de reglamentos, promover el uso eficiente del agua, revertir los problemas de contaminación y, difundir la cultura del agua, entre otros (Sandoval 2008).

1.3 Modelación numérica

La palabra modelo tiene varios sentidos o significados y se utiliza tanto que a veces es difícil discernir el significado de la palabra, una manera muy simple de definir un modelo es quizá que es la representación de un sistema o proceso real (Konikow y Bredehoeft 1992). En un sentido más amplio, un modelo se considera como una representación simplificada de la complejidad del mundo natural y puede presentarse mediante una abstracción *conceptual* o *numérica* del problema. En el caso específico de los modelos numéricos, se basan en dos tipos de modelos matemáticos: aquellos basados en datos, también conocidos como "caja negra", que emplean ecuaciones empíricas o estadísticas para calcular una variable desconocida; y aquellos basados en procesos, que utilizan principios físicos para describir los procesos y principios del flujo de agua subterránea en un dominio definido, con un enfoque de solución tipo estocástico o determinístico (Anderson *et al.* 2015).

Existen dos tipos de modelos matemáticos para abordar este problema: los *modelos analíticos* y los *modelos numéricos*. Los modelos *analíticos* requieren simplificar considerablemente el mundo natural, lo que permite resolver matemáticamente ecuaciones simples con pocos parámetros (Samper y Lorenzo 2008). Estas formulaciones pueden ser calculadas manualmente, como en el caso de la ecuación de flujo en medios porosos (Darcy 1856), o de manera automática utilizando hojas de cálculo, programas de ordenador o software especializado que resuelve las ecuaciones de flujo (Barlow & Moench 1998).

Por otro lado, a pesar de que los modelos *numéricos* conservan las ecuaciones y formulaciones de los modelos analíticos (Haitjema 2006), estos últimos tienen una aplicación limitada a casos específicos y no complejos. Es precisamente aquí donde los modelos numéricos, mediante su enfoque de solución basado en diferencias finitas (FD) o elementos finitos (FE), adquieren la capacidad de abordar problemas más complejos en 2D y 3D, especialmente cuando el medio exhibe múltiples configuraciones que se asemejan al sistema real. (Anderson *et al.* 2015; Bear 1988).

El inicio fundamental de cualquier proceso de modelado de aguas subterráneas es reconocer el propósito del modelo. La creación de modelos numéricos no se considera un objetivo en sí mismo, sino que su diseño está orientado a abordar uno o varios conjuntos de interrogantes. Estos cuestionamientos proporcionarán al modelador una dirección o instrumento con el cual anticipar, reproducir y entender situaciones previas y futuras en el contexto del mundo real (Anderson *et al.* 2015).

1.4 Modelos numéricos de flujo de agua subterránea en Calera, Zacatecas

Desde el siglo XIX el acuífero Calera ha sido objeto de diversos estudios debido al importante sector minero de la época, en la actualidad se siguen realizando estudios hidrogeológicos con la finalidad de desarrollar propuestas de gestión que favorezcan el desarrollo de la población, la agricultura y el sector industrial. Los estudios que mayor impacto tienen en el desarrollo de estas propuestas o planes de manejo son los modelos numéricos, ya que estos proveen de una simulación a futuro de los niveles piezométricos del acuífero. A continuación, se describen algunos de los modelos numéricos más recientes desarrollados en el sitio de estudio:

Simulación del acuífero de Calera, Zacatecas (1992). Tesis de maestría desarrollada por Magallanes-Quintanar R. quien realiza una simulación numérica del acuífero de Calera, Zacatecas, mediante el programa PLASM_CT, el cual está basado en el modelo de Prickett y Lonquist. Dicho programa fue modificado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y permite la simulación numérica de un acuífero, basado en un modelo de diferencias finitas. Los resultados de la simulación muestran que el programa simula adecuadamente el comportamiento del acuífero pues calibró correctamente los períodos conocidos. Asimismo, se manifiesta que el incremento en la explotación del acuífero ocasiona abatimientos que obligan a hacer un uso más racional del recurso.

Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca. Realizado por Ariel Consultores, S.A., en el año 1996, para la Comisión Nacional del Agua. Como todo modelo de simulación, su objetivo principal simular diferentes escenarios de extracción del acuífero, para conocer su efecto en los abatimientos y con

ello proponer el más adecuado para lograr el mejor manejo del recurso. Mediante el conocimiento de la geología del subsuelo y la geología estructural del acuífero, identifica las distintas unidades hidrogeológicas y su funcionamiento en cuanto sus parámetros hidráulicos. El modelo concluye que en el primer periodo de estrés el almacenamiento aporta el mayor volumen de agua y éste disminuye paulatinamente hasta el octavo y último periodo. Para ese año la extracción por bombeo era de 130 hm³/año, que sólo provocaba abatimientos medios anuales de 1 m en las áreas aledañas a Fresnillo y Víctor Rosales, en donde se concentraba la extracción. De continuar con este mismo régimen de extracción o incrementarlo, se generarían mayores conos de abatimiento que provocarían daños económicos ocasionados por el descenso de los niveles del agua subterránea.

Actualización piezométrica del acuífero Calera, Zacatecas. Realizado por Consultoría BETSCO, en 2004, para la Comisión Nacional del Agua. El objetivo del estudio fue actualizar el conocimiento de la posición de los niveles del agua subterránea en la red de medición del acuífero y definir su evolución como resultado de los esfuerzos hidrodinámicos inducidos por las condiciones de recarga y extracción a que está sujeto. Mediante las configuraciones del nivel estático, identifica las principales zonas de recarga, las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, así como los conos de abatimiento más importantes que han distorsionado la red de flujo natural. Al sur del acuífero, en las inmediaciones de la localidad Francisco I. Madero, identifica un parteaguas subterráneo que separa el flujo que se dirige hacia Calera de que va hacia el acuífero vecino Benito Juárez.

Distribución y movilidad de elementos traza en el agua subterránea de la cuenca hidrológica de Calera, Zacatecas. Realizado por Eva Saraí Villalpando Dávila en el año 2007. Tesis Profesional, Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra. En este trabajo se realiza la caracterización hidrogeoquímica del acuífero de Calera, considerado la principal fuente para el abastecimiento agrícola, industrial y potable. Se realizaron análisis fisicoquímicos a 99 muestras de agua subterránea, se determinaron los elementos mayores y 26 elementos traza. Los resultados establecieron tres tipos de agua: bicarbonatada sódica, bicarbonatada cálcica y bicarbonatada mixta. La calidad del agua subterránea se consideró en general como buena, dado la concentración de los elementos se encontró dentro de la normatividad aplicable, con excepción del arsénico que empieza a presentar valores más cercanos a los máximos permisibles cada año, y

en el caso de algunos aprovechamientos muy puntuales, ubicados al norte de la zona muestreada, donde los sólidos totales disueltos, el sodio y nitratos están por encima de la norma mexicana.

Modeling groundwater levels on the Calera aquifer in central México using Modflow (2012) Se ha creado un modelo conceptual para el Acuífero Calera para representar el sistema acuífero debajo de la Región Acuífera Calera (CAR) en el Estado de Zacatecas, México. El área CAR se dividió uniformemente en una cuadrícula de 500 X 500 m generando un modelo de alta resolución que representaba los límites naturales del acuífero. Se calibró y validó un modelo informático para verificar los resultados del modelo correspondientes a situaciones que coincidían con el rendimiento histórico del acuífero. El principal objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar un sistema de modelado de aguas subterráneas usando ModFlow-2000 para la CAR. La evaluación de los resultados arrojó coeficientes de determinación promedio de 0,81 y 0,67 y valores de error cuadrático medio inferiores a 25,1 m y 25,9 m para los procesos de calibración y validación, respectivamente. Estos resultados son indicativos de una buena concordancia entre los niveles de agua subterránea pronosticados y observados.

Understanding deep groundwater flow systems to contribute to a sustainable use of the water resource in the Mexican altiplano. Tesis de doctorado desarrollada por Lisa Krienen en 2018, es esta investigación realiza dos simulaciones, una para el acuífero de San Luis Potosí y la segunda para el acuífero Calera. Este último es el objeto de estudio de la presente investigación, en el cual se centra la comparación de los pronósticos del modelo con datos obtenidos en campo en el periodo 2016 al 2022. También es el punto de partida para actualizar el modelo que es el segundo objetivo más relevante de esta investigación.

Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante un modelo numérico en el acuífero de Calera Zacatecas. El modelo más reciente (2023), desarrollado en la tesis de maestría de Leonardo Amaya. Modelo desarrollado en Visual Modflow 2009, distribuido en celdas de 500x500m y seccionado en 8 capas alcanzó una calibración promedio de 9.64 %.

1.5 Post auditorías de modelos numéricos

Una de las áreas de oportunidad de un modelo numérico es que permite, en una etapa posterior (post auditoría), comparar sus resultados con datos reales (datos de campo) para evaluar su adaptación y proporcionar valores de variables que permitan de una manera significativa ajustarse al modelo (Schuster & White 1988).

Un hecho importante a resaltar es que, de acuerdo con Konikow (1968), una post auditoría de un modelo numérico compara las predicciones del modelo con observaciones de campo al menos varios años después de que se haya realizado la predicción. Acorde al título de la presente investigación, el cual tiene basta relación con esta definición, se puede objetar que el presente estudio es también una post auditoría.

Aunque es probable que existan decenas de miles de pronósticos por modelos de aguas subterráneas desde la década de 1960, se informan pocas auditorías en la literatura. En términos prácticos, los modelos suelen estar diseñados para resolver un problema inmediato de modo que se pueda tomar una decisión de gestión. Una vez que el modelo ha cumplido este propósito, por lo general se “archiva” (Anderson *et al.* 2015).

1.6 Justificación

Alrededor del mundo existen cientos o miles de modelos numéricos de flujo de agua subterránea, sin embargo, como se menciona con anterioridad, el seguimiento que se le da a los mismos en la gran mayoría de los casos es nulo. En el caso del acuífero Calera, al ser un sitio donde la economía más importante depende de sus propios recursos hídricos, de manera local se requiere dar un seguimiento a las investigaciones ya realizadas, para lo que se consideran dos puntos claves; el primero es conocer la asertividad alcanzada con las estimaciones del modelo numérico previo (Krienen 2018) por medio de una comparación de las predicciones del modelo con datos observados en campo varios años después de que se realizaron las predicciones, que bien se puede denominar como post auditoría. En resumen, el realizar esta comparación (post auditoría) además de permitir validar o rechazar la calibración y diseño previamente establecidos, funcionará como herramienta para identificar oportunidades de mejora.

Desde hace algunos años, el acuífero de Calera presenta características de aprovechamiento intensivo, esto hace referencia a que el cálculo de la extracción de agua subterránea supera la recarga estimada, por ende, se presenta un balance negativo de acuerdo con la información oficial de CONAGUA reportada para el acuífero de Calera (3225) en el año 2020. Al identificar oportunidades de mejora y recopilar la información más amplia y actualizada del acuífero se podrá desarrollar el segundo punto clave de este estudio, el cual es actualizar el modelo numérico de flujo subterráneo, el cual será de utilidad para desarrollar las herramientas que permitan tomar decisiones en beneficio del uso del acuífero Calera ante la necesidad creciente de cubrimiento de la demanda de agua subterránea para apoyar en el desarrollo de la población y el crecimiento de la producción del campo y la industria.

1.7 Objetos de la investigación

1.7.1 General

El objetivo general de esta investigación fue evaluar las predicciones del modelo numérico de flujo subterráneo calibrado hasta el 2015 del acuífero Calera, Zacatecas contrastando sus predicciones con los datos de campo que tuvieron lugar en el periodo 2016-2022 y actualizar el modelo.

1.7.2 Específicos

Para lograr el objetivo principal de la tesis, se establecieron los siguientes cuatro objetivos específicos:

- a) Caracterizar las condiciones geológicas e hidrológicas del sitio mediante un modelo conceptual.
- b) Validar el funcionamiento del modelo numérico de flujo de agua subterránea existente mediante el uso del programa de cómputo FEFLOW.
- c) Evaluar los pronósticos del modelo numérico existente y los datos reales del periodo 2016-2022 por medio de un análisis estadístico.
- d) Desarrollar un modelo geológico integrando los estudios geológicos más recientes, un sistema de fallas y un modelo hidrológico desarrollado en SWAT.
- e) Actualizar el modelo numérico considerando los datos del periodo 1997-2022 para generar nuevos pronósticos en FEFLOW.

1.8 Hipótesis

“El pronóstico establecido mediante un modelo numérico de flujo subterráneo en el acuífero de Calera, Zacatecas, tiene al menos 90% de precisión en contraste con datos observados en campo para el periodo de tiempo de 2016 a 2022”

2 Metodología para la evaluación del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera

Para el presente proyecto de investigación se aplicaron diversos métodos para obtener información sobre las características del acuífero, del cual la mayor parte se desarrolló en gabinete mientras que un pequeño porcentaje se desarrolló en campo mediante visitas al sitio de estudio para recolección de datos. Con el fin de lograr el objetivo general, la presente metodología se dividió en dos partes, la sección 2.1 abarca la evaluación del modelo numérico en cuestión mientras que la sección 2.2 aborda el tema de la actualización del modelo numérico. Esta metodología fue adaptada la “Propuesta de metodología para la elaboración y evaluación de modelos conceptuales y numéricos de aguas subterráneas” desarrollada por Castañeda (2017) y la “Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA” desarrollada por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2012) del gobierno de Chile, la cual define una serie de recomendaciones mínimas que debe contener todo modelo numérico hidrogeológico.

2.1 Evaluación del modelo numérico (Post auditoría)

2.1.1 Planeación

Un modelo numérico regularmente se diseña con la finalidad de abordar cuestiones específicas, estas van en la misma dirección que los objetivos para los cuales fue desarrollado, por lo tanto, es esencial que en los informes se describan de manera clara y concisa las limitaciones posibles en relación con la construcción y los resultados del modelo, tratando de garantizar que la evaluación se realice en función del propósito para el cual se desarrolló la modelación. En dicho informe también es factible establecer claramente la responsabilidad tanto de los modelos como de su mantenimiento una vez que el proyecto haya sido completado. En este sentido, se sugiere que durante esta etapa se evalúen al menos los siguientes aspectos:

- Los objetivos deben ser claros en cuanto a cómo el modelo contribuirá a la realización o al avance de un estudio completo.
- El grado de confianza actúa como un estándar de control para la evaluación y también establece los posibles usos de los resultados. Es necesario identificar de manera inicial los niveles de confianza como objetivos, con el propósito de establecer y definir las expectativas que se generarán a partir del modelo. Estos niveles de confianza pueden cambiar a medida que avanzan los procesos de modelado.

2.1.2 Modelo conceptual

La base de la que parte el modelo numérico es el modelo conceptual, el cual describe tanto el sistema hidrogeológico como los procesos presentes en el área de interés. Este modelo abarca las características que ejercen influencia sobre el comportamiento de las aguas subterráneas, tales como su cantidad, calidad, movilidad, conexiones, recargas, descargas y otros aspectos relevantes. Además, identifica aquellas características que ayudan a definir el problema delineado por los objetivos del estudio. Este proceso conceptual se construye con base en mediciones y observaciones, lo que engloba la recolección de datos y su análisis, esto hace necesario realizar una evaluación y revisión exhaustiva de los datos, permitiendo detectar errores evidentes y deducir otros, lo que resulta fundamental para tomar decisiones en función de la disponibilidad o ausencia

de información, además de reevaluar los objetivos del modelado. En este apartado se evaluaron los siguientes aspectos:

- El nivel de detalle del modelo, la disponibilidad de datos y la complejidad del sistema analizado.
- Se debe llevar a cabo una revisión minuciosa de la representatividad espacial y temporal del problema en cuestión, asegurando que se contemplen los escenarios propuestos y los procesos de flujo que regulan el comportamiento de las aguas subterráneas.

2.1.3 Construcción

Esta fase involucra la transformación del modelo conceptual en una forma numérica o matemática. Para esta etapa se requiere tomar decisiones sobre cómo representar de manera óptima la conceptualización en un entorno matemático y computacional, desde asegurarse de que sea compatible con las plataformas de códigos numéricos (FEM, FDM, FVM, entre otros) hasta garantizar que los resultados de la simulación sean razonables y las predicciones confiables. Además, algunas consideraciones requieren analizar la discretización tanto espacial (límites, dimensiones, representación y distribución de propiedades hidráulicas) como temporal (estacionario, transitorio, secuencias de tiempo, representatividad temporal, entre otros), además de emplear condiciones de frontera para capturar la interacción entre las aguas subterráneas y los entornos circundantes. Para este apartado se realizaron las siguientes evaluaciones:

- El diseño del modelo debe reflejar los objetivos planteados, la conceptualización y el nivel de confianza establecido.
- Los tiempos de simulación deben ser considerados cuidadosamente para asegurarse de que las dimensiones y la complejidad sean apropiadas para la calibración y la ejecución dentro del cronograma previsto del proyecto.
- Los elementos o nodos del modelo deben detallarse lo suficiente para representar adecuadamente la geometría del esquema propuesto.
- Los modelos en estado estacionario deben usarse cuando las variaciones en las condiciones hidrogeológicas no son significativas.

2.1.4 Calibración

Una vez que se obtienen los resultados de las simulaciones del flujo y comportamiento de las aguas subterráneas, se comparan los resultados del modelo con los datos observados en campo de niveles de agua, caudales, interferencias y descensos, entre otros. Estas comparaciones generan valores residuales, los cuales pueden ser examinados mediante métodos estadísticos para realizar ajustes que disminuyan estos residuos. Dentro de los procedimientos de ajuste, se lleva a cabo un estudio de sensibilidad en el cual contrastan los resultados de las mejores configuraciones y resultados del modelo, considerando cambios mínimos en uno o más parámetros incorporados, como conductividad hidráulica, almacenamiento específico, recargas, flujo horizontal y vertical, entre otros. Para evaluar esta etapa se consideró lo siguiente:

- La información de campo desempeña un papel crucial en la selección de los parámetros para el ajuste, se evaluó que los parámetros seleccionados garanticen la confiabilidad de las predicciones y permitan futuras adaptaciones en el modelo.
- Se analizaron los resultados estadísticos del proceso de ajuste, considerando aspectos como la correlación entre los valores calculados y los datos observados. Se emplea comúnmente la raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) para evaluar el ajuste.

2.1.5 Predicciones del modelo

Los modelos predictivos se utilizan para tratar de predecir el comportamiento de las aguas subterráneas, sin embargo, el punto clave es el qué pasaría si afectamos ciertos factores, por lo tanto, en esta etapa suelen realizarse ajustes o cambios en las condiciones iniciales de la simulación, estos ajustes pueden afectar al balance hídrico del modelo mediante extracciones o inyecciones, a las características del terreno o a ambos aspectos, por lo tanto, en este apartado se consideraron:

- Grado de incertidumbre, definiendo los rangos basados en la escala temporal de las predicciones.
- Que las predicciones se hayan diseñado de acuerdo con los objetivos específicos del modelo propuesto.

2.1.6 Evaluación y observaciones

En ese contexto, la evaluación de los caracteres constructivos desde la adquisición de datos, el análisis, la conceptualización y las simulaciones numéricas fueron descritas anteriormente, siendo que el esquema de evaluaciones se resume en la siguiente manera:

- Si se establecieron claramente los objetivos y el nivel de certeza del modelo
- Si se satisfacen los objetivos y metas
- Si el modelo conceptual es consistente con la realidad y es presentado claramente
- Si el modelo diseñado sigue estándares prácticos
- Si la calibración es satisfactoria
- Si las predicciones son adecuadas y pueden ser corroboradas
- Si se incluyeron valores de incertidumbre a las predicciones
- Si el modelo fue construido adecuadamente y sus resultados son satisfactorios al usuario

Este proceso de revisión debe garantizar que un modelo cumple con los objetivos para los cuales fue creado y utilizado. También debe asegurar que la conceptualización y la formulación matemática del modelo fueron realizadas de manera adecuada, logrando niveles de confianza apropiados para su utilización en la toma de decisiones. Por lo tanto, las actividades de evaluación fueron las siguientes:

- Cada fase de la construcción del modelo se sometió a revisión.
- Se evaluó si los objetivos y el nivel de confianza del modelo se definieron claramente.
- Se verificó si los objetivos y metas han sido cumplidos.
- Se comprobó si el modelo conceptual es coherente con la realidad.
- Se evaluó si el diseño del modelo sigue estándares prácticos.
- Se analizó si la calibración del modelo es satisfactoria.
- Se verificó si las predicciones son adecuadas y verificables.

- Se determinó si se han considerado las incertidumbres en las predicciones.
- Se evaluó si el modelo ha sido construido de manera apropiada y si sus resultados satisfacen al usuario.
- Se realizaron las observaciones pertinentes para identificar oportunidades de mejora en la presente actualización o futuras actualizaciones.

2.2 Actualización del modelo numérico

Para el desarrollo de la segunda etapa, el proceso para actualización de modelos conceptuales y numéricos de aguas subterráneas es muy similar a comenzar desde cero, sin embargo, la ventaja es que ya se tienen varios antecedentes e información que es de gran utilidad para reconstruir los modelos, por otro lado, toda esa información se debe verificar al igual que el desarrollo del modelo existente en todas sus etapas de construcción, lo que conlleva a más trabajo de lo normal. A continuación, se desarrolla el conjunto de actividades secuenciales que se ejecutaron para actualizar el modelo en cuestión, de manera esquemática y resumida se puede ejemplificar con la figura 2.1.

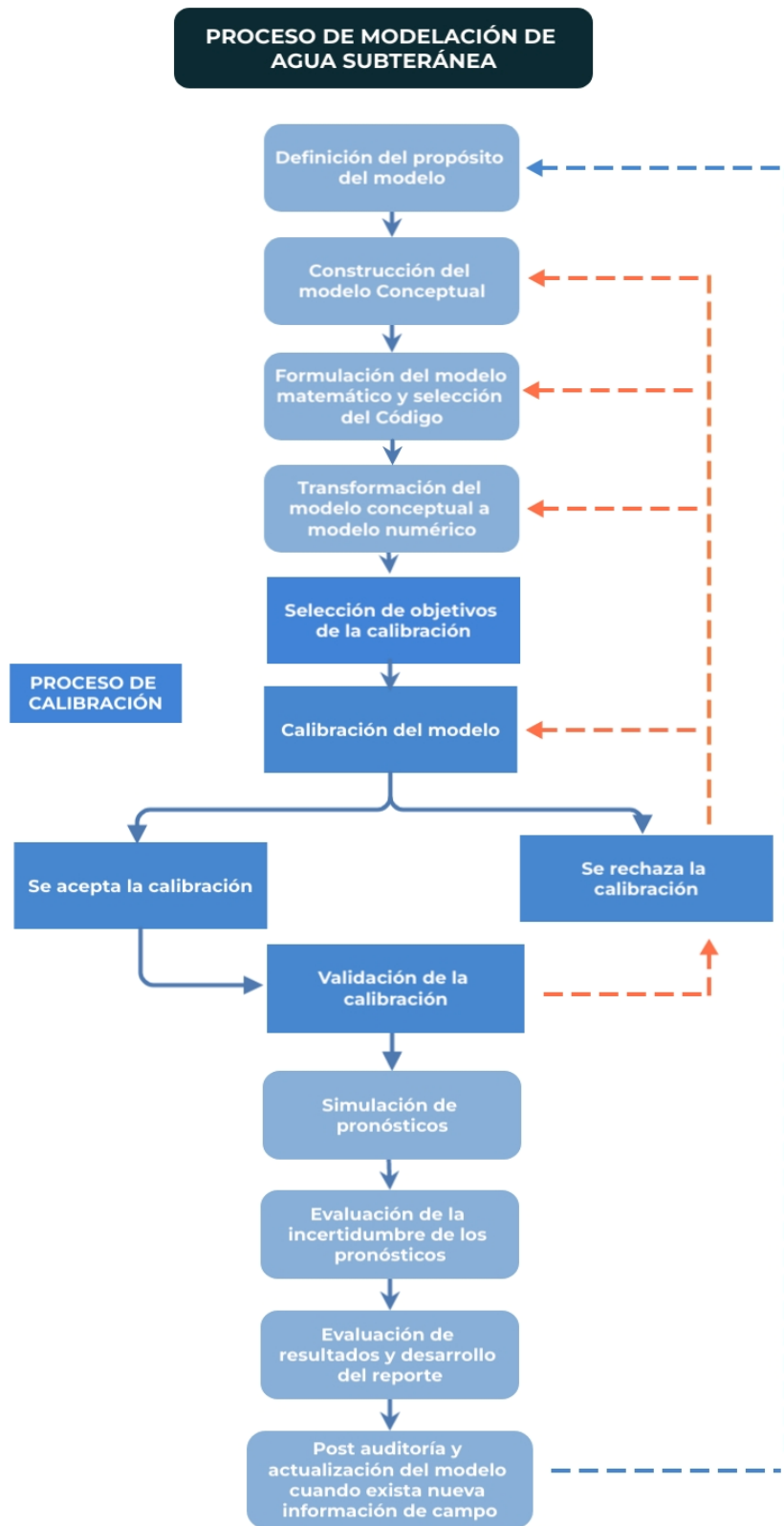


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de modelación de agua subterránea, (adaptado de Anderson et al., 2015)

2.2.1 Objetivos de la actualización

Posterior al desarrollo de la post auditoría del modelo a actualizar, en esta fase se definieron los objetivos, considerando a la par las observaciones y hallazgos en la investigación previa se establecieron los alcances y metas para esta actualización, además de identificar las posibles limitaciones de los resultados a ser modelados. Para establecer estos objetivos es necesario considerar actividades como:

- Establecer el contexto, describir y visualizar la configuración física y el comportamiento de las aguas subterráneas.
- Evaluar las condiciones hidrogeológicas en áreas propicias para la utilización de aguas subterráneas.
- Identificar las áreas influenciadas por factores naturales o actividades humanas.
- Realizar el análisis de sistemas y subcomponentes para su posterior planificación.
- Verificar, utilizando herramientas informáticas, los fenómenos de hidrodinámica y la interacción entre el medio físico y las aguas subterráneas, incluyendo cálculos de balance de flujo, transporte de partículas (si es requerido) y reacciones hidrogeoquímicas.

2.2.2 Recopilación de la información

Se recolectó la información básica que estaba disponible, obtenida de fuentes confiables respaldadas por rigor técnico y científico. Esta información fue:

- El modelo numérico existente y el software para trabajarlo.
- Recolección de información en campo de los niveles piezométricos de la red de monitoreo en el año 2022.
- Modelos de elevación digital del área de estudio.
- Estudios de caracterización geofísica para el desarrollo de la geometría del modelo.
- Información de pruebas hidráulicas de acuíferos, piezometría histórica y datos oficiales de extracción por bombeo.

- Información geoquímica del agua del año 2004.
- Estimación de la recarga del acuífero a través de un modelo de SWAT.
- Información cartográfica disponible con la mayor definición posible.
- Programas de manejo del agua para la región de estudio, documentos gubernamentales, regulaciones operativas y de gestión del agua e investigación en aspectos técnicos y sociales.

2.2.3 Análisis de la información

Posterior a recopilar y depurar las informaciones bibliográficas, se desarrollaron las siguientes actividades:

- Programas de manejo del agua para la región de estudio, documentos gubernamentales, regulaciones operativas y de gestión del agua e investigación en aspectos técnicos y sociales.
- Del modelo existente y posterior a la post auditoría se tomaron en cuenta las observaciones realizadas para el desarrollo de la actualización.
- La recolección de piezometría histórica y de campo fue depurada y procesada para incluirla en el modelo actualizado.
- Los Modelos Digitales de Elevación se unificaron para abarcar el área de estudio y a la par de las secciones geofísicas se trabajaron en el software Leapfrog Geo, en el que se zonificó y delimitaron las unidades hidroestratigráficas, estableciendo las áreas estratigráficas con mejores condiciones hidrogeológicas.
- De la información y los estudios de fuentes de aguas subterráneas y superficiales, se desarrollaron los balances pertinentes, se consideró la recarga del modelo desarrollado en SWAT y se discretizó para incorporarse al modelo.
- Con la información de calidad del agua se determinó la interacción probable entre las facies hidrogeoquímicas, con ello se determinaron los sistemas de flujo y su interrelación con las aguas superficiales.

2.2.4 Modelo conceptual

Para reconstruir el modelo conceptual existe nueva información que sumada a la ya existente genera una gran extensión, por lo que es necesario resumir la información obtenida de la fase anterior, para ello se consideraron los puntos particulares que se describen a continuación.

2.2.4.1 Aspectos físicos

Como aspectos físicos se consideraron los siguientes:

- **Delimitación**

Se definió la configuración espacial del área en función a los objetivos de la investigación, la cual es más grande que la del modelo existente con el fin de abarcar todo el acuífero.

- **Geomorfología**

Se caracterizaron las áreas de interés, esto incluyó la configuración del relieve y cómo afecta a los diversos procesos relacionados con la hidrodinámica tanto en la superficie como en el subsuelo. También, con el modelo de SWAT se definieron, por ejemplo, las áreas en las que las posibilidades de escorrentía, infiltración, recarga y descarga eran más prominentes de manera natural.

- **Tipo y uso de suelos**

En el modelo de SWAT ya se considera a nivel de Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU) la caracterización de material superficial, el cual brinda información relacionada a la potencial movilidad de aguas subterráneas y la interrelación con las aguas superficiales, abriendo la posibilidad de zonas de flujos preferenciales y recargas difusas e inducidas.

- **Estratigrafía**

Se interpretó la secuencia temporal y la distribución espacial de las capas, también conocidas como estratos, con el fin de reconstruir la historia geológica del sitio de estudio, posterior a estas explicaciones, se deducen en última instancia las categorías o conjuntos de tipos de rocas con propiedades relacionadas con las aguas subterráneas. Estas categorías se organizan según la existencia y desplazamiento de las aguas subterráneas.

- **Geología estructural**

Se identificó la evolución de las unidades estratigráficas presentes en la zona, estas formaciones ejercen una influencia en la circulación y la calidad de las aguas subterráneas. Estas estructuras tienen la capacidad de modificar los patrones hidrológicos, afectar la planificación de obras de ingeniería, delimitar áreas de almacenamiento o dispersión, y dar lugar a situaciones críticas, como la propagación selectiva de aguas que pueden tener consecuencias adversas en el entorno.

2.2.4.2 *Hidrología*

- **Hidrografía**

En la descripción hidrográfica se definió el entorno físico y las cualidades que han influido en el comportamiento hidrológico. Tales aspectos como el tamaño total del área, la cuenca de contribución, las zonas de recarga, los parámetros relacionados con la forma del terreno y los tipos de sistemas de drenaje fueron tomados en cuenta, dado que, en conjunto con la geología, sirven para determinar cómo evolucionan las aguas subterráneas.

- **Meteorología**

La información histórica sobre las variables como la lluvia, la evaporación, los caudales y los valores de infiltración es vital para entender cómo funcionan los sistemas hidrológicos de interés. Estas estimaciones se fundamentan con datos obtenidos de fuentes oficiales como el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) y la Comisión Nacional el Agua (CONAGUA).

- **Hidrología subterránea**

En esta sección, se detallaron las diversas características hidráulicas de los medios compuestos por rocas y sedimentos no consolidados. En función del contexto evaluado, se categorizaron esos valores de conductividad, porosidad y almacenamiento específico y se asignaron a regiones específicas, posteriormente, estos resultados se sometieron a procesos de calibración que refuerzan los conceptos establecidos o descartan las suposiciones iniciales planteadas en dichos procesos.

2.2.4.3 *Caracterización Hidrogeológica*

- **Recarga**

Con los cálculos hidrológicos y el modelo de recarga de SWAT, se establecen los sectores más susceptibles para los procesos de entrada de aguas hacia el sistema de interés a nivel de Unidad de Respuesta Hidrológica. Estas HRU al superar el millar se discretizaron en 4 potenciales zonas de recarga variable que, además, fueron extrapoladas a través de una regresión lineal para ser consideradas en años previos para los cuales fue desarrollado el modelo de SWAT que son considerados en el modelo numérico.

- **Flujo subterráneo**

Mediante los datos históricos y las mediciones de campo tomadas en diversos puntos de observación, y el análisis geoquímico del agua, se interpretaron las direcciones de los sistemas de flujo subterráneo, que abarcaban desde las áreas de recarga hasta los lugares de descarga y extracción. Se desarrollaron esquemas conceptuales que representan el flujo de las aguas subterráneas, además de visualizar estos patrones mediante gráficos y mapas.

2.2.5 **Modelación numérica**

Para desarrollar modelos numéricos que respalden los procesos hidrogeológicos y simplifiquen los datos de investigaciones de aguas subterráneas, es esencial comenzar comprendiendo los sistemas y objetivos que se desean representar, la conceptualización de los esquemas hidrogeológicos aclara estos objetivos y sus restricciones. Se deben considerar los principios de cómo el medio físico se comporta de manera anisotrópica y los procesos cíclicos que ocurren en él.

Los modelos numéricos deben ser simples a pesar de la complejidad del sistema real, y representar una síntesis numérica para anticipar escenarios, aunque no necesariamente puedan ser validados en el campo. Es recomendable ponerlos a prueba en la realidad para que puedan ser evaluados y actualizados según sea necesario.

2.2.5.1 Construcción

El inicio de la etapa de modelado numérico surge posterior a la conceptualización de los sistemas hidrogeológicos, lo cual, obviamente, está condicionado por la cantidad y calidad de los datos recolectados en campo, laboratorio y de fuentes bibliográficas. En la creación del modelo numérico, se siguieron los procesos secuenciales que se detallan a continuación:

- **Selección de la herramienta numérica**

Aunque un modelo numérico es la formulación matemática de un esquema hidrogeológico, la selección de los códigos de modelado es un proceso que involucra varios aspectos de análisis. Esto abarca elementos como la discreción del especialista, la complejidad del sistema, la calidad de los datos, la representatividad espacial y temporal lograda, y el conocimiento de los métodos. Por la calidad de los datos y los antecedentes del modelo se optó por continuar con el mismo software que se denomina Feflow en su versión más reciente hasta el momento (8.0), dicho software utiliza uno de los métodos más conocidos, el Método de Elementos Finitos (FEM).

- **Dominio y discretización**

Se incorporó la delimitación preestablecida de la zona de estudio, así como las zonas de recarga y descarga, puntos de extracción por bombeo, entradas y salidas de flujo subterráneo. El proceso de discretización se realizó en todos aquellos elementos son particularmente extensos y generarían una demora excesiva en la resolución del modelo o bien una falla, tales elementos como la estratigrafía, el posicionamiento de las fallas geológicas y las HRU.

- **Condiciones de frontera**

Se establecieron las condiciones pertinentes de entrada y salida por flujo subterráneo horizontal en los límites del acuífero colindantes de manera abierta y directa con otros acuíferos, como el acuífero Benito Juárez, ubicado al sur del acuífero Calera.

- **Parámetros hidráulicos**

Se definió el comportamiento hidráulico de las unidades hidroestratigráficas, las cuales fueron zonificadas, limitadas y extrapoladas de acuerdo con su constitución y tipología, ya que los códigos numéricos necesitan los parámetros hidráulicos a fin de resolver las ecuaciones que sustentan el problema, entre tales parámetros se encuentra la conductividad hidráulica, la porosidad, el coeficiente de almacenamiento, el grado de saturación, entre otros.

2.2.5.2 *Calibración y Análisis de sensibilidad*

En esta etapa final se incorporaron datos derivados de la observación en campo, se proyectaron valores que fueron comparados con datos de observación al final de las iteraciones del proceso; se consideraron las cargas hidráulicas observadas, las cuales se contrastaron con las cargas calculadas resultantes del modelo. Lo mismo se aplicó a los balances de agua procedentes de las condiciones de frontera.

Se ajustaron los datos de entrada para lograr resultados comparables dentro de rangos estadísticos aceptables (como la Raíz Media Cuadrática, el Grado de Correlación, entre otros). En este proceso, se modificaron valores como la conductividad hidráulica, la recarga, los coeficientes de almacenamiento, extracción por bombeo, entre otros. Estas alteraciones, tanto manuales como automatizadas, influyen en los resultados en términos de cantidad y niveles piezométricos, para luego de contrastarlos, ajustar los valores de calibración resultantes de manera más adecuada a los procesos que se buscaban modelar.

3 Modelo conceptual de las condiciones geológicas e hidrológicas del acuífero Calera

3.1 Descripción del sitio de estudio

3.1.1 Ubicación

El acuífero Calera, identificado con la clave 3225 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas (SIGMAS), se localiza en la porción central del estado de Zacatecas, al noroeste de la Ciudad de Zacatecas (figura 3.1). Abarca 2,226 kilómetros cuadrados, y se circunscribe en los Municipios de Fresnillo con el 48 %, Calera con el 16.7 %, Zacatecas con el 9.4 %, General Enrique Estrada con el 8.8 %, Morelos con el 8.1 %, Pánuco con el 6.6 %, Vetagrande con el 1.8 %, Jerez con el 0.5 % y Villa de Cos con el 0.1 %. Administrativamente, corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa VII, Cuencas Centrales del Norte (DOF, 2019). Limita al norte con los acuíferos Aguanaval y Guadalupe de Las Corrientes, al noreste y este con Chupaderos, al sur con Benito Juárez, al suroeste con Jerez y al noroeste también con Aguanaval

Las siguientes coordenadas geográficas con Datum NAD27 (tabla 3.1) señalan los límites del acuífero Calera, clave 3225, y se determinaron en base a la versión magnética del Marco Geoestadístico Municipal del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (DOF, 2019).

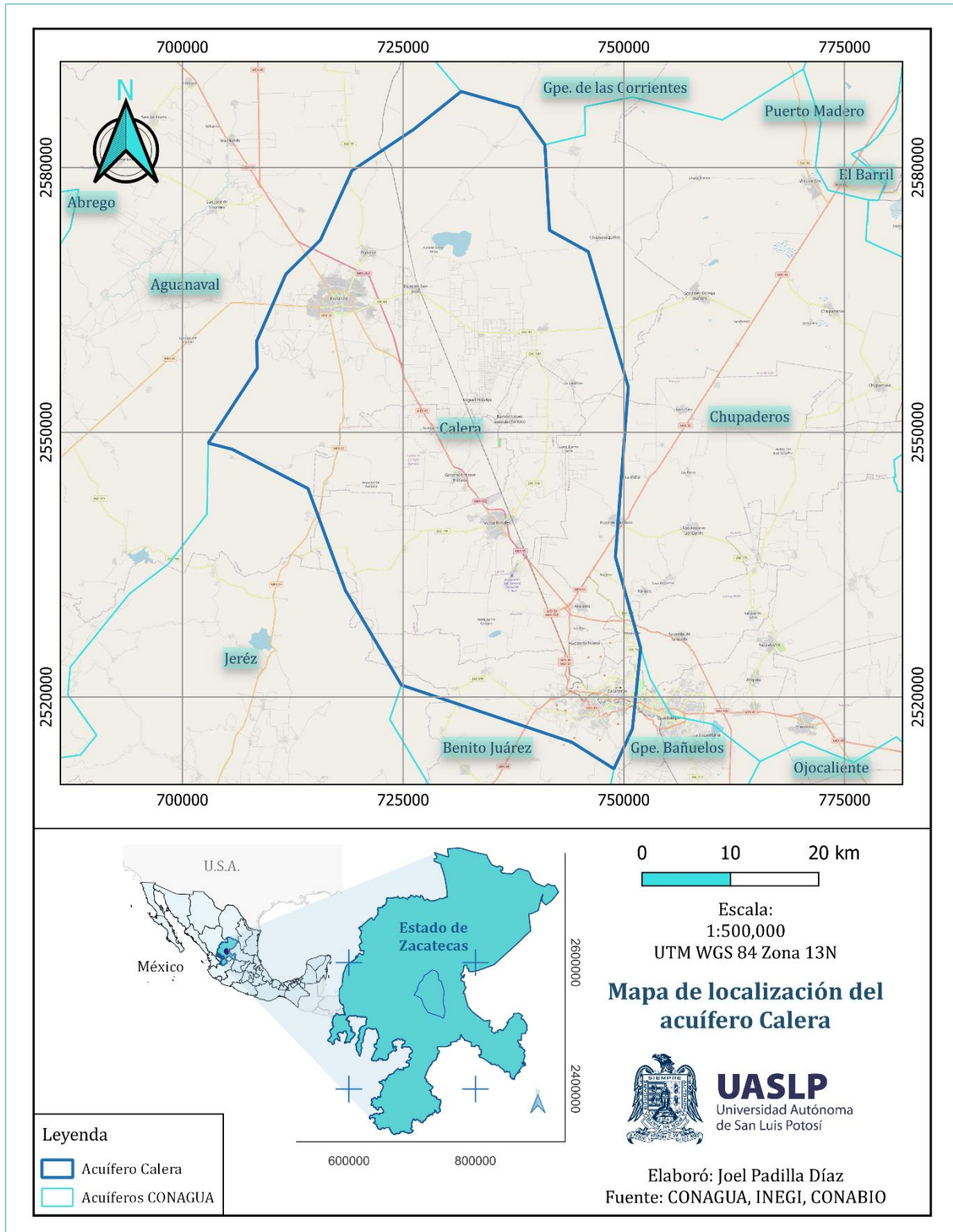


Figura 3.1 Mapa de ubicación del acuífero administrativo Calera 3225

Tabla 3.1 Coordenadas del límite del acuífero Calera

Vértice	Longitud Oeste			Latitud Norte		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
1	102	38	31.9	23	20	5.3
2	102	38	18.9	23	15	50.0
3	102	35	45.8	23	13	28.7
4	102	33	15.7	23	5	8.6
5	102	34	18.2	22	54	43.4
6	102	32	44.0	22	49	6.8
7	102	33	22.0	22	44	8.9
8	102	34	37.8	22	41	43.2
9	102	37	23.0	22	43	23.7
10	102	48	36.1	22	47	3.9
11	102	52	13.0	22	52	55.5
12	102	54	35.7	22	59	12.4
13	102	59	34.9	23	1	41.1
14	102	1	10.1	23	2	4.9
15	102	57	50.5	23	6	39.0
16	102	57	52.0	23	8	17.0
17	102	55	51.7	23	12	23.3
18	102	53	32.1	23	14	27.2
19	102	51	22.4	23	18	40.8
20	102	47	12.7	23	21	10.2
21	102	44	2.3	23	23	26.2
22	102	40	15.2	23	22	22.7
1	102	38	31.9	23	20	5.3

3.1.2 Clima

De acuerdo con lo publicado el 13 de septiembre de 2019 en el Diario Oficial de la Federación, según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García en 1964, para las condiciones de la República Mexicana, en la mayor superficie del acuífero Calera prevalece el clima semiseco por contenido de humedad, templado por temperatura, BS1kw y el clima seco estepario que corresponde con el más seco de este tipo de climas, subtipo semiseco, con grado de humedad mayor que 22.9 por ciento. La lluvia se concentra en verano, cuando el mes de máxima precipitación cae dentro del período mayo-octubre, donde se recibe por lo menos diez veces mayor cantidad de precipitación que en el mes más seco del año, con lluvias aisladas en invierno y estiaje de octubre a junio.

Con los registros obtenidos para el periodo 1958 a 2018 en la estación “Calera” (núm. 32003) se determinaron valores de precipitación media anual de 424.9 mm y una temperatura media anual de 15.6°C. La temporada de lluvias es de junio a septiembre y los meses con mayor precipitación son julio y agosto rebasando los 85 mm por mes. Marzo es el mes con menor precipitación rebasando apenas los 5 mm. La temperatura media es más alta en de junio con 20.1 °C y la temperatura más baja en enero con 10,7 °C (figura 3.2). La evaporación potencial anual media asciende a 2,294.9 mm (CONAGUA 2020).

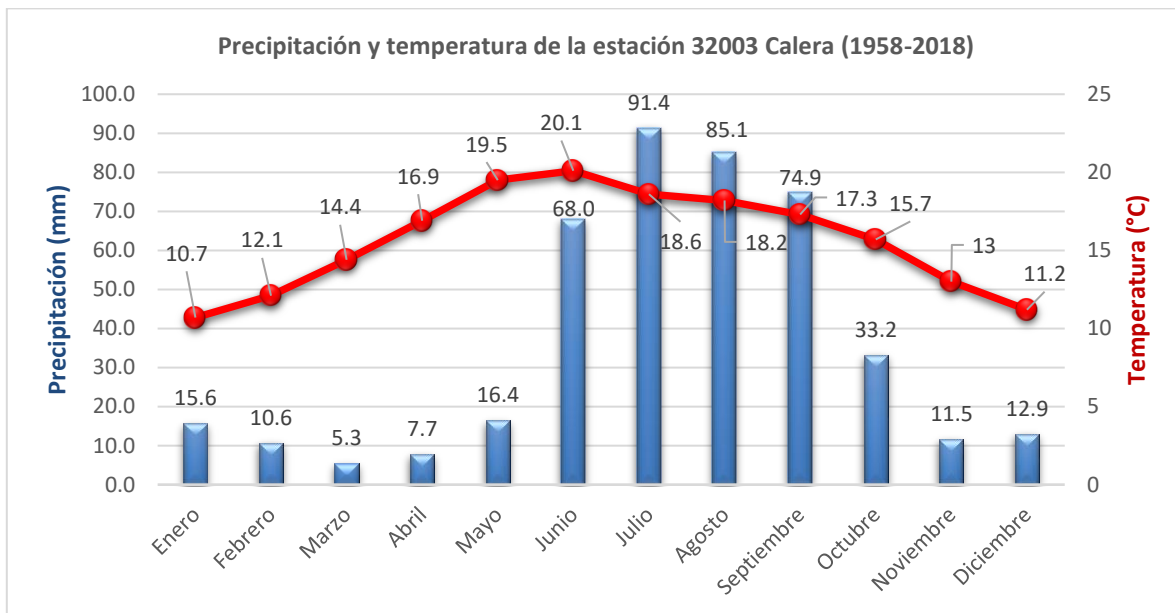


Figura 3.2 Precipitación y temperatura de la estación 32003 promediada mensualmente en el periodo de 1958 a 2018

3.1.3 Uso de suelo y vegetación

En lo que respecta al uso de suelo y la vegetación, se puede apreciar en la figura 3.3 en la parte sur y centro de la región, se encuentra una pequeña área agrícola que utiliza riego. En esta zona, se combinan cultivos que se siembran cada año o de manera semi perene, como la alfalfa, junto con cultivos perennes como las plantaciones de duraznos. Esta área está rodeada por extensiones de tierra más grandes donde se practica la agricultura que depende de las lluvias estacionales. Entre los cultivos anuales destacan el maíz, el frijol y la calabaza.

En la parte norte, se identifica la existencia de otra zona de agricultura de temporal. En esta área predominan los cultivos anuales como el frijol, el maíz, el chile y la cebolla. Estos cultivos se alternan con extensiones de pastizales naturales y terrenos halófilos, así como matorrales mezquital y crasicaule como la vegetación natural dominante. Además, se encuentran algunas zonas con nopaleras, así como áreas más pequeñas con matorral de desierto micrófilo. También se puede observar vegetación y pastizales halófilos, que son indicadores de un suelo salino que pudiera representar un sitio de descarga del acuífero, usualmente este tipo de suelo no es favorable para la agricultura, apenas y se logran cultivar plantas anuales como el maíz, el frijol y la calabaza. En las áreas de pastizales se lleva a cabo la cría de ganado regional, principalmente bovinos y en menor medida equinos.

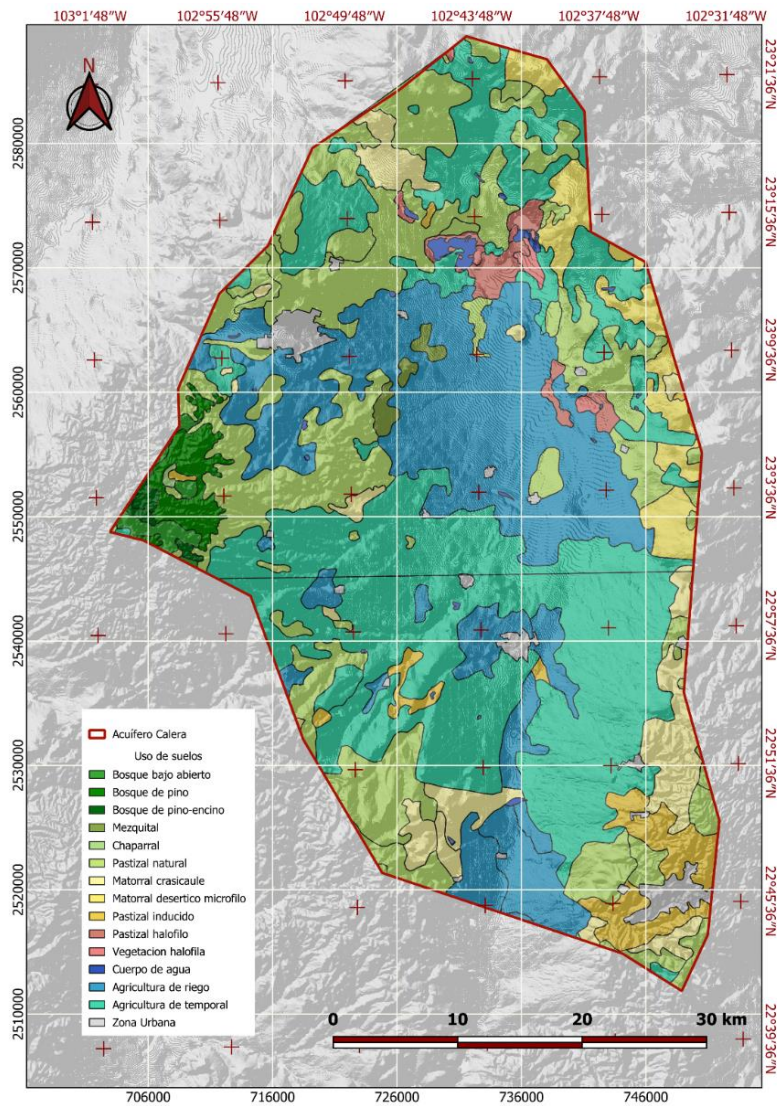


Figura 3.3 Mapa de uso de suelo y vegetación

3.1.4 Fisiografía

Basándonos en la variedad de características topográficas y geológicas, México se organiza en distintas divisiones fisiográficas, y según la clasificación establecida por E. Raisz (1964), el territorio que abarca el acuífero Calera se encuentra en una región donde se unen dos Provincias Fisiográficas: la "Mesa Central" y la "Sierra Madre Occidental". En relación con la porción norte del acuífero, esta se sitúa en la provincia de la "Mesa Central", mientras que la parte sur remanente se localiza en la provincia de la "Sierra Madre Occidental". En específico, la Mesa Central se desarrolla en esta área en extensas llanuras aluviales de la subprovincia denominada "Llanuras y Sierras Potosinas-Zacatecanas", mientras que la Sierra Madre Occidental se presenta como un relieve montañoso en la subprovincia llamada "Sierras y Valles Zacatecanos".

La Mesa Central se identifica como una provincia fisiográfica que se distingue por ser una región elevada con la capacidad de ser subdividida en dos áreas distintas, la porción meridional muestra altitudes que superan los 2 000 metros sobre el nivel del mar, a excepción del valle de Aguascalientes. Esta área se caracteriza por ser montañosa y estar mayormente cubierta por formaciones volcánicas del periodo cenozoico. En contraste, la zona septentrional, de mayor extensión, exhibe un grado más avanzado de erosión en comparación con la parte sur, aquí, se encuentran amplias cuencas continentales llenas de sedimentos aluviales y lacustres, con altitudes por debajo de los 2 000 metros sobre el nivel del mar. La estructura de la corteza terrestre en la Mesa Central presenta un grosor de aproximadamente 32 kilómetros y se halla flanqueada por la Sierra Madre Oriental, con un espesor de alrededor de 37 kilómetros, y la Sierra Madre Occidental, que tiene un grosor cercano a los 40 kilómetros. Bajo la corteza, se presume la existencia de depósitos parcialmente fundidos de material mantélico atrapados en la zona adelgazada. Esto sugiere que la incorporación de materiales fundidos en la base provocó el levantamiento y calentamiento de las capas inferiores y medias de la corteza terrestre. (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

El término Sierra Madre Occidental se emplea tradicionalmente para describir la división fisiográfica que abarca la región occidental de México, esta región se caracteriza por un altiplano que tiene una altitud promedio superior a los 2,000 metros, con una longitud de alrededor de 1,200 kilómetros y un ancho que oscila entre 200 y 400 kilómetros. Se extiende desde la frontera con los

Estados Unidos hasta la Faja Volcánica Transmexicana, y está limitada al oeste por el Golfo de California y al este por el Altiplano Central, también conocido como Mesa Central, de México. La apertura del Golfo de California ha tenido como resultado la formación de extensas cañadas en el flanco occidental de esta región, mientras que la actividad tectónica de extensión ha causado la creación de amplias depresiones tectónicas en el flanco oriental de esta división fisiográfica. (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

3.1.5 Hidrología superficial

El acuífero está situado en la Región Hidrológica Número 37 "El Salado", específicamente en la cuenca Fresnillo-Yescas y su subcuenca Fresnillo. En el extremo occidental, una pequeña área se encuentra dentro de la Región Hidrológica Número 36 "Nazas-Aguanaval". El acuífero constituye una cuenca cerrada de forma irregular con una ligera elongación y una orientación de norte a sur. Su delimitación general es definida por el relieve de la Sierra de Zacatecas en su parte oriental, y por la Sierra de Fresnillo junto con algunas elevaciones de menor altura en su región occidental, según la descripción de CONAGUA en 2020.

En esta zona, la presencia de corrientes superficiales significativas es escasa; predominan más bien arroyos de caudal intermitente. Uno de los arroyos notables es "La Joya", que surge de la convergencia de los arroyos El Bote, Rancho Nuevo y El Molino. También se encuentran el arroyo Calera, formado por los arroyos Carrizalillo y Hornitos, así como los arroyos de Enmedio y Plateros. Estos cursos de agua desembocan en las lagunas Santa Ana y Sedano. El patrón de drenaje se caracteriza por ser dendrítico y concéntrico, fluyendo hacia el centro de la cuenca antes de continuar en dirección norte hacia las lagunas Santa Ana y Sedano, las cuales ostentan la mayor relevancia como cuerpos de agua en esta región (CONAGUA 2020).

Aunque son escasos, se encuentran algunos aprovechamientos de aguas superficiales con capacidad limitada, pero de gran importancia para la zona. Ejemplos notables son las presas Arroyo de En medio, Bordo Toribio, Calera, la Bomba, Los Chilitos y El Peñasco, que en conjunto suman una capacidad de almacenamiento de 13.2 hm³ anuales, beneficiando a un total de 1,649 hectáreas de terreno cultivado, según los datos proporcionados por CONAGUA en 2020.

3.1.6 Geomorfología

Según el estudio realizado por Ariel Consultores (1996), el paisaje geomorfológico del área de estudio se forjó a través de una secuencia de procesos geológicos que se desencadenaron con la influencia de un intrusivo que impactó las unidades Mesozoicas. Estos eventos fueron seguidos por plegamientos, fallamientos y una fase de vulcanismo, que dio origen a los macizos montañosos, siendo esenciales para la formación de la cuenca. Luego, los sedimentos que conforman la llanura aluvial, caracterizada por una permeabilidad variable, definieron el acuífero de Calera. La sierra de Zacatecas, al este del área, presenta una forma alargada de más de 35 km de longitud y elevaciones máximas entre 2,600 y 2,700 msnm, como los cerros Armados, Las Viejas y Alto. Estos relieves están compuestos por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, con procesos de compresión que dieron lugar a plegamientos y fracturas. Esta sierra está atravesada por arroyos de cauces profundos y se caracteriza por su falta de vegetación.

Las sierras circundantes al sur y oeste del valle tienen origen volcánico, formadas por tobas riolíticas que cubrieron unidades del Mesozoico y, a su vez, fueron cubiertas por derrames lávicos riolíticos. Las tobas dan forma a lomeríos con contornos redondeados y están drenadas por arroyos que han tallado cauces profundos. En la porción central destacan mesas como El Rodeo, Potreros y La Baya, donde arroyos como La Caldera, San Nicolás y Las Tinajas ilustran el patrón de drenaje característico. La llanura aluvial, situada entre estas sierras, consiste en depósitos aluviales con granulometría diversa, lo que otorga variaciones en la permeabilidad de media a alta. Ubicada entre 2,050 y 2,200 msnm, esta área recoge los escurrimientos de las sierras, los cuales tienden a ser de corta longitud ya que se infiltran hacia el centro del valle, mostrando una mayor densidad en la porción oriental. Las unidades hidrogeológicas y morfológicas más notables en el valle de Calera incluyen las sierras abruptas en los límites este, sur y oeste, junto con formas de mesetas y volcanes, lomeríos y la llanura aluvial. La sierra de Zacatecas, al este, está formada por las Formaciones Zacatecas y Caracol, así como pórfidos andesíticos y el conglomerado rojo de Zacatecas, que actúan como barreras para los acuíferos. Las sierras del sur y oeste presentan conglomerados rojos de Zacatecas y riolitas, que también limitan los acuíferos. Estas sierras están relacionadas con lomeríos y tobas riolíticas, suficientemente permeables para considerarse áreas de recarga donde la lluvia escasa se infiltra. La llanura está ocupada por depósitos aluviales y de pie de monte, que dan lugar a los acuíferos del valle de Calera, evidenciando su permeabilidad en el limitado desarrollo de arroyos que fluyen desde las sierras (Ariel Consultores 1996).

3.1.7 Geología

3.1.7.1 *Estratigrafía*

De acuerdo con Núñez (2003), la estratigrafía en la región está compuesta por una variedad de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas, las cuales dan lugar a una serie de unidades litoestratigráficas que son compartidas en toda la cuenca. Entre estas se encuentran la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, con una posible edad que abarca desde el Jurásico Superior hasta el Cretácico Inferior, el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental y un conjunto de depósitos aluviales parcialmente consolidados del Cuaternario. No obstante, tanto en la parte norte como en la meridional del área, además de las mencionadas unidades, se presentan formaciones específicas para cada una de estas zonas. En la porción septentrional se exponen dos formaciones pertenecientes al Cretácico Inferior, el Grupo Proaño y la Caliza Fortuna, así como la Formación Caracol del Cretácico Superior y un Conglomerado Polimíctico Indiferenciado del Neógeno. Por otro lado, en la región meridional se evidencian las formaciones Zacatecas del Triásico Superior, junto con el Conglomerado Rojo de Zacatecas que abarca desde el Paleoceno hasta el Eoceno.

- **Formación Zacatecas**

La localidad de referencia para esta unidad litoestratigráfica, trazada originalmente por Burckhardt (1906) y formalizada posteriormente por Carrillo-Bravo (1971), se encuentra en el límite noroeste de la Ciudad de Zacatecas, en el arroyo La Pimienta, ubicado en la parte meridional del área de estudio. Sus exposiciones constituyen una franja estrecha en el límite occidental de la Ciudad de Zacatecas, y las rocas que la componen consisten en meta-areniscas, cuarcitas, lavas almohadilladas, esquistos y filitas en facies esquistos verdes. Se estima que el espesor total de esta formación alcanza aproximadamente 100 metros, considerando tanto sus relaciones tectónicas con la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada, como las variaciones topográficas presentes en algunos de sus afloramientos.

- **Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada**

Existen múltiples registros que hacen referencia a esta unidad en la zona, destacándose De Cserna (1976) quien designa como Formación Chilitos a un conjunto de rocas con un espesor aproximado

de 200 metros. Este conjunto está compuesto por lavas almohadilladas y brechas. Luego, Centeno-García y colaboradores (1997) en la región de la Sierra de Zacatecas, donde esta unidad tiene una presencia extendida, propone una subdivisión que comprende las formaciones Chilitos, El Saucito y la Borda. Otros afloramientos se ubican al oeste del poblado Francisco y Madero, en el sureste de la Ciudad de Fresnillo, así como en la parte norte del poblado de Santiaguillo.

- **Grupo Proaño**

Las formaciones Valdecañas y Formación Plateros son referidas por De Cserna (1976) bajo el nombre de Grupo Proaño. Estas formaciones se observan en los alrededores de las localidades de Fresnillo y Plateros. En el distrito minero de Fresnillo, se ha identificado este conjunto de rocas sedimentarias que está subdividido en tres unidades según sus características litológicas y posición estratigráfica: grauvaca inferior (no visible), lutitas calcáreas y carbonosas, y grauvaca superior. En el caso de la Formación Valdecañas, está compuesta por una secuencia alternante de estratos delgados de grauvacas de grano fino en tonos gris-verdoso, intercalados con lutitas de color gris oscuro a negro. Se estima que su espesor alcance los 700 metros. La Formación Plateros, por su parte, consta de lutitas con estratificación masiva, con un espesor aproximado de 150 metros, junto a un paquete de grauvacas de unos 200 metros de grosor, presentando un color gris claro verdoso. Estas formaciones son subyacentes a la Caliza Fortuna mediante una discordancia, mientras que están superpuestas por la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada debido a contactos tectónicos.

- **Formación Chilitos**

De acuerdo con De Cserna (1976), la Formación Chilitos se compone de lavas de tonalidad gris oscura con matices rojizos y verdosos, además de estructuras almohadilladas. Asimismo, se identifican rocas brechadas de colores verdosos y gris-rojizo, que muestran semejanzas con las rocas volcánicas de origen epiclástico. El autor señala que estas rocas se entremezclan con capas marinas fosilíferas que pertenecen al Triásico Superior. Posteriormente, en el trabajo de Cuevas-Pérez *et al.*, (1985), se describe la Formación Chilitos como un conjunto que incluye lava almohadillada, lutita silíceo finamente estratificada, así como estratos con lutita arenosa y arenisca que contienen poco material tobáceo (como smectita y caolín). Este estudio agrega que las rocas volcánicas presentan una cloritización intensa, resultado de la acción de procesos hidrotermales

que ocurren cuando el magma entra en contacto con agua marina. La formación de clorita libera una cantidad considerable de sílice, la cual confiere el carácter silíceo a las lutitas presentes en esta formación. Por último, en el análisis de Yta (1992), se afirma que la Formación Chilitos se compone de una sucesión de lavas de naturaleza almohadillada y masiva, de composición básica. Estas lavas se intercalan con limolita, radiolaritas y caliza micrítica.

○ **Caliza Fortuna**

En el pasado, Burckhardt (1906) documentó la presencia de afloramientos de calizas en la región que conecta las localidades de Fresnillo y Plateros. Más adelante, en el estudio de De Cserna (1976), menciona que la formación en cuestión está compuesta por calizas con una edad Albiano, que exhiben un color que varía desde gris claro hasta beige. Estas calizas presentan estratificación que puede oscilar entre delgada y media, además de mostrar bandas y nódulos de pedernal en tonalidades negras. También se observan capas de areniscas calcáreas de grano fino, que se caracterizan por su color amarillento. Los afloramientos de esta formación se ubican en los lomeríos de cerros como Proaño, Gordo y Xoconostle, así como en la elevación denominada Loma de la Fortuna. Estos afloramientos están distribuidos en los alrededores de las localidades de Fresnillo y Plateros, además de encontrarse al sureste de Santiaguillo. Esta unidad se superpone en consonancia con el Grupo Proaño y se encuentra subyacente por medio de una discordancia angular con respecto a un conglomerado polimíctico que pertenece al Paleoceno-Eoceno.

○ **Formación Caracol**

La descripción hecha por Imlay (1937) se refiere a una serie de tobas devitrificadas, lutitas, areniscas y calizas, que él denomina Formación Caracol. Para esta formación, Imlay ubicó la localidad de referencia en el Arroyo El Caracol, situado en la parte media de la Sierra de Parras. En términos de composición, la Formación Caracol se divide en dos unidades. La unidad inferior comprende una secuencia alterna de calizas arcillosas de color gris y lutitas que van de tonos grises a verdoso, estas últimas dispuestas en capas de grosor delgado a medio. Por otro lado, la porción superior se compone de tobas de tonalidad gris oscuro dispuestas en capas delgadas y medianas. Según las características topográficas, se estima que esta formación posea un espesor de aproximadamente 100 metros.

- **Conglomerado Rojo de Zacatecas**

Las primeras menciones de este conjunto se remontan a Burkart (1836), quien describió una acumulación de sedimentos clásticos de forma redondeada, encajados en una matriz arcillosa. Botsford (1909) relacionó este conjunto con el Conglomerado Rojo de Guanajuato. En etapas posteriores, Stone (1956) propuso el término "aglomerado de Zacatecas", que finalmente fue adoptado con el nombre que se utiliza actualmente, conforme a Edwards (1955). Esta unidad informal presenta una tonalidad de color rojo violáceo, exhibiendo estratificación que puede variar de gruesa a masiva. Está compuesta principalmente por materiales en forma de gravas, arenas y ocasionalmente bloques. Los clastos que la conforman son fragmentos de basalto, andesita, pizarra, filita, esquisto, granito y cuarzo lechoso, los cuales están insertados en una matriz arcillo-calcárea. La forma de los fragmentos puede oscilar entre angulosa y redondeada. Las gravas poseen diámetros que se extienden de cuatro a 20 milímetros, mientras que los bloques varían en tamaño entre cuatro y 20 centímetros. Predominan las arenas gruesas. En cuanto a los espesores reportados, diferentes investigadores han registrado valores que varían entre 223.5 y 418 metros, de acuerdo con Edwards (1955).

- **Grupo Volcánico Superior**

Los componentes de esta unidad litoestratigráfica consisten en rocas de carácter volcanoclástico con una composición mayormente félsica, incluyendo ignimbritas, tobas, flujos piroclásticos, nubes rasantes y coladas esporádicas de riolitas. Estas formaciones rocosas se encuentran distribuidas en las áreas elevadas del sector occidental de la cuenca geográfica. En zonas como El Peñasco y el norte-noreste de la cuenca, su espesor varía aproximadamente entre 50 metros hasta más de 300 metros en los afloramientos presentes en Purísima del Maguey y el Cerro de Altamira. Esta Secuencia Volcánica se superpone al Conglomerado Rojo de Zacatecas en las cercanías de la Ciudad de Zacatecas, y de forma discordante queda por debajo del Conglomerado Polimíctico Indiferenciado del Plioceno en las regiones del sur de Fresnillo. Respecto a su edad, Ponce (1985) asigna un rango que va desde el Eoceno medio (46.8 millones de años) hasta el Eoceno tardío (36.8 millones de años), siendo correlacionada con el Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, de acuerdo con las investigaciones de McDowell (1979).

- **Conglomerado Polimíctico Indiferenciado**

De acuerdo con Núñez (2003), esta unidad está compuesta por un conglomerado polimíctico inmaduro que muestra una clasificación pobre, conformado por fragmentos de diversas rocas, incluyendo las volcánicas félsicas, calizas, basaltos y pedernal, presentando una amplia gama de tamaños, desde pequeñas partículas arcillosas hasta peñascos más grandes. El grosor de este conglomerado varía en un rango de 10 a 100 metros. Su distribución se limita a las terrazas aluviales que abarcan extensiones considerables en los valles próximos a las localidades de Fresnillo y Santiaguillo. En términos geológicos, este conglomerado se deposita de manera discordante sobre las formaciones que conforman el Grupo Proaño y el Grupo Volcánico Superior. Su edad se estima como del Mioceno Superior al Plioceno.

- **Aluvión**

Esta formación abarca valles, áreas de piedemonte y segmentos periféricos de los cursos fluviales. Su composición litológica engloba sedimentos con una clasificación poco precisa que abarca desde arcillas hasta cantos rodados, pasando por limos y arenas. El grosor de estos depósitos sedimentarios varía en función de su ubicación geográfica dentro de la cuenca, estimándose alrededor de 200 metros en la parte septentrional, entre las localidades de Fresnillo y Santiaguillo. En el sector central, en cercanías de Enrique Estrada y Calera de Víctor Rosales, el espesor supera los 600 metros, mientras que, en la zona meridional, entre Francisco I. Madero y Zacatecas, ronda los 400 metros. En la región de Fresnillo y Santiaguillo, esta capa de sedimentos se superpone de manera discordante al Conglomerado Polimíctico Indiferenciado y a las rocas volcánicas del Neógeno. En la franja comprendida entre Purísima del Maguey, Calera de Víctor Rosales, Pozo de Gamboa, Zacatecas y Francisco I. Madero, su posición se encuentra sobre las formaciones del Grupo Volcánico Superior y la Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada. En términos cronológicos, esta formación tiene una antigüedad correspondiente al Cuaternario (Núñez 2003).

Tabla 3.2 Estratigrafía y Unidades Hidroestratigráficas (UH)

Estratigrafía del Acuífero Calera				
Periodo	Formación	Estratigrafía	Tipo	UH*
Cuaternario	Aluvión	Sedimentos aluviales		QTU
Terciario	Conglomerado Polimíctico Indiferenciado	Gravas y arenas Arenas y arcillas Basalto	Acuífero poroso	
	Complejo Volcánico Superior Conglomerado rojo de Zacatecas	Riolita Ignimbrita riolítica Granito/Granodiorita	Acuífero fracturado	Tv
Cretáceo	Formación Caracol	Formación Caracol	-	Ccal
	Caliza Fortuna	Formación Indidura		
Jurásico	Formación Chilitos	Andesita y Caliza	-	TMvs
		Lutitas y Filitas Basalto		
Triásico	Grupo Proaño	Formación Zacatecas	Acuitardo	
	Secuencia Volcanosedimentaria Indiferenciada Formación Zacatecas			

*UH descritas en el capítulo 3.2.1

3.1.8 Geología estructural

De acuerdo con CONAGUA (2015 Cal), los aspectos estructurales predominantes en esta región pertenecen al periodo geológico del Cenozoico, y están asociados con la formación de una caldera y una fase tectónica de extensión que dio lugar a la creación de cadenas montañosas y valles en este entorno.

El centro volcánico que se ha desarrollado en la zona de Zacatecas corresponde a una caldera resurgente, caracterizada por un sistema de fracturas que se distribuyen tanto en patrones

concéntricos como radiales. Además, se distinguen dos momentos de colapso isométrico y tres episodios de elevación en su evolución geológica.

Las sierras de Zacatecas y Fresnillo, en su conjunto, representan la manifestación fisiográfica de pilares tectónicos, mientras que los valles adyacentes son resultado de fosas tectónicas originadas durante una fase de extensión que ocurrió al final del periodo Terciario y principios del Cuaternario. Estas fosas se formaron a raíz de fallas normales que se orientan generalmente en dirección Norte-Sur y, con el tiempo, fueron rellenadas por depósitos aluviales y material piroclástico.

3.2 Caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica

3.2.1 Unidades hidroestratigráficas

En la cuenca del acuífero Calera se reconocieron cuatro Unidades Hidroestratigráficas (UH) en base a sus propiedades hidrogeológicas e hidráulicas específicas.

La UH *TMvs* – Rocas Vulcano-sedimentarias del Mesozoico – representa el basamento de la cuenca sedimentaria. Une la formación grupo Proaño, rocas vulcano-sedimentarias indiferenciadas y la formación Zacatecas, que presentan valores bajos de K con K_h $1 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ y de K_v $1 \cdot 10^{-8}$ a $1 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$. Los valores de S ascienden a $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (Ss) y 0.05 (Sy) (Krienen 2018).

La Formación Caliza Fortuna y la Formación Caracol se unieron en las UH *Ccal* (rocas calcáreas del Cretácico). Esta UH también presenta valores bajos de K con K_h de $3 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-8} \text{ m s}^{-1}$ y de K_v $1 \cdot 10^{-8}$ a $1 \cdot 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$. Los valores de S ascienden a $3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ (Ss) y de 0.01 a 0.03 (Sy) (Krienen 2018).

Las rocas volcánicas del Terciario (Complejo Volcánico Superior y conglomerado rojo de Zacatecas) representan la UH *Tv*. Este acuífero fracturado tiene valores de K_h y K_v de $1 \cdot 10^{-6}$ a $1 \cdot 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ según Ingeniería y Gestión Hídrica (2011). Los valores de S en condiciones confinadas (Ss) varían entre $5 \cdot 10^{-5}$ y $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$, mientras que para condiciones no confinadas Sy se calcula entre 0,04-0,05. La UH se encuentra ortogonal sobre el *TMvs* y, por lo tanto, se superpone en el modelo geológico. No se especifican diques en el área de estudio, pero un si sistema de fallas corta las UH *Tv* y *TMvs*.

La UH superior con la abreviatura *QTU* (Unidad indiferenciada cuaternaria/terciaria) define el relleno de la cuenca sedimentaria y comprende el acuífero poroso. Esta UH comprende del conglomerado indiferenciado Polimíctico y el aluvión. Es una unidad muy heterogénea, lo cual es evidente en los registros estratigráficos de las perforaciones y el amplio rango de Kh con $3 \cdot 10^{-7}$ a al menos $1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Se considera que Kv equivale al 10 % de Kh (Batu 1998). Los valores de Ss se calculan entre $1 \cdot 10^{-5}$ y $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ y para Sy de 0.05 hasta 0.13. La tabla 3.3 ilustra la recopilación de todos los valores previamente descritos.

Tabla 3.3 Propiedades Hidráulicas

Propiedades hidráulicas de las UH				
HU	Kh (m/s)	Kv (m/s)	Ss (1/m)	Sy
QTU	$3 \cdot 10^{-7} - 1.5 \cdot 10^{-5}$	10% de Kh	$1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$	0.05 - 0.13
Tv	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-3}$	0.04 - 0.05
Ccal	$3 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	0.01-0.03
TMvs	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3}$	0.05

3.2.2 Datos de laboratorio y verificación

En septiembre de 2004 se realizó un muestreo de calidad de agua en 95 pozos ubicados estratégicamente a lo largo del acuífero Calera para cubrir la mayor parte de este, las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos de elementos mayores, elementos traza, alcalinidad, pH, entre otros se realizaron en laboratorio. El análisis de las muestras se desarrolló mediante diversos softwares. Para la representación espacial se utilizó Sistemas de Información Geográfica denominado QGIS en su versión 3.22.3, en la figura 3.4 se observa la distribución espacial de dichas muestras.

Un ejercicio fundamental del proceso de interpretación hidrogeoquímica, en el que se utilizan los datos obtenidos de la toma de muestras de agua en campo y su posterior análisis de laboratorio, es la verificación de la calidad analítica de los resultados de los análisis químicos obtenidos. Esto permitirá que las conclusiones de la interpretación realizada sean congruentes con las condiciones naturales.

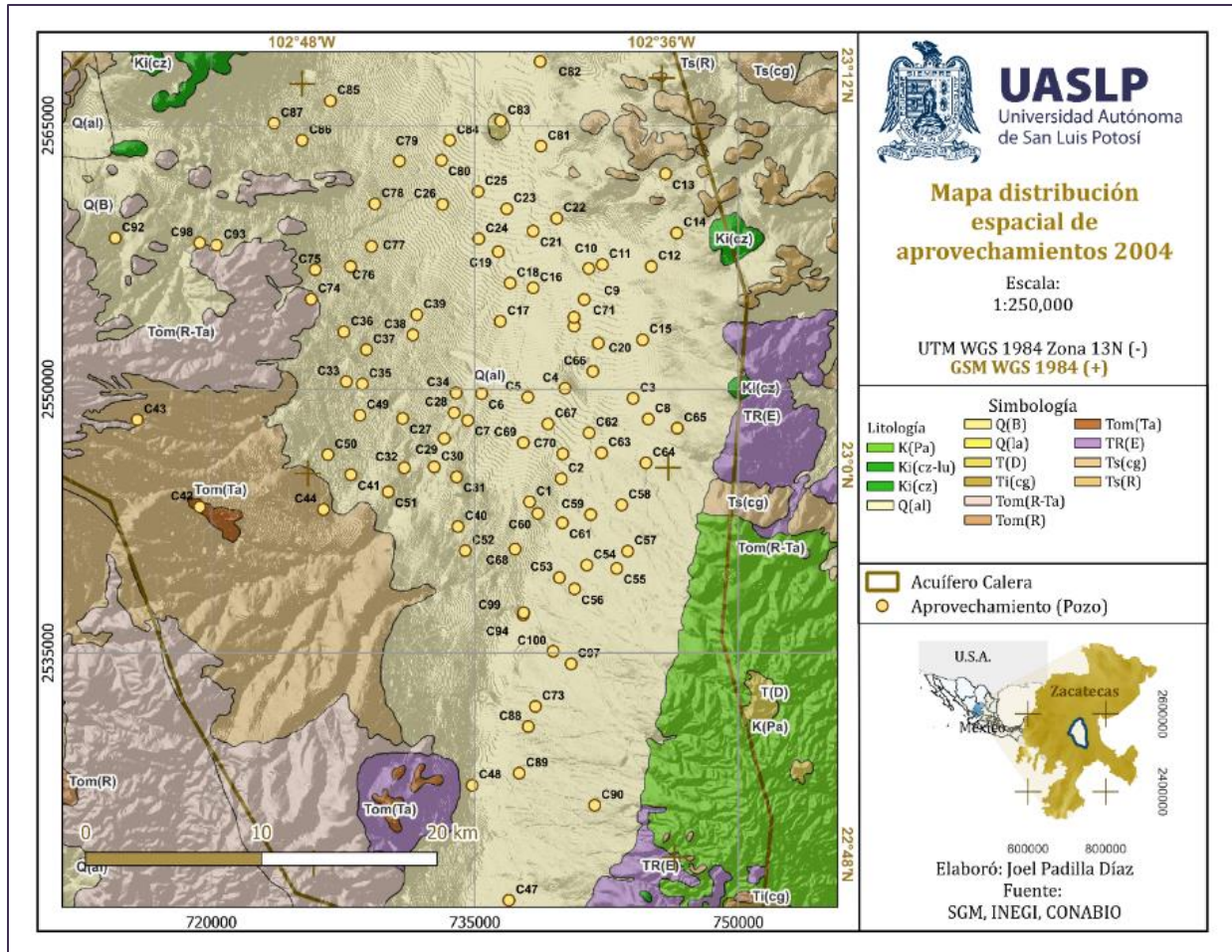


Figura 3.4 Mapa de la distribución espacial de los aprovechamientos del año 2004

De esta forma, para comprobar la precisión relativa de los resultados de los análisis químicos (relativos a los elementos principales), se utilizó la técnica del balance iónico, que se basa en la neutralidad de las muestras de agua. Este tipo de verificación es muy común y necesario en los muestreos hidrogeoquímicos de aguas subterráneas. La técnica utilizada para realizar el balance iónico fue calcular las cargas totales sobre aniones y cationes a partir de los resultados reportados por el laboratorio. En teoría, si el análisis se realiza correctamente, el valor calculado (para iones en miliequivalentes) para aniones debería ser muy similar al de cationes.

Se realiza la sumatoria de cargas positivas (cationes) y negativas (aniones), es entonces que el error de balance iónico se expresa por la diferencia como un porcentaje de la suma, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\%Error = \frac{(\sum cationes - \sum aniones)}{(\sum cationes + \sum aniones)} \times 100 \quad (3.1)$$

Generalmente se acepta que un análisis químico para este criterio es consistente si el margen de error es menor o igual a 7.5%. Existen varias alternativas para determinar el balance de carga, la más completa y adecuada (ya que da cuenta efectivamente de las concentraciones iónicas) es aplicar esta fórmula mediante el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 2013) a todos los análisis químicos realizados, para así determinar los porcentajes de error de cada uno de ellos.

Los análisis realizados a las muestras mencionadas, en términos generales cumplen con las condiciones establecidas, ya que el promedio (valor absoluto) del porcentaje de error calculado fue del 2.58% y la mediana se encuentra muy cerca del cero con 0.55%, solo la muestra C93 rebasa el 7.5% pero que es menor al 8.5% (tabla 3.4). En la figura 3.5 se presenta la distribución de los porcentajes de error calculados.

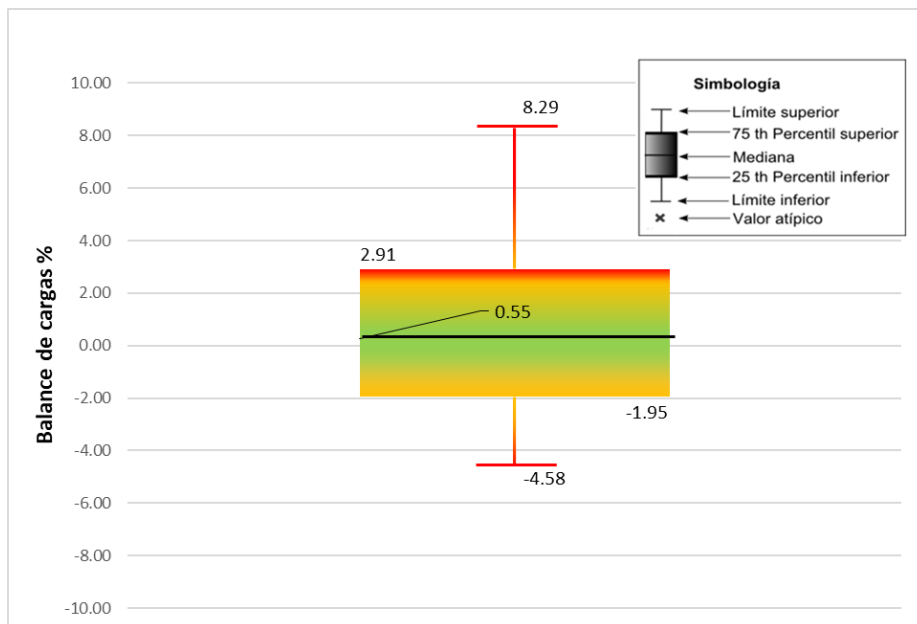


Figura 3.5 Diagrama del porcentaje de error en el balance de cargas

3.2.2.1 *Análisis estadísticos*

Las muestras de aguas se tomaron de un solo tipo de aprovechamiento, de pozos, los cuales sirven principalmente para el abastecimiento de la población. Las condiciones geológicas e hidrogeológicas del sitio permiten la extracción de aguas subterráneas mediante pozos, junto con la variación espacial natural (lateral y vertical) de la calidad de las aguas subterráneas en la zona en cuestión, dieron lugar a una gran diversidad en el volumen de hallazgos de campo y de laboratorio. La tabla 3.4 proporciona un resumen de las estadísticas básicas de los resultados de las muestras de agua.

Los elementos mayores que predominan en las muestras de agua son bicarbonato (259.69 mg/L) > sulfato (69.19 mg/L) para los aniones, y sodio (58.95 mg/L) > calcio (52.01 mg/L) para los cationes. Posiblemente las altas concentraciones de estos iones se deban a la composición geológica de las rocas circundantes con las que el agua interactúa, las cuales se componen de calizas provenientes de sedimentos aluviales.

Tabla 3.4 Estadística básica de las muestras 2004

Parámetro	Unidad de medida	Número de muestras medidas	Mínimo	Mediana	Máximo	Desviación estándar	Promedio
<i>Parámetros de campo</i>							
Temperatura	°C	95	16.2	24.7	30	2.37	24.72
pH		94	7.18	7.735	8.37	0.22	7.72
CE	uS/cm	95	0	459	2530	327.58	523.36
Eh	mV	95	-10	275	415	109.80	250.00
OD	mg/l	77	1.1	6.2	59	6.34	7.00
Alcalinidad	mg/l CaCO ₃	95	119.5	210.1	1373.6	125.90	225.85
SDT	mg/l	95	139	240	1290	190.91	280.12
Dureza	mg/l CaCO ₃	95	27	156	1158.7	146.99	186.40
<i>Cationes</i>							
Na	mg/l	95	9	41.8	612.5	69.49	58.95
K	mg/l	95	2.7	10.1	27.7	4.64	10.76
Ca	mg/l	95	10.3	48.3	262.8	32.55	52.01
Mg	mg/l	95	0.3	6.8	122	18.45	13.71
<i>Aniones</i>							
HCO ₃	mg/l	95	72.91	243.02	1439.21	134.34	259.69
Cl	mg/l	95	0.92	10.15	223.38	27.73	15.87
SO ₄	mg/l	95	9	37	1080	144.74	69.19
F	mg/l	88	0	0.905	2.6	0.48	0.84
N-NO ₃	mg/l	95	0.16	0.63	2.62	0.44	0.70
<i>Elementos traza</i>							
NO ₃	mg/l	95	0.7	2.8	11.6	1.96	3.08
Si	mg/l	95	10	33.9	45.6	7.84	32.58
CO ₃	mg/l	95	0	0	116.4	15.68	6.85
Li	ug/l	95	8	56	400	60.09	68.76
B	ug/l	95	20	159	2000	251.29	223.02
Al	ug/l	95	1	8	94	10.78	11.01
Sc	ug/l	95	2	5	8	1.25	4.64
Ti	ug/l	95	0.9	2.9	5.7	0.76	2.93
V	ug/l	95	5.8	22.3	50	10.89	23.31
Cr	ug/l	95	0.25	3.1	17.9	3.52	4.29
Mn	ug/l	95	0.2	0.7	68.6	8.35	2.35
Fe	ug/l	95	5	60	440	57.26	68.11
Co	ug/l	95	0.0025	0.0025	7.74	1.09	0.19
Ni	ug/l	95	0.15	0.4	17	3.75	1.81
Cu	ug/l	95	0.1	0.7	13.9	2.30	1.57
Zn	ug/l	95	1.3	6.6	192	39.37	18.42
Ga	ug/l	95	0.005	0.005	0.08	0.01	0.01
Ge	ug/l	95	0.09	0.45	5.13	0.56	0.53
As	ug/l	95	0.67	15	61.4	10.04	16.93
Se	ug/l	95	0.5	1.3	18.1	2.08	1.66
Br	ug/l	94	87	160.5	2000	251.64	225.74
Rb	ug/l	94	1.02	19.5	50.5	9.84	19.47
Sr	ug/l	94	42	200	200	48.10	168.57

Parámetro	Unidad de medida	Número de muestras medidas	Mínimo	Mediana	Máximo	Desviación estándar	Promedio
Yb	ug/l	94	0.01	0.024	0.096	0.02	0.03
Mo	ug/l	94	0.4	1.8	51.5	5.28	2.49
Ru	ug/l	95	0.005	0.005	0.005	0.00	0.01
Pd	ug/l	95	0.005	0.01	0.45	0.05	0.02
Ag	ug/l	95	0.1	0.1	0.1	0.00	0.10
Cd	ug/l	95	0.01	0.02	0.2	0.03	0.03
Sn	ug/l	95	0.05	1.1	19.9	2.27	1.61
Sb	ug/l	95	0.05	0.16	0.84	0.10	0.18
Te	ug/l	95	0.05	0.05	0.05	0.00	0.05
I	ug/l	95	67	125	634	87.74	142.75
Cs	ug/l	95	0.014	0.209	47.3	7.33	3.10
Ba	ug/l	95	4.8	64.9	192	35.60	66.34
La	ug/l	95	0.008	0.017	0.068	0.01	0.02
Ce	ug/l	95	0.008	0.028	0.136	0.03	0.04
Pr	ug/l	95	0.001	0.004	0.019	0.00	0.01
Nd	ug/l	95	0.006	0.017	0.077	0.01	0.02
Sm	ug/l	95	0.0005	0.004	0.018	0.00	0.01
Eu	ug/l	95	0.0005	0.005	0.009	0.00	0.00
Gd	ug/l	95	0.002	0.004	0.017	0.00	0.01
Tb	ug/l	95	0.0005	0.0005	0.004	0.00	0.00
Dy	ug/l	95	0.0005	0.003	0.015	0.00	0.00
Ho	ug/l	95	0.0005	0.0005	0.004	0.00	0.00
Er	ug/l	95	0.0005	0.002	0.012	0.00	0.00
Yb	ug/l	95	0.0005	0.002	0.037	0.00	0.00
Lu	ug/l	95	0.0005	0.0005	0.006	0.00	0.00
Hf	ug/l	95	0.0005	0.001	0.019	0.00	0.00
Ta	ug/l	95	0.0005	0.0005	0.001	0.00	0.00
W	ug/l	95	0.01	0.55	2.49	0.49	0.62
Re	ug/l	95	0.0005	0.004	0.159	0.02	0.01
Os	ug/l	95	0.001	0.001	0.001	0.00	0.00
Pt	ug/l	95	0.15	0.15	0.15	0.00	0.15
Au	ug/l	95	0.001	0.001	0.001	0.00	0.00
Hg	ug/l	95	0.1	0.1	0.2	0.01	0.10
Tl	ug/l	95	0.0005	0.0005	0.082	0.01	0.00
Pb	ug/l	95	0.5	0.8	6.13	0.85	1.02
Bi	ug/l	95	0.15	0.15	0.15	0.00	0.15
Th	ug/l	95	0.0005	0.0005	0.09	0.01	0.00
U	ug/l	95	0.089	3.04	11	1.76	3.42
Be	ug/l	95	0.05	0.05	0.1	0.01	0.05
18O	$\delta^{18}\text{O}$	34	-1.1E+01	-1.0E+01	-9.2E+00	0.52	-10.06
2H	^2H	34	-8.4E+01	-7.7E+01	-7.2E+01	3.00	-77.44
Tritio	T.U.	4	0.25	0.45	0.7	0.28	0.46

Tabla 3.5 Estadística básica de las muestras 2004 (continuación)

Según la matriz de correlación (tabla 3.6), se observa que los TDS (Sólidos Totales Disueltos) están fuertemente relacionados con Na^+ , Mg, Cl^- , SO_4 , B, Fe, Ni, Se y Br con coeficientes de correlación que van desde 0.77 hasta 0.88. Esto sugiere una conexión directa con la geología del área de estudio.

La alta correlación entre Na^+ y el anión HCO_3^- indica que el agua predominante en el sitio es de tipo bicarbonatada y que esta se relaciona con elementos como Li, Mn y Ge con coeficientes de correlación que varían entre 0.76 y 0.90. Esto sugiere que hay una mezcla de aguas con diferentes períodos de residencia.

La correlación positiva entre Ca y Mg, Cl, SO_4 , B, Fe, Se y Br, con coeficientes que van desde 0.79 hasta 0.91, indica una relación directa con las rocas presentes en el área de estudio, que incluyen rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

La asociación de aniones como Cl con Mg, SO_4 , B, Fe, Se y Br (con coeficientes de correlación de 0.84 a 0.97), Si con Sc y Ti (0.78 a 0.79) y B con Se y Br (0.96 a 1) confirma la presencia de una mezcla de flujos de agua subterránea con diferentes períodos de residencia.

La fuerte correlación entre Br y B (1) sugiere una fuerte conexión con el origen de estos flujos, ya que estos elementos son conservativos y están relacionados con patrones de flujo de larga duración, lo que indica una mayor interacción entre el agua y las rocas y sugiere pertenecen a un flujo Regional.

En resumen, estas correlaciones indican que varios elementos traza se agrupan según la composición del agua subterránea a la que pertenecen. Por ejemplo, el agua bicarbonatada se asocia con elementos como Fe, Zn, Cd, Pb y Se. El agua bicarbonatada mixta se relaciona con Cu, Li, Mn, Ge, Br y Sn. Finalmente, elementos como Li, Ge, As, U, Cs y Rb tienen una relación con el agua de tipo bicarbonatada sódica

3.2.3 Diagramas y facies hidrogeoquímicas

3.2.3.1 Familias de agua

Por medio del análisis de agua por ion dominante se determinaron 7 familias, sin embargo, 3 de ellas conforman el 92.6% del total de las muestras, siendo la familia Bicarbonatada-Mixta “HCO₃-MIX” la que se presenta con mayor frecuencia superando el 40% de las muestras, seguida por la familia Bicarbonatada-Cálcica “HCO₃-Ca” (30.5%) y posteriormente la familia Bicarbonatada-Sódica “HCO₃-Na” (17.9%), como se puede apreciar en la figura 3.6. La calidad del agua del acuífero Calera se analizó con base en la NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.

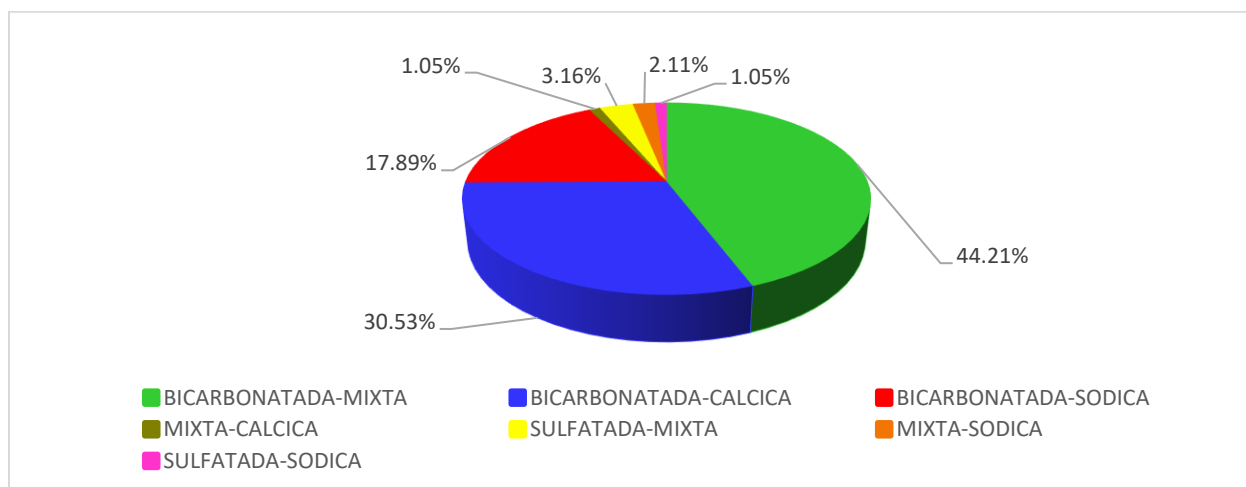


Figura 3.6 Distribución por porcentaje de familias de agua

Los tres grupos principales observados fueron:

Familia bicarbonatada cálcica: Las aguas que pertenecen a esta familia se caracterizan por presentar un rango relativamente constante de valores de Sólidos Disueltos Totales (STD) (167-391 mg/l), contenidos de Li⁺ (0.02-0.097 mg/l) y Na⁺ (18-45.5), además de una temperatura que oscila entre 21.1 y 29 °C. Se cree que estas aguas circulan a niveles poco profundos, atravesando materiales granulares, y tienen un período de residencia relativa corto en el sistema, lo cual se refleja en sus bajos niveles de contenido de litio.

Familia bicarbonatada mixta: Dentro de esta categoría, las aguas exhiben una variabilidad limitada en términos de STD (181-368 mg/l), contenido de Li^+ (0.014-0.092 mg/l), contenido de Na^+ (9-57.3) y temperatura, que se encuentra en el intervalo de 16.2-29.2 °C. de acuerdo con Núñez (2003), se considera que estas aguas viajan a través de medios granulares a profundidades que varían entre someras e intermedias.

Familia sódica bicarbonatada: Esta familia de aguas muestra una amplitud significativa en las concentraciones de STD (220-1260), contenido de Li^+ (0.03-0.4 mg/l), contenido de Na^+ (49-612.5) y temperatura, la cual oscila entre 17.4 y 30 °C. Las amplias variaciones en temperatura y en las concentraciones de Li^+ y Na^+ en la parte extrema de esta familia sugieren que el flujo subterráneo en esta categoría experimenta un período prolongado de residencia relativa, lo que indica que estas aguas se desplazan a través del sistema en capas profundas (Edmunds 1998).

3.2.3.2 *Diagramas de Piper y Stiff*

El diagrama de Piper (figuras de la 3.8 a la 3.10) consiste en dos triángulos (en uno de ellos se representan los cationes y el otro los aniones), complementados con un rombo ubicado en entre la porción central superior de los triángulos. Los tres ejes del triángulo de los cationes se utilizan para las concentraciones de Ca, Mg y $\text{Na}+\text{K}$, representando las concentraciones como porcentajes del total de estos iones en miliequivalentes por litro. El triángulo de los aniones se construye en forma similar, con ejes para Cl, SO_4 y HCO_3+CO_3 . De este modo, finalmente se tiene que cada análisis de agua subterránea disponible se representa como un punto en cada uno de los triángulos.

Debido a la gran cantidad de muestras, al representarlas en un solo diagrama se vuelven ilegibles, por lo tanto, se optó por clasificar el acuífero en 3 zonas, Norte, centro y sur (figura 3.7), de esta forma la proyección de los resultados se puede apreciar de manera más sencilla.

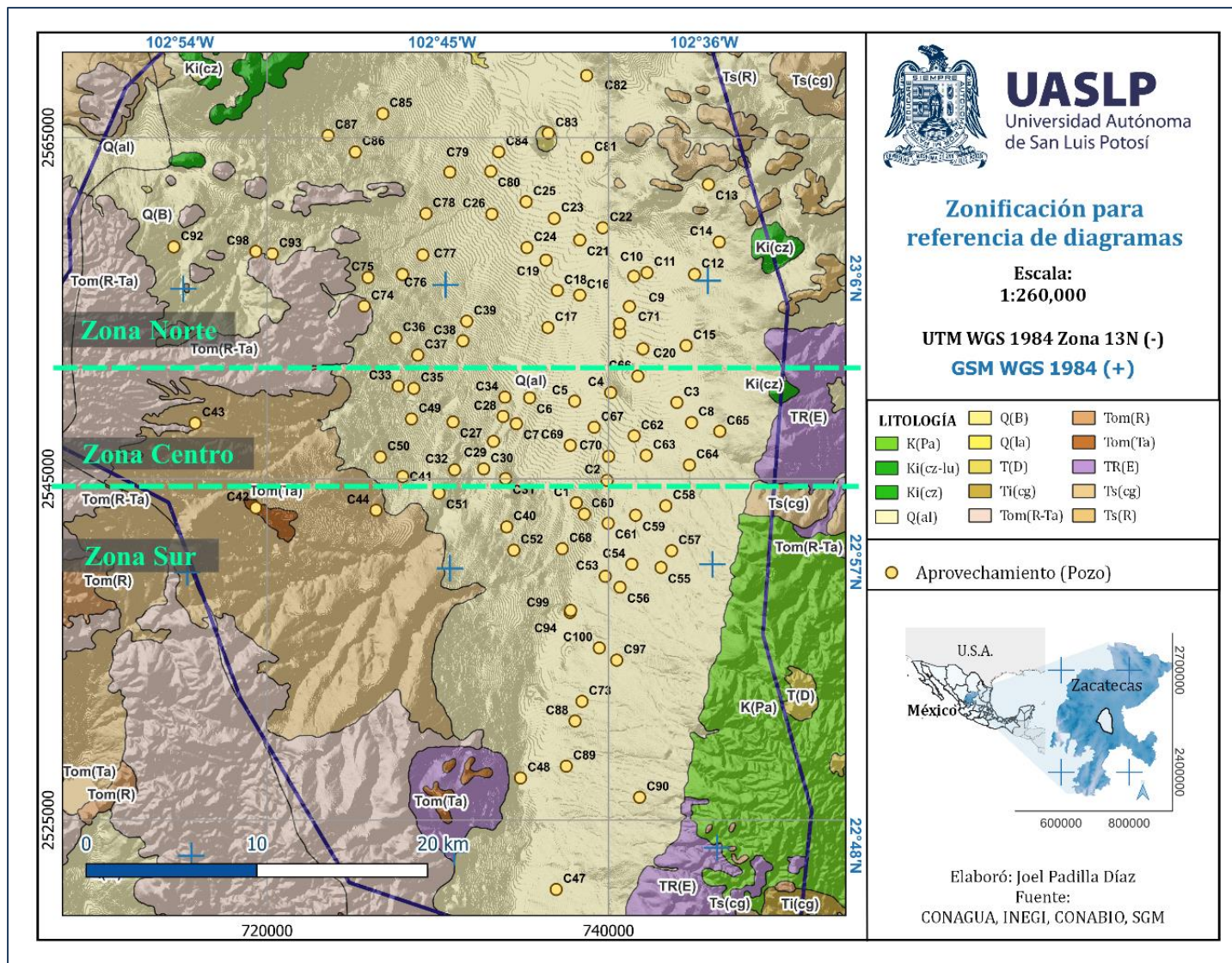


Figura 3.7 Zonificación para referencia de diagramas

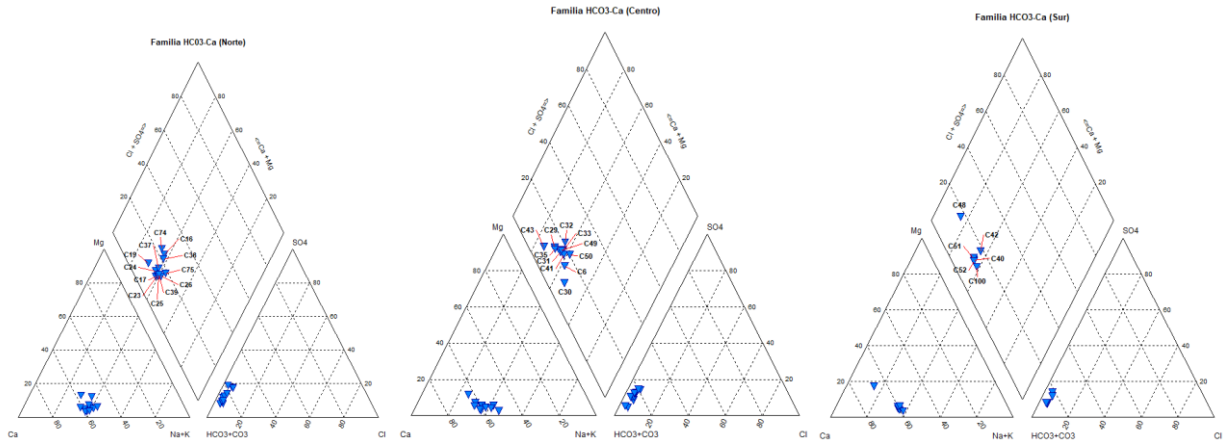


Figura 3.8 Diagramas de Piper de la Familia HCO_3-Ca

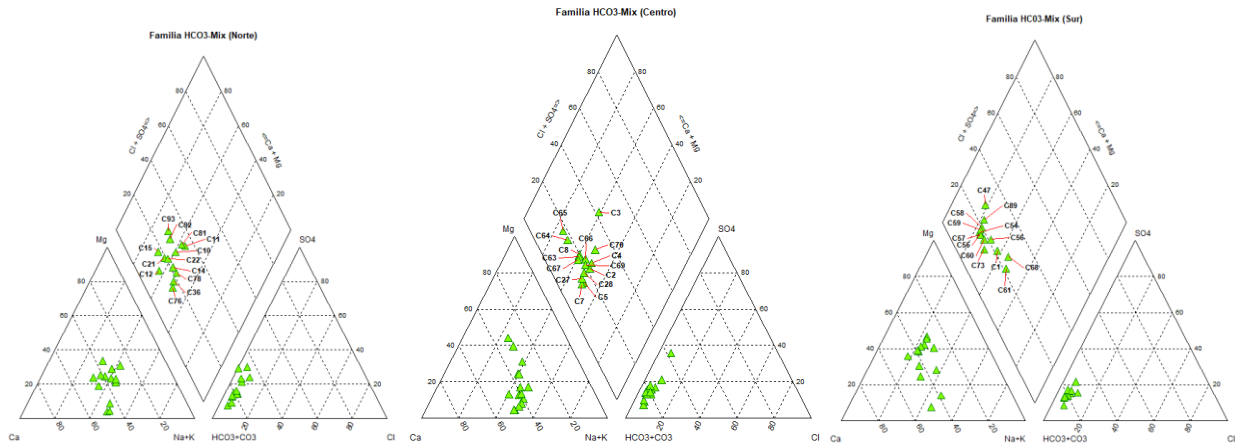


Figura 3.9 Diagramas de Piper de la Familia HCO_3-Mix

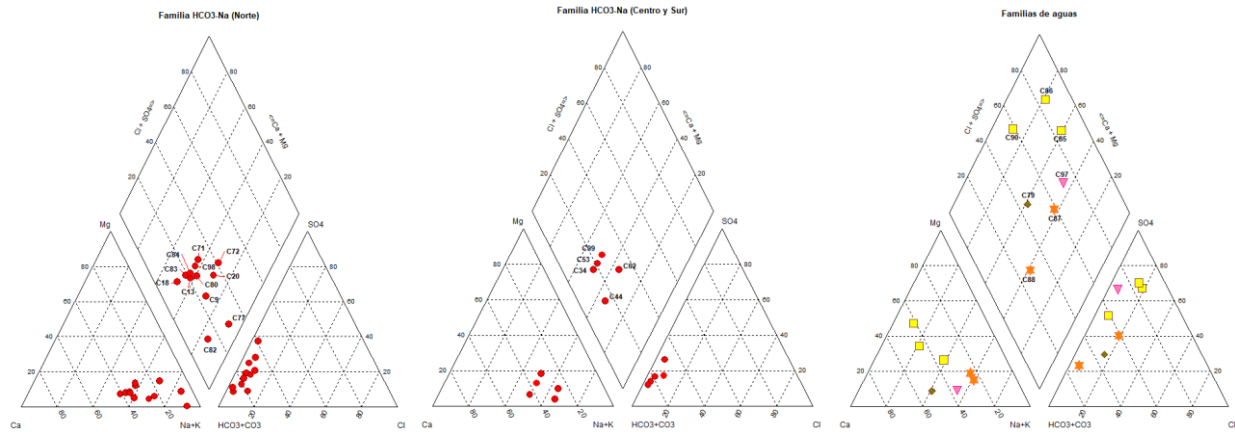


Figura 3.10 Diagramas de Piper de la Familia HCO_3-Na

Figura 3.11 Familias de agua restantes

Las representaciones propuestas por Stiff (1951) ofrecen una forma de ilustrar la composición del agua subterránea en función de las concentraciones de cationes como Na^+ , Mg^{+2} y Ca^{+2} y aniones como Cl^- , SO_4 y HCO_3 , se representan en el lado izquierdo y derecho respectivamente, y estos se expresan en miliequivalentes por litro (meq/L). A continuación, en la figura 3.12 se presenta la distribución espacial de los diagramas de Stiff en la zona de interés estudio.

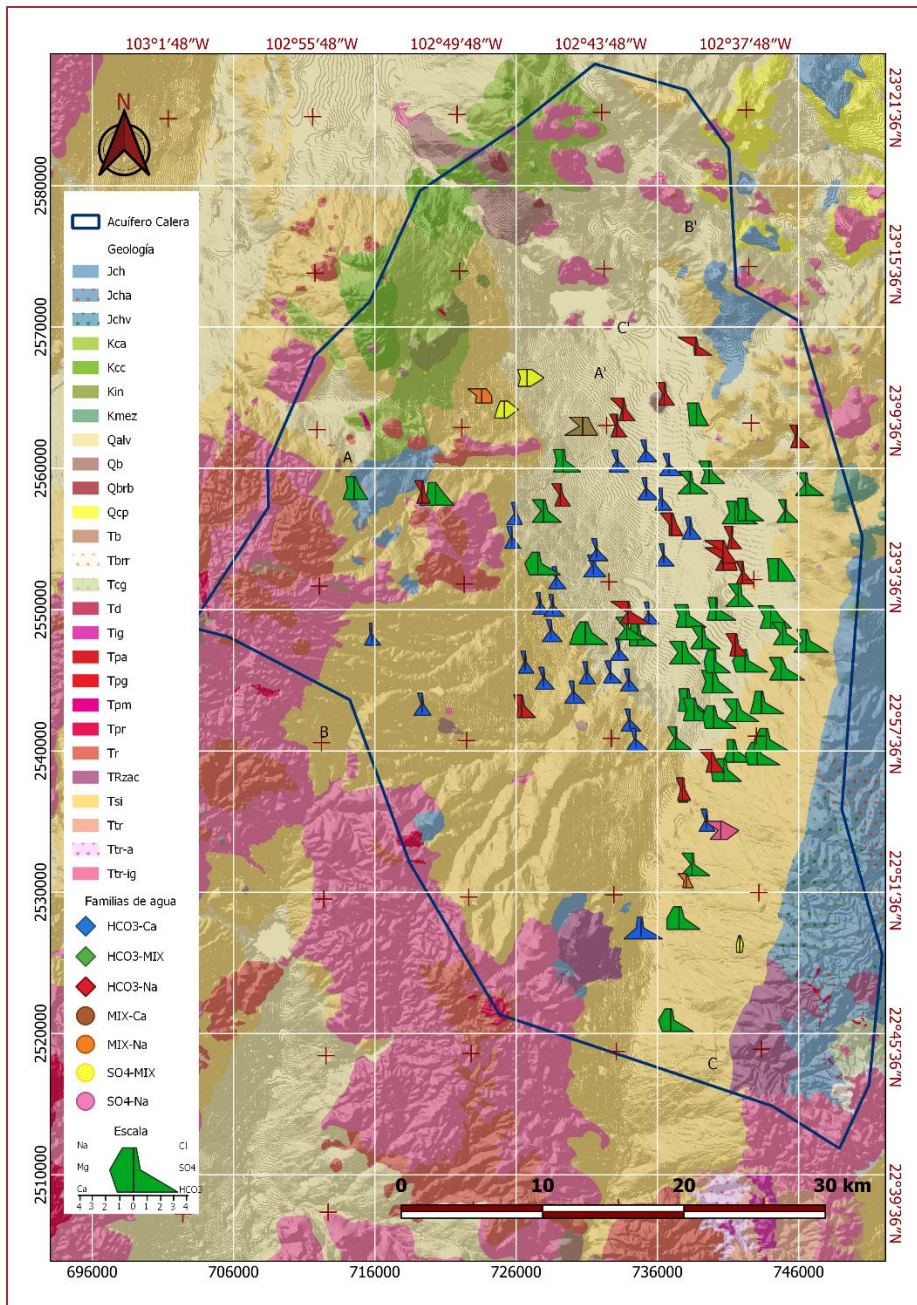


Figura 3.12 diagramas de Stiff

La representación gráfica de la composición química del agua subterránea permite identificar su evolución geoquímica, para el presente estudio se emplearon los diagramas de Durov, Piper y Gibbs, a partir de los cuales se puede inferir la tendencia hacia los miembros extremos, patrones de tendencia o puntos que se aíslan por completo debido a su composición y que son indicativos de algún tipo de anomalía; Se ha identificado que algunos puntos de muestreo pueden ser asociados a fuentes potenciales de contaminación debido a descargas de aguas residuales.

Ahora bien, para reconocer el intercambio catiónico que se puede estar llevando a cabo de acuerdo con la composición química del agua se elaboró el diagrama propuesto por Lloyd y Heathcote (1985) figura 3.13. Los iones de intercambio se representan en un gráfico enfrentados entre sí, y se elimina el ion Cl^- del ion Na^+ para observar el aumento de sodio proporcionado por la mezcla de agua. La relación de intercambio iónico se muestra de manera evidente en las muestras de calcio más elevadas, representándose como una línea inclinada con una pendiente de -1. En esencia, se genera una diagonal y cuanto más alejada del punto cero esté, mayor será la intensidad del intercambio catiónico.

De acuerdo con Gardea (2019) la eliminación del calcio a través del intercambio iónico altera ocasiona un desequilibrio al disolver más calcita y restaurar la concentración de calcio. Debido a esto, el proceso se ve finalmente limitado por el aumento de la concentración de CO_3 , ocasionando el aumento del pH general y la reducción de la solubilidad de la calcita.

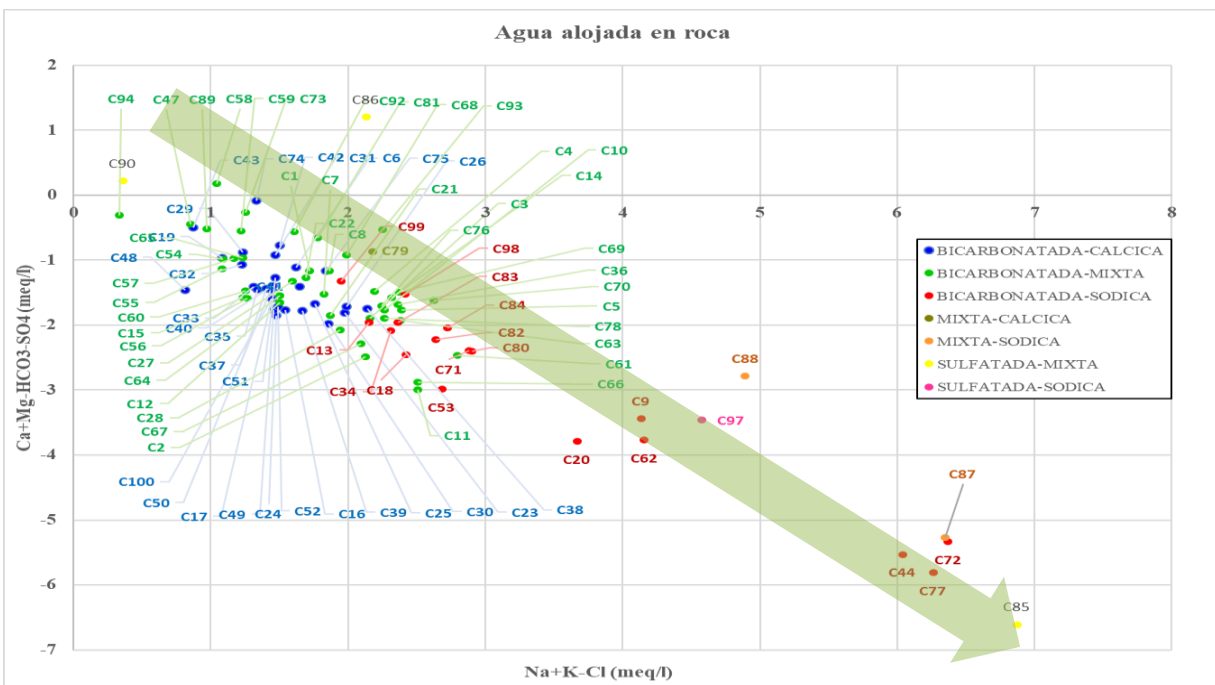


Figura 3.13 Diagrama de Lloyd y Heathcote

La relación entre el contenido de litio y la temperatura medida a la descarga de acuerdo con Edmunds (1988), consiste en que pueden ser considerados como parámetros que indican el tiempo de residencia del agua en un sistema de flujo. La duración relativa del tiempo de residencia del agua está influenciada por niveles elevados de litio y temperaturas del agua en valores altos, resultando en tiempos de residencia más prolongados. Por otro lado, se observa que, en presencia de concentraciones más bajas de litio y temperaturas más frías, el tiempo de residencia relativa disminuye.

Tabla 3.7 Relación de las Familias de agua con la temperatura y las concentraciones de Litio y STD

Familia de agua	Rangos en la concentración de Litio mg/l	Rangos de variación de temperatura °C	Rangos en la concentración de STD mg/l
HCO₃-Ca	0.02 – 0.097	21.1 - 29	167 – 391
HCO₃-MIX	0.014 – 0.092	16.2 – 29.2	181 – 368
HCO₃-Na	0.03 – 0.4	17.4 - 30	220 - 1260

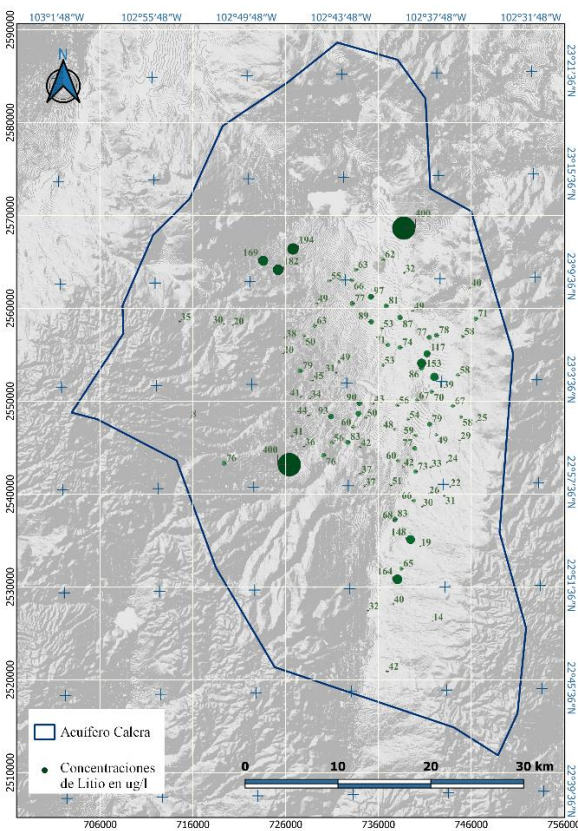


Figura 3.14 Concentraciones de litio en µg/l

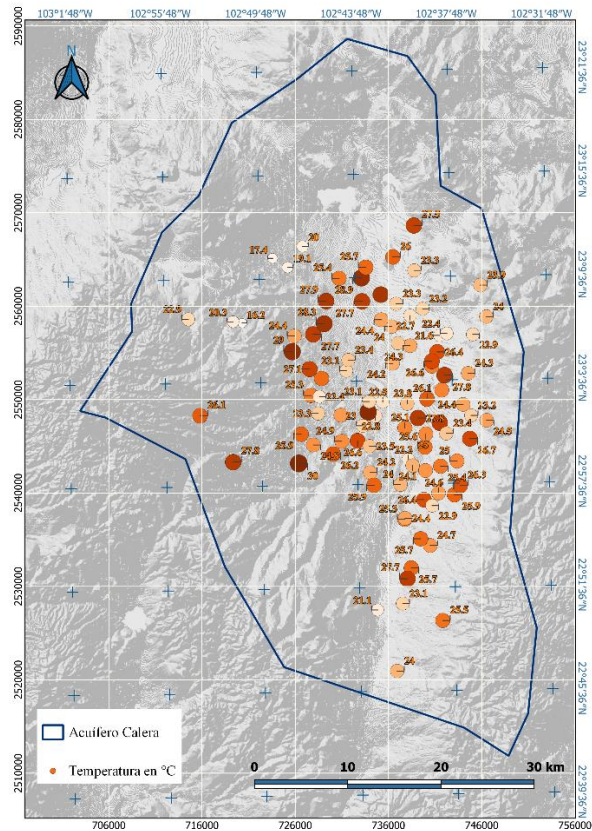


Figura 3.15 Temperatura en °C

3.2.4 Calidad del agua

Con el propósito de llevar a cabo la valoración de la condición del agua subterránea, se tomaron en cuenta tanto la disposición de los parámetros químicos, incluyendo arsénico, fluoruro, cloro, hierro, nitratos y sólidos totales, como las cantidades correspondientes en miligramos por litro (mg/l). Estas concentraciones fueron contrastadas con los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

○ Arsénico

El 89% de las muestras de agua analizadas presentan concentraciones de arsénico que oscilan entre 0.0006 y 0.025 mg/l, valores que se encuentran dentro de los límites oficialmente permitidos (0.025 mg/l). El 11% restante exhiben concentraciones en el rango de 0.026 a 0.06 mg/l, superando los estándares normativos establecidos. Sin embargo, es importante señalar que ninguno de los usos del agua en cuestión se dirige al abastecimiento para consumo humano, ya que su uso principal es de tipo agrícola.

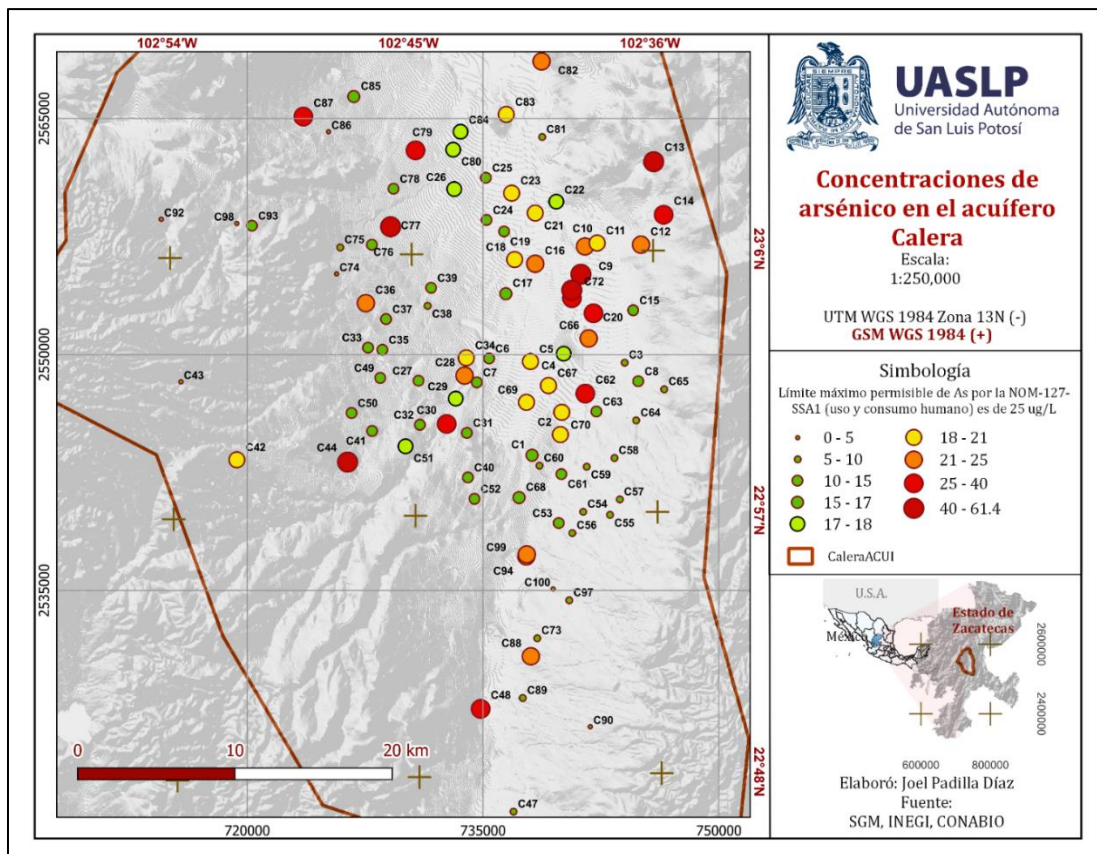


Figura 3.16 Concentraciones de arsénico en el acuífero

○ **Fluoruro**

Siguiendo el contexto geológico en el que se enmarca el área de investigación, caracterizado por la presencia de rocas volcánicas félsicas pertenecientes al Grupo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, se podría anticipar una presencia significativa de flúor en las aguas subterráneas. Sin embargo, a pesar del muestreo exhaustivo realizado en el acuífero de Calera, se observa que en el 93% de las muestras analizadas, los niveles de este elemento se sitúan por debajo de los límites oficiales establecidos (1.50 mg/l). En contraste, el resto de las muestras exhiben concentraciones que oscilan entre 1.58 y 2.60 mg/l, y su distribución es puntual.

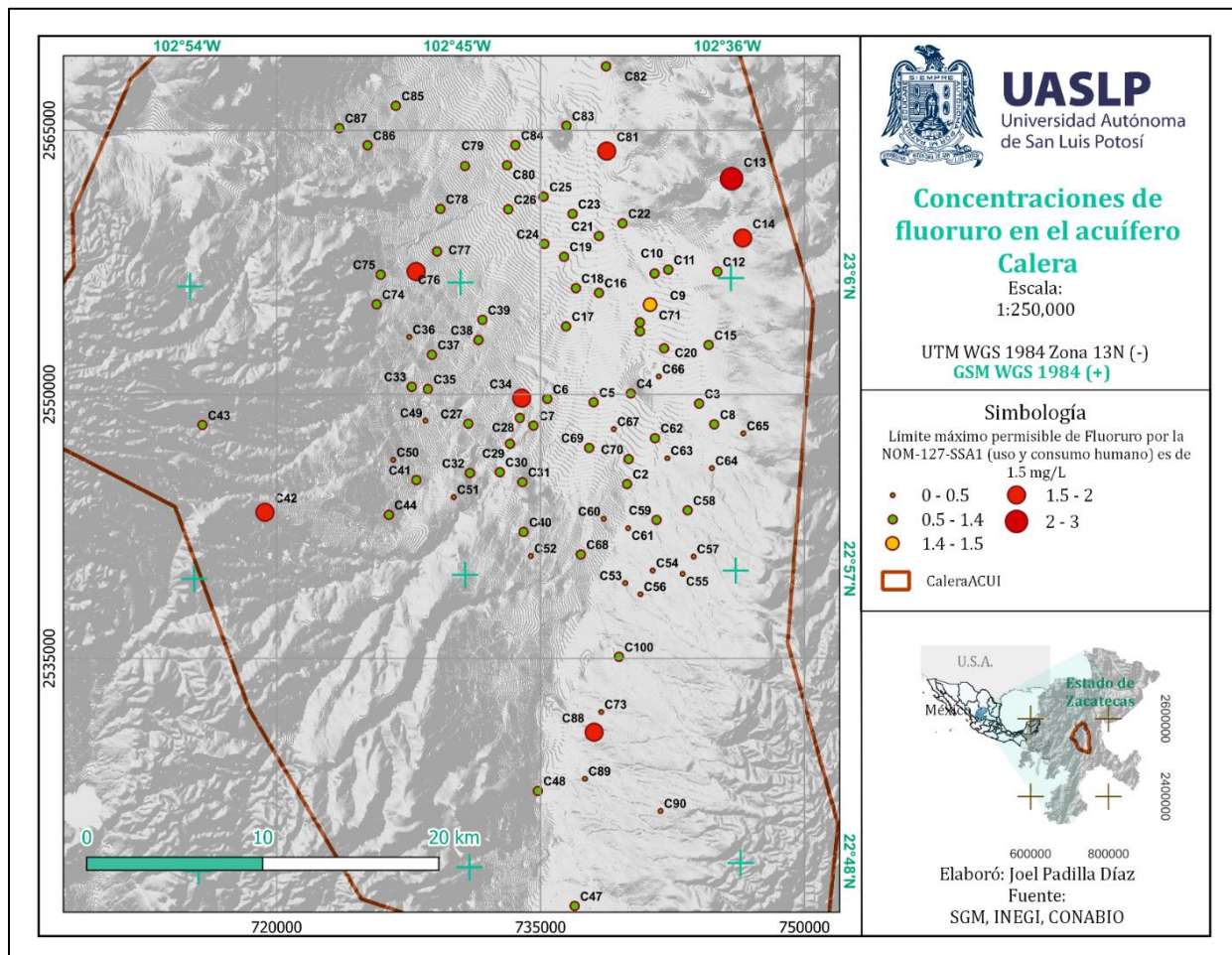


Figura 3.17 Concentraciones de fluoruro en el acuífero

○ **Hierro**

El hierro presente en las aguas subterráneas se encuentra en su forma ferrosa (Fe^{+2}), la cual es soluble y generalmente no representa un problema por sí sola. Sin embargo, el hierro ferroso tiende a oxidarse y convertirse en formas férricas que se presentan como hidróxidos insolubles en agua. Estos compuestos rojos son corrosivos y pueden causar obstrucciones en bombas, tuberías y sistemas de circulación de agua. Especialmente las muestras que presentan concentraciones altas de este mineral se ubican espacialmente al Noreste y Sureste del acuífero, cercanas a las poblaciones de Fresnillo y Zacatecas. Es posible que este fenómeno puntual esté relacionado a la presencia de actividad minera en la región.

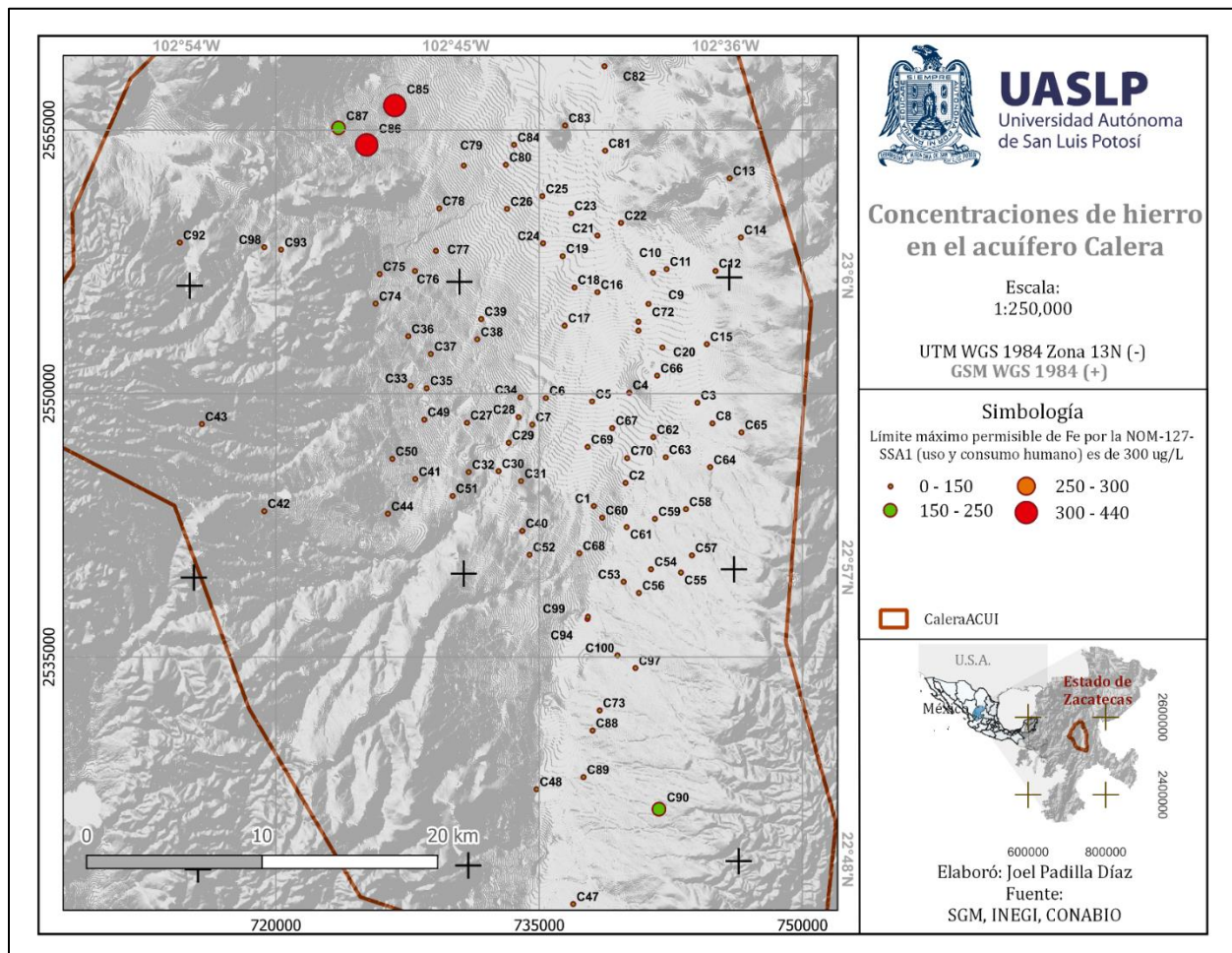


Figura 3.18 Concentraciones de hierro en el acuífero

3.3 Modelo conceptual del funcionamiento de los sistemas de flujo del acuífero Calera

○ Geometría

Como se describe en la sección 3.1, El acuífero Calera, identificado con la clave 3225 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Aguas Subterráneas (SIGMAS), se localiza en la porción central del estado de Zacatecas, al noroeste de la Ciudad de Zacateca. Abarca 2,226 kilómetros cuadrados, y se circunscribe en los Municipios de Fresnillo, Calera, Zacatecas, General Enrique Estrada, Morelos, Pánuco, Vetagrande, Jerez y Villa de Cos. Administrativamente, corresponde a la Región Hidrológico-Administrativa VII, Cuencas Centrales del Norte.

El sistema acuífero está compuesto por un conjunto de materiales granulares altamente permeables, tales como conglomerados, gravas, gravillas con arena y arcillas, además de algunos derrames volcánicos (QTU). La variación en el espesor de este conjunto se extiende desde 40 hasta 400 metros, y este estrato es considerado como la unidad geohidrológica primordial. Estos materiales están situados debajo de las rocas ígneas indiferenciadas, cuya permeabilidad es más baja, presentando un grosor en el subsuelo que abarca de 100 a 200 metros.

La totalidad de este conjunto descansa sobre una delgada capa no continua e impermeable de conglomerado del Terciario (Tv), que a su vez se encuentra sobre rocas calcáreas del Cretácico (Ccal), estas últimas con una estructura fracturada y plegada de alta densidad. Estas rocas calcáreas junto con las rocas metamórficas de la Formación Zacatecas conforman el basamento litológico fundamental del área (TMvs).

○ Recarga y descarga

Las áreas donde se produce la recarga de los acuíferos en el valle se encuentran en las franjas de transición situadas entre la llanura y las cordilleras circundantes. En estas zonas, la alta permeabilidad de los materiales permite que se infiltre una porción considerable del agua de lluvia y de los escurrimientos superficiales. Esta recarga suele originar un flujo subterráneo convergente hacia el centro de la llanura desde las zonas circundantes, para luego cambiar su dirección hacia el norte, en dirección a la Laguna de Santa Ana, donde probablemente ocurría la descarga principal de los acuíferos debido a la evapotranspiración. Aunque en la llanura también se da la infiltración del agua de lluvia, esta es menos significativa y varía según la permeabilidad de los suelos, así como por los escurrimientos torrenciales de los arroyos, que en última instancia también se infiltran, como se demuestra por sus recorridos cortos.

Desde el inicio de la agricultura basada en el riego por bombeo de pozos, es necesario considerar una recarga vertical adicional debido a los excedentes de riego, que vuelven a infiltrarse en el subsuelo. La extracción de agua de los pozos se convierte en la principal forma de descarga de los acuíferos, aunque es una descarga inducida. Con el paso del tiempo, esta extracción ha aumentado hasta superar la cantidad de recarga, lo que ha provocado los descensos en los niveles piezométricos que se observan en la actualidad.

○ **Parámetros**

Se consideran los descritos en la sección 3.2.1, La Unidad Hidrogeológica (UH) denominada TMvs, que comprende las Rocas Vulcano-sedimentarias del Mesozoico, actúa como el basamento de la cuenca sedimentaria, presentando valores reducidos de conductividad hidráulica en dirección horizontal (K_h) de alrededor de $1 \cdot 10^{-8}$ m/s y en dirección vertical (K_v) de $1 \cdot 10^{-8}$ a $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Los coeficientes de almacenamiento específico (S) ascienden a $5 \cdot 10^{-3}$ m⁻¹ (Ss) y 0.05 (Sy).

En la UH denominada Ccal, que engloba las rocas calcáreas del Cretácico, se han unido la Formación Caliza Fortuna y la Formación Caracol. Esta unidad hidrogeológica también exhibe bajos valores de conductividad hidráulica, con K_h que varía de $3 \cdot 10^{-7}$ a $1 \cdot 10^{-8}$ m/s y K_v en el rango de $1 \cdot 10^{-8}$ a $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Los coeficientes de almacenamiento específico (S) están en el rango de $3.5 \cdot 10^{-3}$ m⁻¹ (Ss) y de 0.01 a 0.03 (Sy).

Las rocas volcánicas del Terciario (Complejo Volcánico Superior y conglomerado rojo de Zacatecas) conforman la UH Tv. Este acuífero fracturado exhibe valores de conductividad hidráulica (K_h y K_v) que varían entre $1 \cdot 10^{-6}$ y $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Los coeficientes de almacenamiento específico (S) bajo condiciones confinadas (Ss) varían entre $5 \cdot 10^{-5}$ y $2 \cdot 10^{-3}$ m⁻¹, mientras que, para Sy se encuentra en el rango de 0.04 a 0.05.

La UH superior, identificada como QTU (Unidad indiferenciada cuaternaria/terciaria), define el relleno de la cuenca sedimentaria e incluye el acuífero poroso. Cuenta con una amplia gama de valores de conductividad hidráulica (K_h) que van de $3 \cdot 10^{-7}$ a al menos $1.5 \cdot 10^{-5}$ m/s. Se estima que K_v equivale al 10% de K_h (Batu 1998). Los coeficientes de almacenamiento específico (Ss) varían entre $1 \cdot 10^{-5}$ y $2 \cdot 10^{-3}$ m⁻¹, mientras que para condiciones no confinadas (Sy) se calcula entre 0.05 y 0.13.

- **Condiciones de frontera**

La unidad TMvs casi impermeable en el subsuelo del valle es el conglomerado del Terciario, funge como acuitardo para un tercer acuífero profundo, constituido por calizas cretácicas.

Los límites laterales del valle están definidos por las formaciones rocosas ígneas en las porciones occidental y noroccidental del área, y por las rocas metamórficas de la formación Zacatecas en el límite oriental. Aunque estas rocas poseen una permeabilidad primaria reducida, sus características estructurales confieren propiedades hidrológicas significativas a la formación Zacatecas en particular.

- **Sistemas de flujo**

De manera superficial el acuífero Calera drena hacia la parte norte, mientras que las direcciones de flujo subterráneo viajan desde los sitios de recarga en los sitios montañosos más altos hacia el centro de acuífero. Para visualizar los tres tipos de flujo subterráneo; Regional, Intermedio y Local, se realizaron 3 secciones (figura 3.19). Estas secciones (figuras 3.20 a la 3.22) se contrastan con la distribución espacial de las concentraciones de Arsénico y Fluoruro, las cuales muestran una clara tendencia de aumento a medida que viajan hacia el sitio de descarga del acuífero, lo cual refuerza la tendencia de las direcciones de flujo ya conocidas.

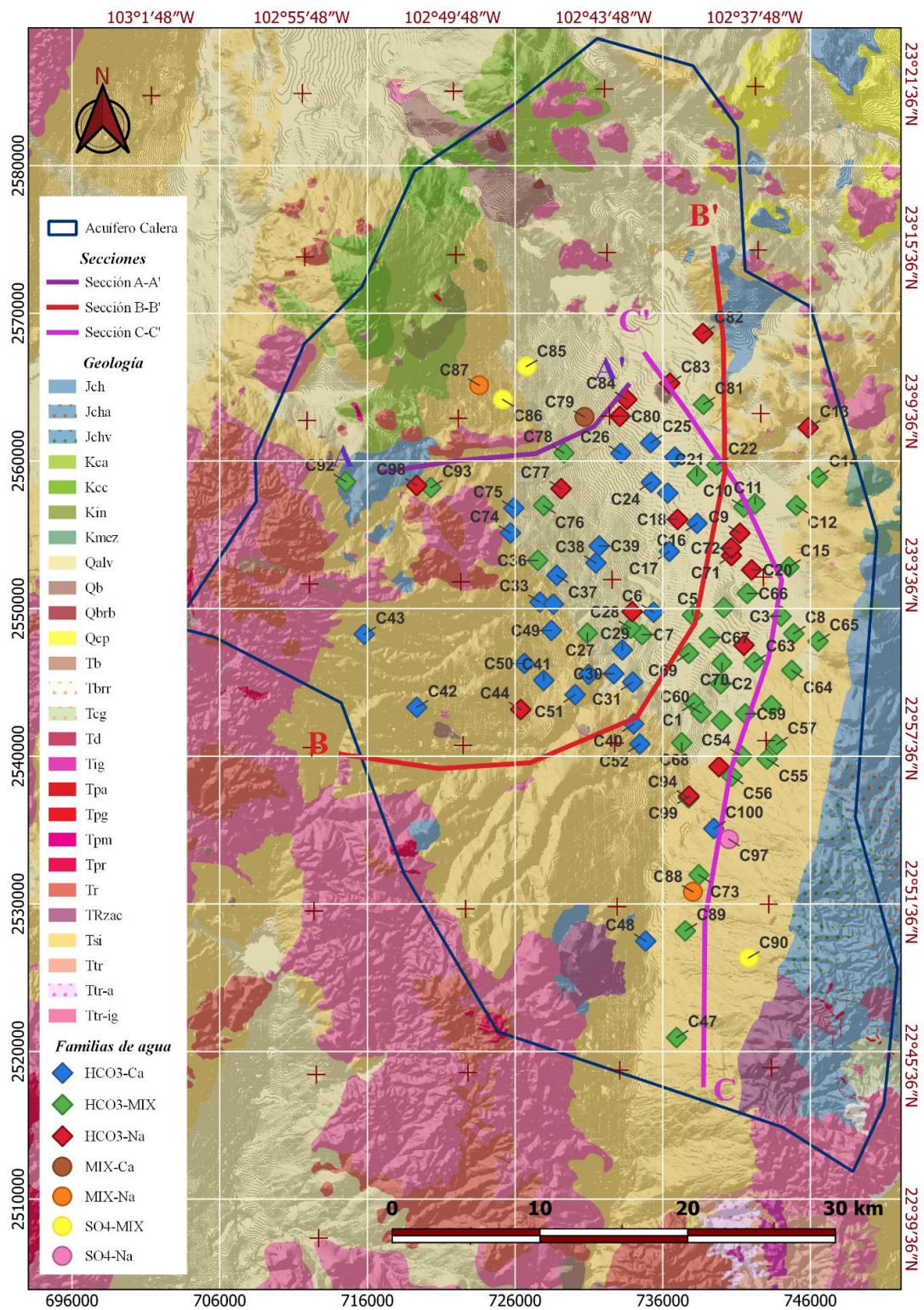


Figura 3.19 Mapa de ubicación de las secciones A, B y C

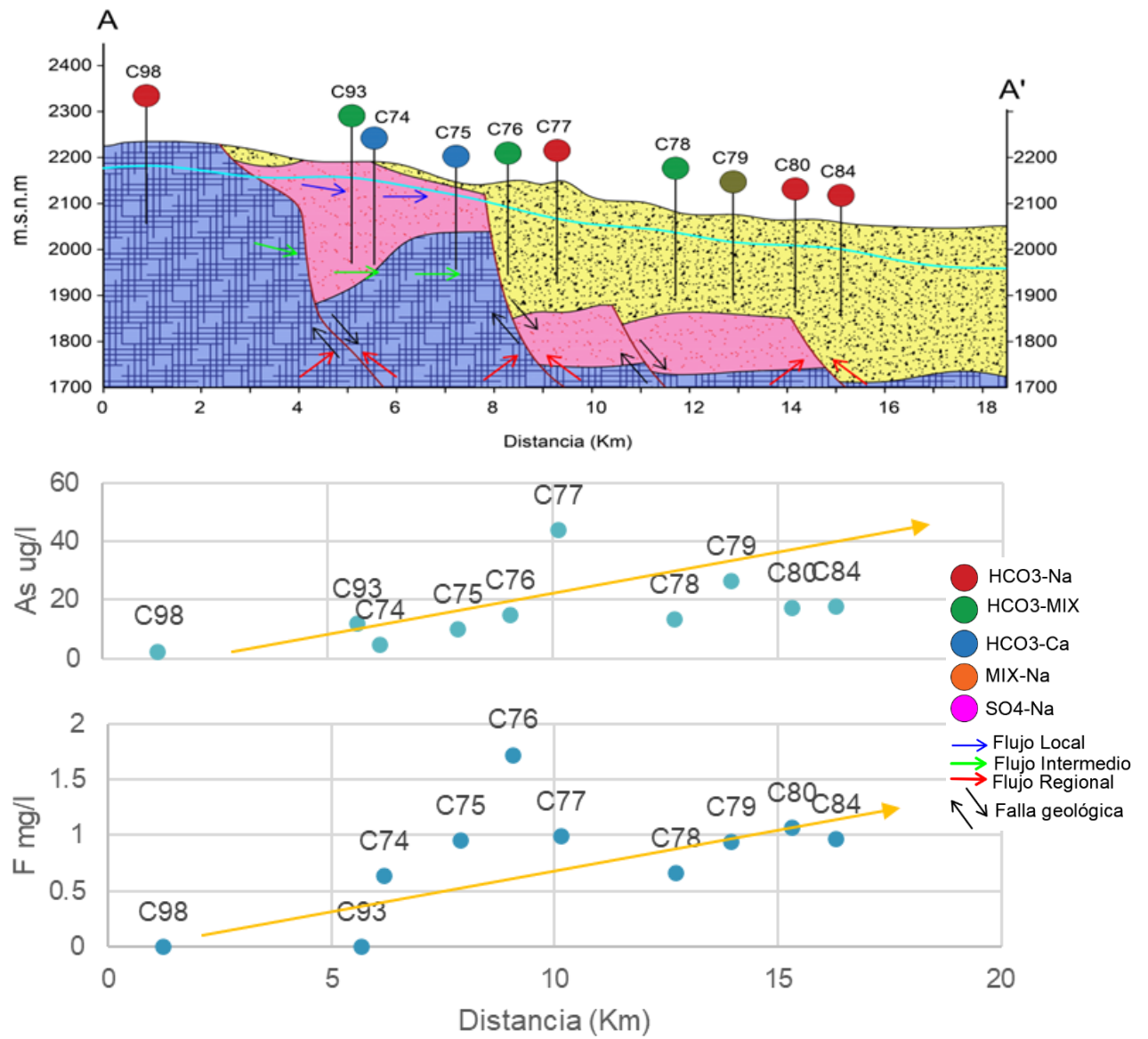


Figura 3.20 Sección A-A' de la evolución geoquímica del agua

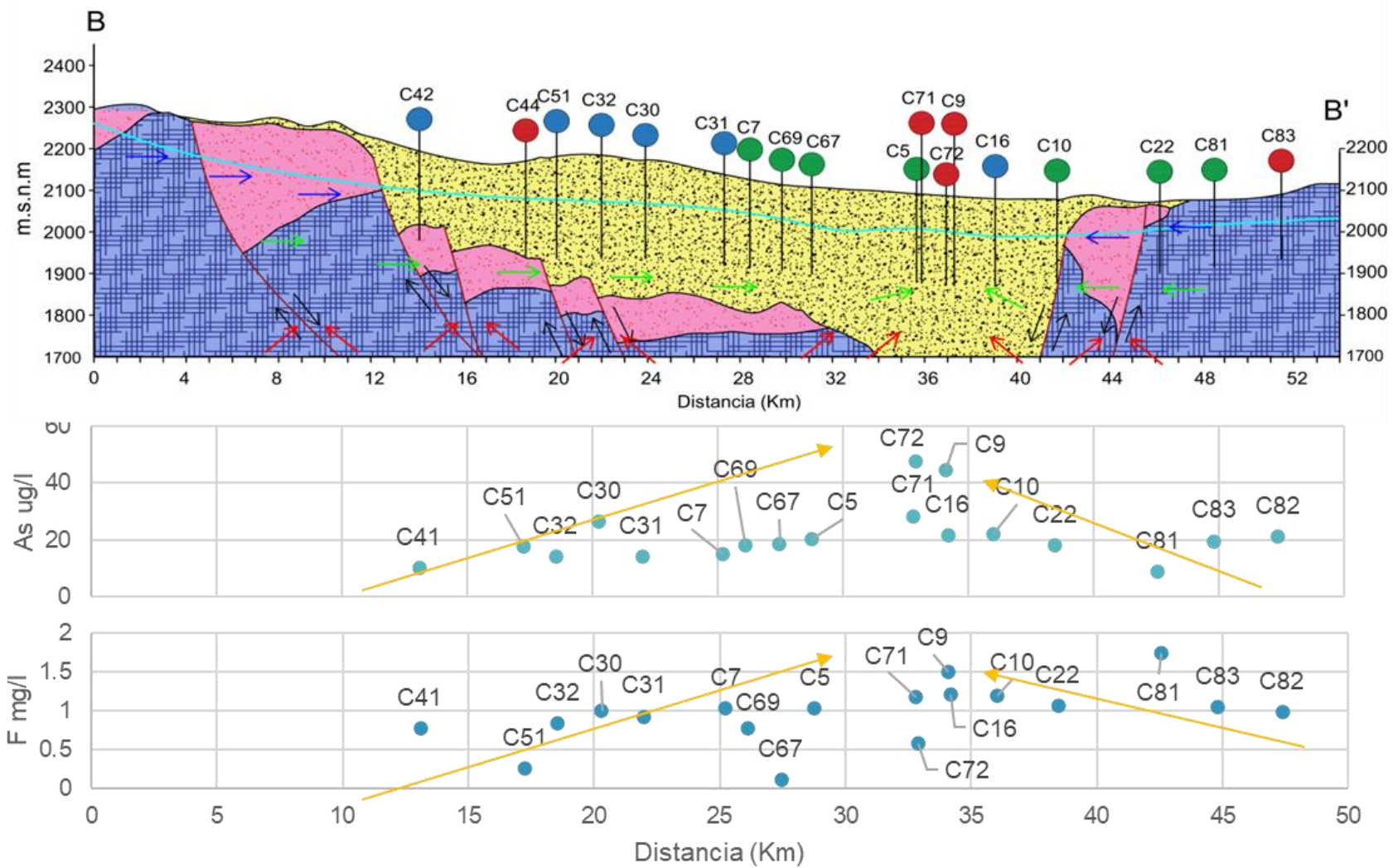


Figura 3.21 Sección B-B' de la evolución geoquímica del agua

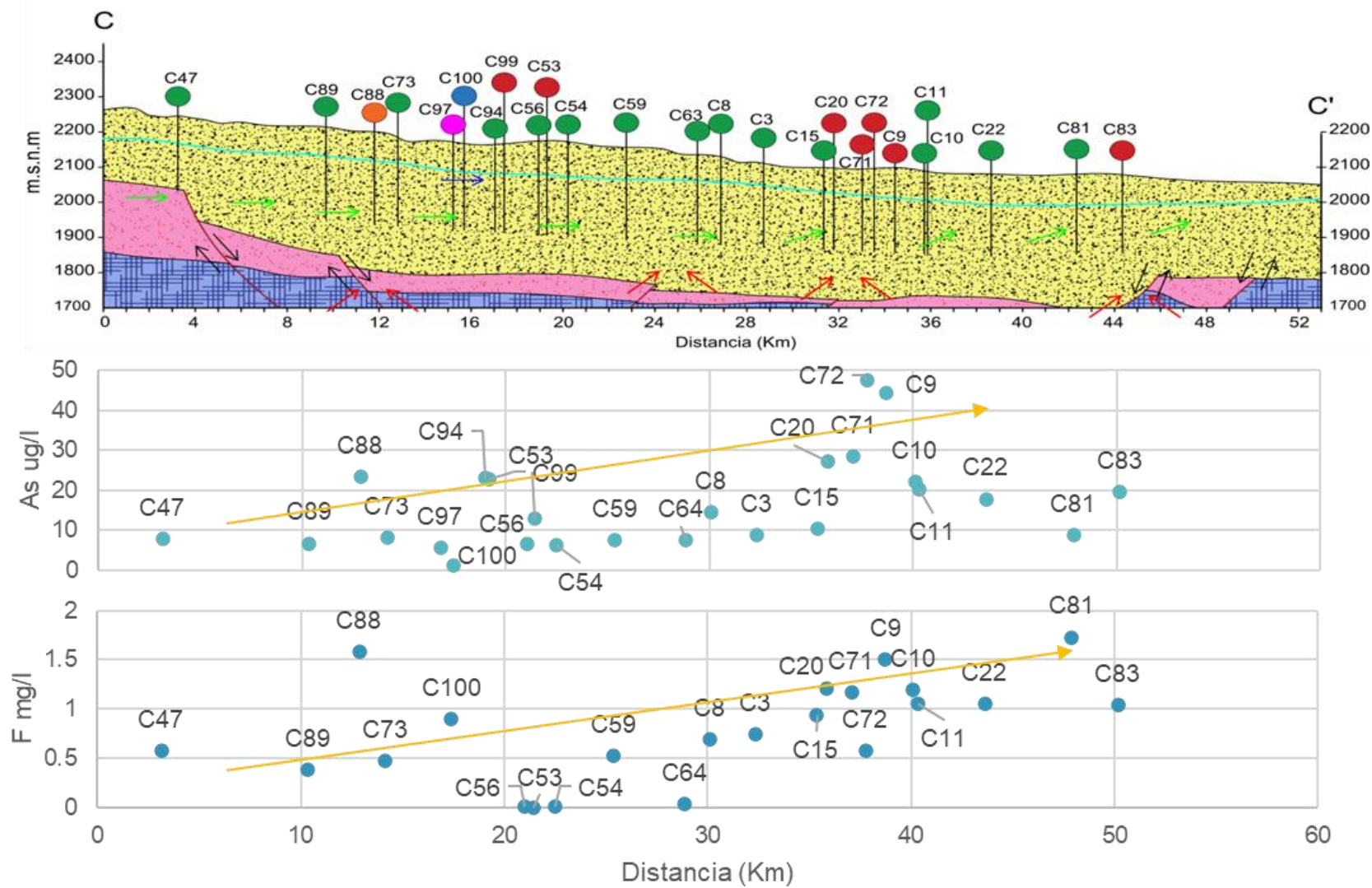


Figura 3.22 Sección C-C' de la evolución geoquímica del agua

4 Evaluación de las predicciones del periodo 2016-2022 del modelo numérico de flujo subterráneo

4.1 Aspectos generales

En el año 2018 Lisa Krienen presentó un modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera, Zacatecas desarrollado en su tesis doctoral denominada “Understanding deep groundwater flow systems to contribute to a sustainable use of the water resource in the Mexican Altiplano”. Para la resolución numérica del modelo se utilizó el software Feflow 7.0, en dicho modelo se contempla espacialmente solo la zona saturada, además de considerar un sistema de fallas identificado a través de estudios geofísicos. Esta investigación de los sistemas de flujo de agua subterránea proporciona la base para evaluar la condición actual de dos sistemas acuíferos a escala local y pronosticar la disponibilidad de agua subterránea en el futuro con una consideración regional que incluye los impactos de las altas extracciones de agua subterránea en el acuífero.

4.2 Alcances de la post auditoría

El alcance de la post auditoría consiste en la revisión del modelo numérico (2018) mediante el análisis comparativo de la nueva información de campo disponible en la cuenca, con el propósito de confirmar que las condiciones pronosticadas por el modelo numérico se desarrollan de acuerdo con esta información. Además de la revisión de la construcción del modelo conceptual y su posterior conversión a modelo numérico con el propósito de identificar posibles discrepancias y oportunidades de mejora en la etapa de actualización del modelo.

4.3 Objetivo

El objetivo de la presente post auditoría es la revisión completa del modelo numérico de flujo subterráneo del acuífero Calera, Zacatecas calibrado hasta el 2015 y presentado en el 2018 por L. Krienen, contemplando sus condiciones de borde, sistema de fallas, distribución espacial, los valores de los parámetros utilizados y si la predicción de niveles del modelo se comporta de manera satisfactoria de acuerdo con la Raíz del Error Cuadrático Medio Normalizado (NRMSE por sus siglas en inglés) con el que fue calibrado.

4.4 Planeación

El objetivo técnico de la investigación evaluada se establece en el desarrollo de un modelo hidrogeológico y un modelo numérico de flujo para el acuífero Calera y Benito Juárez, sin embargo, para el presente estudio solo se considera el acuífero Calera. En el modelo evaluado se abordaron las propiedades hidráulicas del sistema acuífero, en particular, la cuantificación de los volúmenes de entrada y salida en los bordes de los acuíferos adyacentes. Un objetivo intermedio fue la investigación de los sistemas de fallas por métodos geofísicos para profundizar en el conocimiento del entorno estructural. Estos nuevos hallazgos se integraron en el modelo numérico de flujo subterráneo. A su vez, para este proyecto se formularon los siguientes objetivos técnicos:

1. Determinación del marco estructural con respecto al sistema de fallas y estimación de la profundidad de la cuenca sedimentaria
2. Análisis de las propiedades hidráulicas del acuífero
3. Evaluación del régimen de flujo de agua subterránea
4. Desarrollo de un modelo geológico 3D
5. Desarrollo de un modelo hidrogeológico
6. Aplicación de los hallazgos obtenidos en el modelo numérico de flujo
7. Simulación de escenarios para el futuro

Del objetivo número 7 solo se evaluará el periodo 2016 a 2022, ya que en las predicciones realizadas por el modelo se diseñaron para el año 2060, por lo que fue necesario realizar nuevas proyecciones durante el proceso de post auditoría, las cuales se detallan en la sección 4.7.

4.5 Modelo conceptual y construcción del modelo numérico

Tabla 4.1 Comparación del modelo conceptual y la construcción del modelo numérico de Krienen

Componente analizado	Modelo conceptual	Modelo numérico
Dominio espacial del modelo	El modelo contempla únicamente el área saturada del acuífero Calera correspondiente a 995 km ² (44.7% del área del acuífero).	Se representa la superficie establecida en el modelo conceptual.
Condición inicial	Para la condición inicial del sistema se consideró la piezometría del año 1997 sin contemplar el régimen de bombeo de forma inicial.	Se simuló esta condición en estado estacionario, sin embargo, no se detalla en los resultados ya que sobre este se escribió el modelo en estado transitorio.
Discretización temporal	El modelo fue propuesto para el periodo del año 1997 al 2015.	Se simuló un régimen transitorio con 314 periodos de estrés para cada año (1997, 2007, 2011, 2013 y 2015) y la simulación duró 6942 días.
Discretización vertical	Conceptualmente se establece que la distribución de las UH TMvs y Tv se basa en muy pocos puntos de referencia, por lo que este modelo representa una aproximación del entorno geológico.	El modelo se compone de 3 UH representadas por 19 capas de un espesor promedio de 35 m, se estableció la capa número 7 como confinante, hecho que justifica a través de pruebas de bombeo y bibliografía. Este criterio no se considera adecuado ya que se aplicó para la capa completa y no para una situación local.
Geometría y Software	Para la implementación de información geológica en Feflow se utilizó herramienta GeoModeller, donde un modelo 3D discretizado se exporta como centroides con la información geológica, de esta manera la información geológica se vincula al modelo.	El modelo se desarrolló en la versión de Feflow 7.0 y consta de 542, 820 nodos, lo que equivale a 1, 024,442 elementos con figura de prisma triangular.

Componente analizado	Modelo conceptual	Modelo numérico
Sistema de fallas	En cuanto al sistema de fallas, conceptualmente establece que se necesitan más estudios geofísicos o registros estratigráficos sofisticados para verificar los resultados obtenidos.	Se incorporó el sistema de fallas identificado conceptualmente, no obstante, el refinamiento de las fallas no se considera adecuado al tener dimensiones transversales de 900 a 1200 metros de ancho, este sobredimensionamiento afecta en la entrada/salida de agua ya que se considera que las fallas tienen mayor capacidad conductiva en el eje z.
Recarga lateral	Se calculó el flujo horizontal con los principios de Darcy y pruebas de bombeo para establecer valores de conductividad, se consideró que el volumen de afluencia no puede originarse completamente por recarga vertical en los bordes del valle por lo que se sugirió una afluencia desde los sistemas de acuíferos vecinos.	Se emuló lo considerado en el modelo conceptual, que es contrario a lo que sugieren otros autores como Núñez (2003) que mencionan no existe entrada al acuífero por flujo horizontal.
Descarga	Se describe de manera óptima la existencia de un sitio de descarga en el centro del acuífero, en la zona de la laguna de Santa Ana, matemáticamente no se considera ningún cálculo de descarga.	El modelo calibrado final representa el régimen de flujo general con una dirección continua desde el graben sur hasta la región de descarga del lago Santa Ana, sin embargo, no se contempla en el modelo una descarga numérica.
Unidades Hidrogeológicas (UH)	Se desarrollaron pruebas de bombeo, sondeos geofísicos y una serie de análisis para determinar las UH que fueron discretizadas a 4 (QTU, Tv, Ccal y TMvs) a su vez se respaldan por bibliografía y antecedentes como el de Núñez (2003).	En el modelo numérico se descartó una UH, ya que al realizar la discretización espacial queda fuera del área de estudio. Dichas UH se distribuyen espacialmente en el modelo de acuerdo con el modelo geológico 3D y lo dispuesto en el modelo conceptual.

Componente analizado	Modelo conceptual	Modelo numérico
Coeficiente de almacenamiento (S _s)	Se utilizó en que se establece en la bibliografía de CONAGUA (2002) re trabajado por Ingeniería y Gestión Hídrica (2011) a través de la interpretación de pruebas de bombeo, como resultado se establecieron rangos para cada UH.	Los rangos de S _s se representan adecuadamente en el modelo de acuerdo con lo establecido en el modelo conceptual.
Pozos de observación	Dentro de la sección del acuífero Calera se cuenta con 86 pozos de control con series temporales de medición de niveles de los años 1997, 2007, 2011, 2013 y 2015.	Se ingresaron un total de 86 pozos de observación, en cada uno de estos es posible identificar en que capa y UH se encuentra situado.
Balance hídrico	Para la parte de extracción el modelo conceptual profundiza en la información obtenida en la literatura y CONAGUA que presenta menores volúmenes de acuerdo con el censo del 2010 (CONAGUA 2015 Cal, BJ), este último fue extrapolado para ser considerado hasta el 2015. También se consideró la recarga vertical por lluvia, retorno agrícola y zonas urbanas.	Los parámetros del modelo numérico representan de manera adecuada de acuerdo con el modelo conceptual establecido. En los resultados existen ligeras diferencias de aproximadamente 27 Mm ³ en los caudales totales entre el modelo numérico y el conceptual, es posible que estas diferencias provengan principalmente de la componente de evaporación y almacenamiento.

4.6 Análisis de sensibilidad

Un análisis de sensibilidad es el proceso de variar los parámetros de entrada del modelo en un rango razonable y observar el cambio relativo en la respuesta del modelo (Reisinger 2013). El análisis de sensibilidad refleja el impacto de las modificaciones de los parámetros en el resultado de la simulación. El porcentaje de aumento y disminución de parámetros individuales cambia el resultado de la simulación y es un indicador de la importancia del parámetro probado dentro del proceso de modelado (Krienen 2018).

Durante este proceso, se realizaron ajustes porcentuales en parámetros individuales con el objetivo de evaluar su impacto en los resultados de la simulación. Estos ajustes sirven como indicadores de la relevancia de cada parámetro en el proceso de modelado. Dado que Krienen proporciona los valores de su análisis de sensibilidad, se consideraron solo las variaciones máximas por debajo y por encima de los parámetros calibrados para la conductividad y el almacenamiento específico. Esto se hizo para validar el análisis de sensibilidad previamente desarrollado, ya que, si estos valores concuerdan con lo informado, se valida el análisis. Los parámetros alterados por Krienen incluyeron las conductividades hidráulicas (K), la tasa de recarga (Q) y las tasas de recarga por flujo lateral y flujo regional variándolos desde un 0% hasta un 200% por encima y por debajo de los valores previamente calibrados.

Al ajustar los parámetros de K y Q de la primera capa, se obtuvo un valor cercano al 98% reportado por Krienen en 2018, lo que valida los resultados existentes. Estas variaciones demuestran la influencia de los parámetros en el modelo, indicando su correcto funcionamiento.

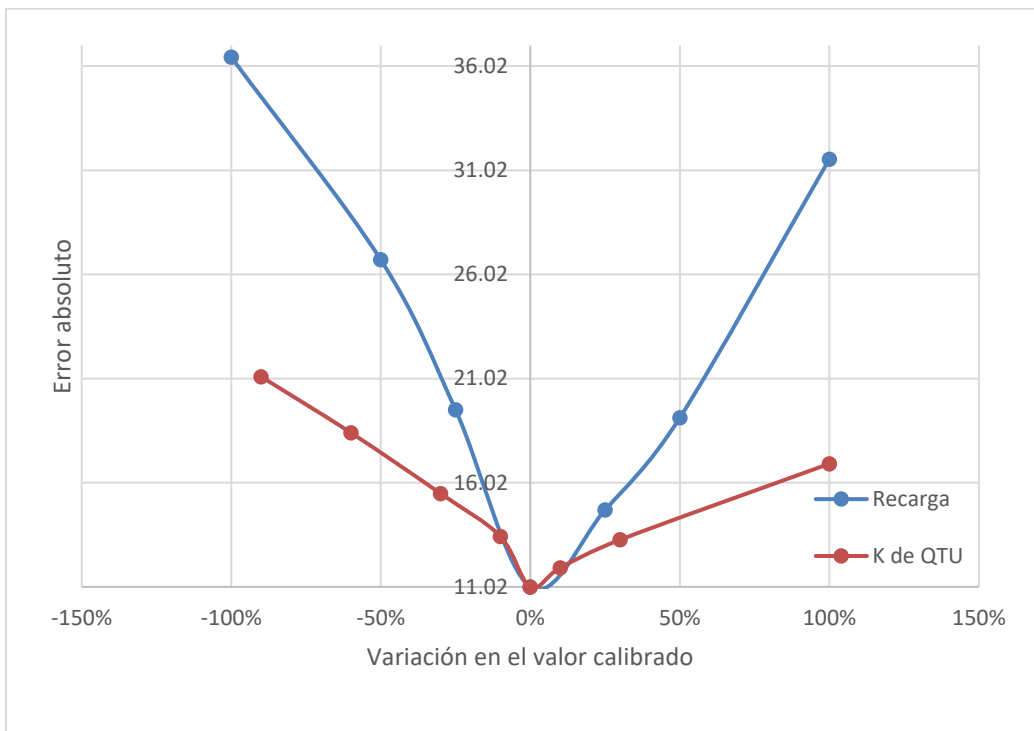


Figura 4.1 Análisis de sensibilidad del modelo de Krienen (2018)

4.7 Predicciones del modelo

Se realizó la proyección de los niveles estáticos estimados para el periodo de 2016 al 2023, de los 86 pozos observación que se identifican en la tabla 4.2. El periodo oficial establecido en el título abarca hasta el año 2022, sin embargo, durante el desarrollo de los cálculos de este capítulo se obtuvieron datos de una nueva red de monitoreo en tiempo real, por lo que se considera también en este periodo el año 2023.

Con los datos proyectados a partir de los pozos de observación mencionados, se generaron modelos digitales de elevación (MDE) como el de la figura 4.2, representando la piezometría para cada fecha de la que se tiene información piezométrica de campo, para así comparar posteriormente ambos datos.

La información de campo obtenida tuvo lugar en diversas fuentes, estas fueron: La Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Universidad Autónoma de Zacatecas, el Proyecto Aguas Firmes, el Consejo Técnico de Aguas Subterráneas Calera (COTAS) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Al proceder de diferentes organismos o universidades se reconoce la variabilidad espacial de la información, la cual dista en su mayoría de los pozos de observación con los que se proyectaron los pronósticos del modelo, por lo tanto, mediante los MDE, de forma manual se obtuvo la piezometría proyectada para cada ubicación en campo de la que se tiene registro en cada fecha. En la etapa posterior, mediante estadística, se analizaron las aproximaciones obtenidas por las proyecciones del modelo.

Tabla 4.2 coordenadas de ubicación de los pozos de observación

ID_GWM	ID_TS	X	Y	ID_GWM	ID_TS	X	Y
1_GWM_97-11-13-15	313	733488.976	2541379.47	50_GWM_11-13-15	358	737351.395	2536069.67
2_GWM_97-11-13-15	314	733643.51	2541154.14	51_GWM_11-13-15	359	737491.638	2519853.7
3_GWM_97-11-13-15	315	734286.873	2541564.21	52_GWM_11-13-	360	738290.634	2524765.51
4_GWM_97-11-13-15	316	734758.146	2541860.83	53_GWM_11-13-	361	738404.758	2541564.26
5_GWM_97-11-13-15	317	734813.937	2542668	54_GWM_11-13-15	362	738420.696	2549535.34
6_GWM_97-11-13-15	318	735192.51	2542147.67	55_GWM_97-11-13-15	363	739116.537	2559459.34
7_GWM_97-11-13-15	319	735501.815	2542958.8	56_GWM_13-15	364	739185.127	2521049.7
8_GWM_97-11-13-15	320	735873.264	2542712.27	57_GWM_97-15	365	739333.768	2534925.38
9_GWM_13-15	321	728160.254	2561192.79	58_GWM_13-15	366	739391.855	2533239.82
10_GWM_13	322	729781.54	2561248.45	59_GWM_97-13-15	367	739853.105	2518324.37
11_GWM_11-13-15	323	730250.01	2556150.23	60_GWM_97-11-15	368	739927.074	2542604.05
15_GWM_11-13-15	324	731414.208	2555057.25	61_GWM_97-11-13-15	369	740152.176	2551686.51
16_GWM_13	325	732095.072	2555030.87	62_GWM_97-11-13-15	370	740188.272	2561843.24
17_GWM_13	326	732447.038	2558212.27	63_GWM_11-13-15	371	741059.447	2546623.03
18_GWM_11-13-15	327	732529.328	2556582.5	64_GWM_97-11-15	372	741173.969	2537699.87
19_GWM_11-13-15	328	732900.349	2552864.55	65_GWM_11-13-15	373	741344.565	2557214.65
20_GWM_11-13-15	329	733210.883	2552306.21	66_GWM_97-11-13	374	741386.775	2527947.42
23_GWM_97-15	332	725786.894	2556294.5	67_GWM_11-13-15	375	741617.83	2551220.74
24_GWM_97-11-13	333	725846.634	2546663.45	68_GWM_11-13-15	376	743567.365	2548325.44
25_GWM_11-13	334	726064.446	2541650.76	69_GWM_97-11-13-15	377	743574.657	2554884.08
26_GWM_13-15	335	726852.611	2565398.07	70_GWM_11-13-15	378	745403.163	2551032.96
27_GWM_97-11-13-15	336	726854.06	2564742.62	71_GWM_97-15	379	745813.33	2562458.11
28_GWM_13	337	727424.872	2567047.05	72_GWM_97-11-15	380	746478.293	2548003.65
29_GWM_97-11-13-15	338	727640.564	2569124.52	73_GWM_97	381	737310	2514268
30_GWM_97-11-13	339	728225.95	2553161.85	74_GWM_97-11-13	382	737986	2509580
31_GWM_97	340	729090.356	2567331.1	75_GWM_97-13-15	383	738399	2516378
32_GWM_11-13-15	341	731687.339	2564970.88	76_GWM_11-13-15	384	733631	2512750
33_GWM_97-11-13-15	342	732064.229	2544327.12	77_GWM_97-11-13-15	385	734709	2509332
34_GWM_97-13-15	343	732396.126	2520882.73	78_GWM_97-11-13-15	386	737531	2516577
36_GWM_97-11-13-15	344	733090.856	2527663.54	79_GWM_97-11-15	387	735268	2515098
37_GWM_97-11	345	733442.242	2561920.78	80_GWM_13-15	388	736268	2510442
38_GWM_97-11-13-15	346	734044.52	2543403.82	81_GWM_97-11-13-15	389	738304	2515189
39_GWM_11-13-15	347	734491.157	2567599.89	82_GWM_97-11-13-15	390	737227	2513012
40_GWM_13	348	734662.846	2560308.85	83_GWM_97-11-13-15	391	735828	2512088
41_GWM_97-11-13	349	734934.509	2523731.44	84_GWM_11-13-15	392	735863	2514252
42_GWM_13-15	350	734985.41	2541541.25	85_GWM_13-15	393	736882	2512972
43_GWM_97-11-13-15	351	735102.097	2534058.74	86_GWM_13-15	394	734324	2509668
44_GWM_11-13-15	352	735764.913	2529951.47	89_GWM_97	396	719336.485	2567122.58
45_GWM_13-15	353	736189.439	2559163.46	90_GWM_11-15	397	729417.624	2557149.9
46_GWM_97-15	354	736322.844	2570127.88	91_GWM_11-15	398	730483	2559320
47_GWM_11-13-15	355	736673.805	2546522.48	94_GWM_97-11	399	731631	2555932
48_GWM_11-13-15	356	736794.462	2548444.75	96_GWM_11	400	732490.661	2520299.49
99_GWM_11	401	734014.067	2534355.73	102_GWM_11-15	402	737351.395	2536069.67

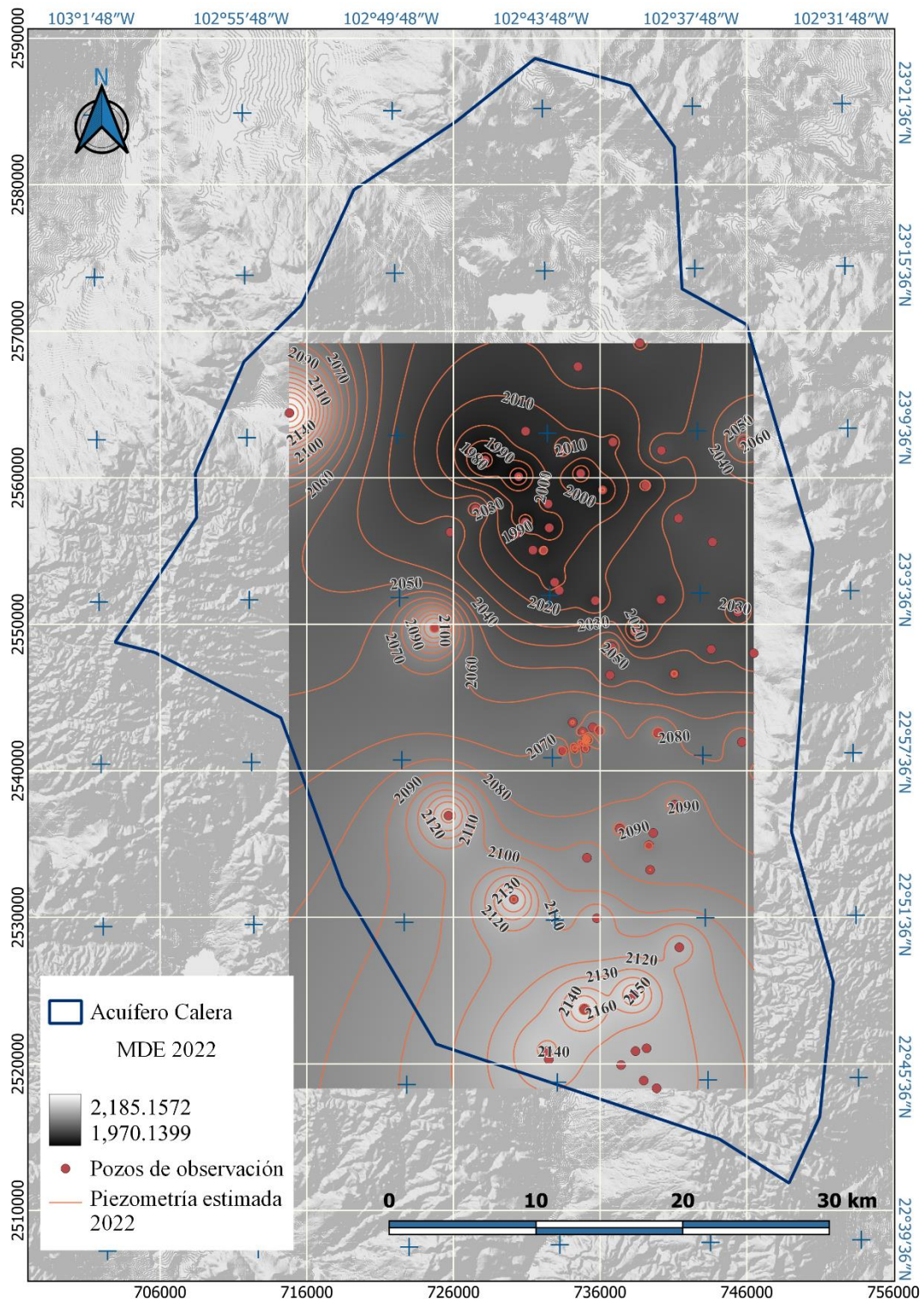


Figura 4.2 Desarrollo del Modelo Digital de Elevaciones pronosticado para el año 2022

4.8 Evaluación y observaciones

El resultado de una ejecución de simulación se puede evaluar mediante la NRMSE (ecuación 4.1) que mide la diferencia promedio entre los valores predichos de un modelo estadístico y los valores reales. Matemáticamente, es la desviación estándar de los residuos. Los residuos representan la distancia entre la línea de regresión y los puntos de datos (Frost 2023).

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_m - x_s)^2}$$

(4.1)

Donde: x_m Valor medido
 x_s Valor simulado
 n Cantidad de valores

Los valores de NRMSE pueden variar de cero a infinito positivo y utilizar las mismas unidades que la variable dependiente. A medida que los puntos de datos se acercan a la línea de regresión, el modelo tiene menos error, lo que reduce el NRMSE. Un modelo con menos error produce predicciones más precisas. Un valor de 0 significaría que los valores predichos coinciden perfectamente con los valores reales, sin embargo, eso nunca se verá en la práctica. Por el contrario, valores más altos sugieren más errores y predicciones menos precisas.

Una vez realizado el análisis espacial y estadístico descritos anteriormente se obtuvo el NRMSE para cada año como se puede apreciar en la tabla 4.3, en ella es posible apreciar que los valores del RMSE, a excepción del año 2018, se mantienen por debajo del 7%, que es acorde al 93% de aproximación con la que se calibró el modelo, no obstante, el promedio general del error se ve rebasado un 7% más debido al alto porcentaje de NRMSE del año 2018, el cual presenta casi el doble de error que los demás años. Los datos del año 2023 se obtuvieron recientemente y no se consideran dentro del promedio, solo son ilustrativos.

Tabla 4.3 Concentrado de los resultados de la estadística

Año	2017	2018	2020	2022	Promedio	2023
RMSE	11.694	15.215	10.893	9.884	11.92	23.60
NRMSE	6.84%	11.50%	6.94%	6.12%	7.85%	17.42%
E	9.05	11.47	9.79	7.99	9.57	22.20
MIN ENE	1989.70	1993.67	1994.20	1982.45	1990.00	1977.97
MAX ENE	2160.77	2126.00	2151.15	2143.91	2145.46	2113.45
MAX-MIN	171.07	132.33	156.95	161.47	155.45	135.48

Como se puede apreciar en las figuras de la 4.3 a la 4.6, la cantidad de datos comparados es variable, esto se debe a lo mencionado con anterioridad respecto a la procedencia de la información, al pertenecer a diferentes fuentes la cantidad y distribución de los elementos observados en campo es variable para cada año, sin embargo, algunos elementos coinciden y se identifican con la misma clave y nombre. En las figuras enlistadas se pueden apreciar barras de error, éstas abarcan un más menos 5%.

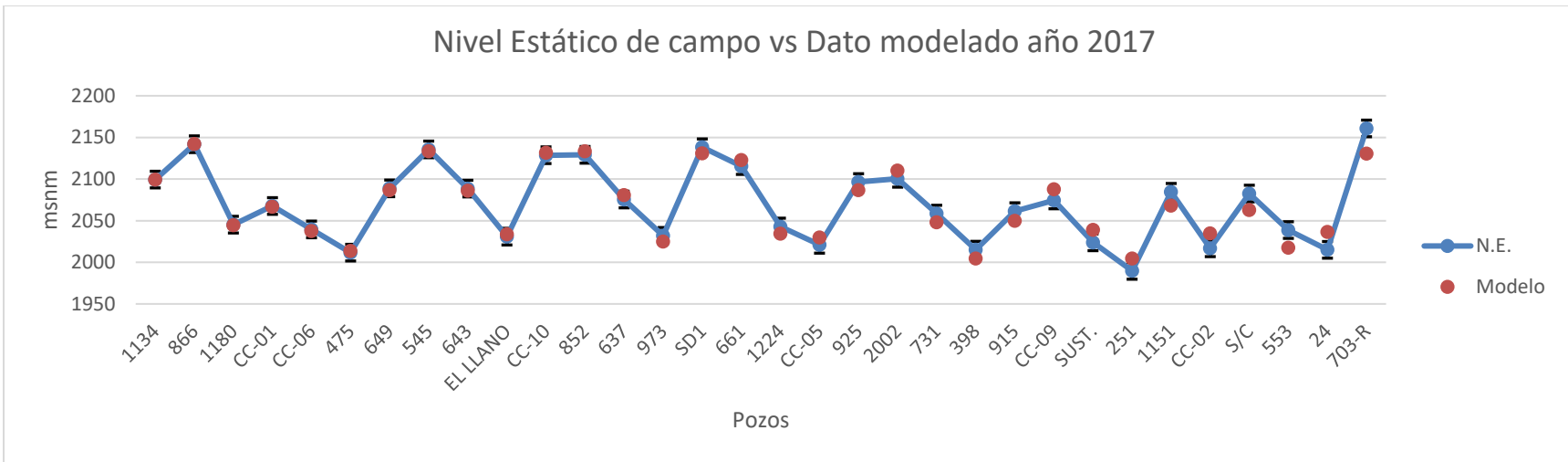


Figura 4.3 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2017

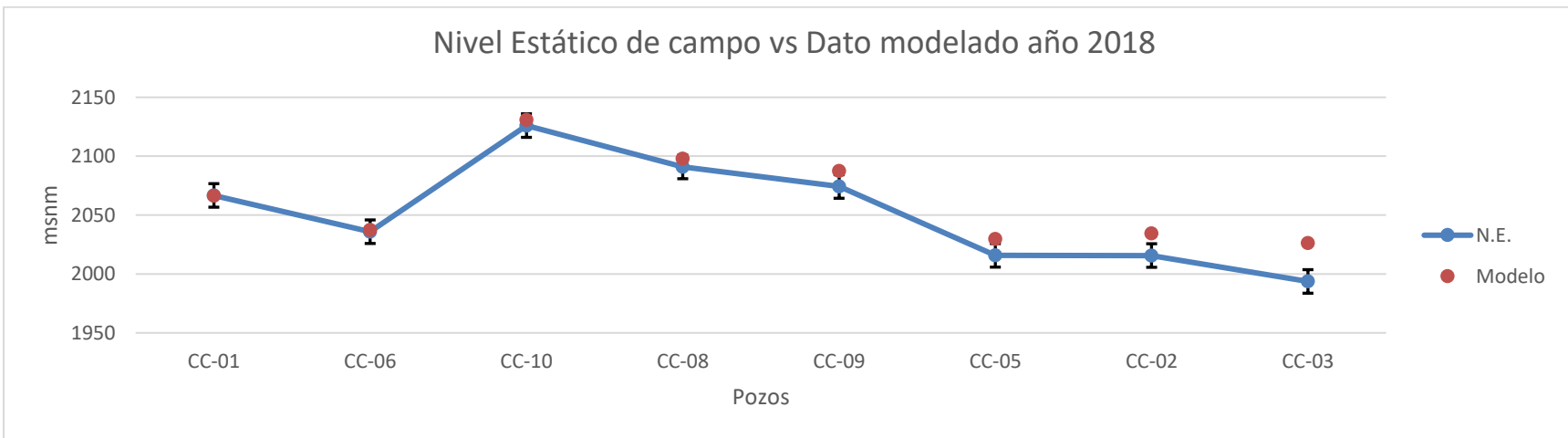


Figura 4.4 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2018

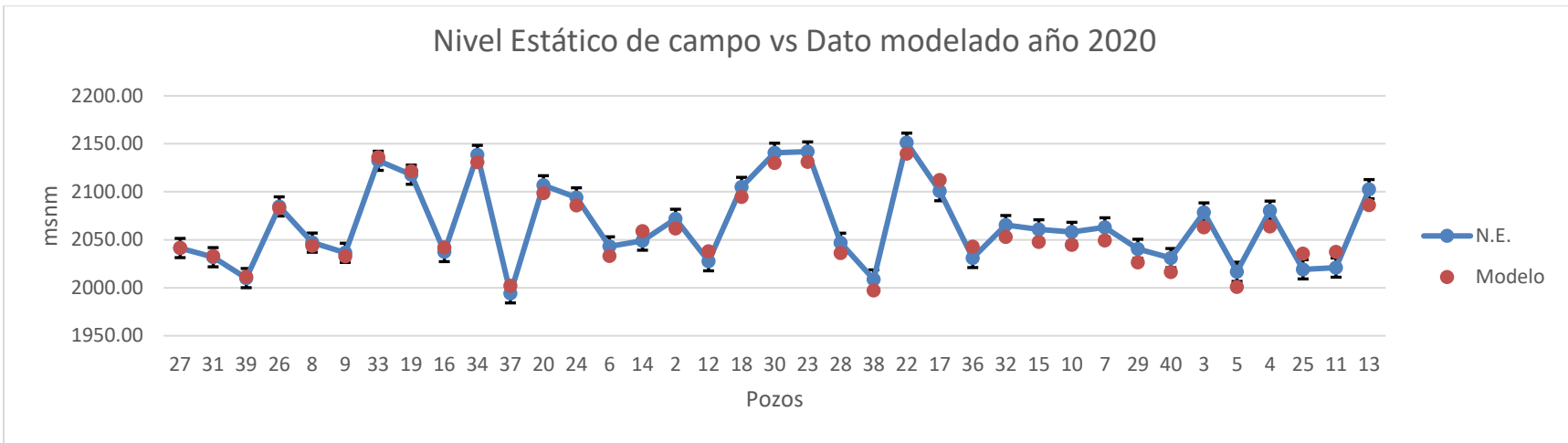


Figura 4.5 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2020

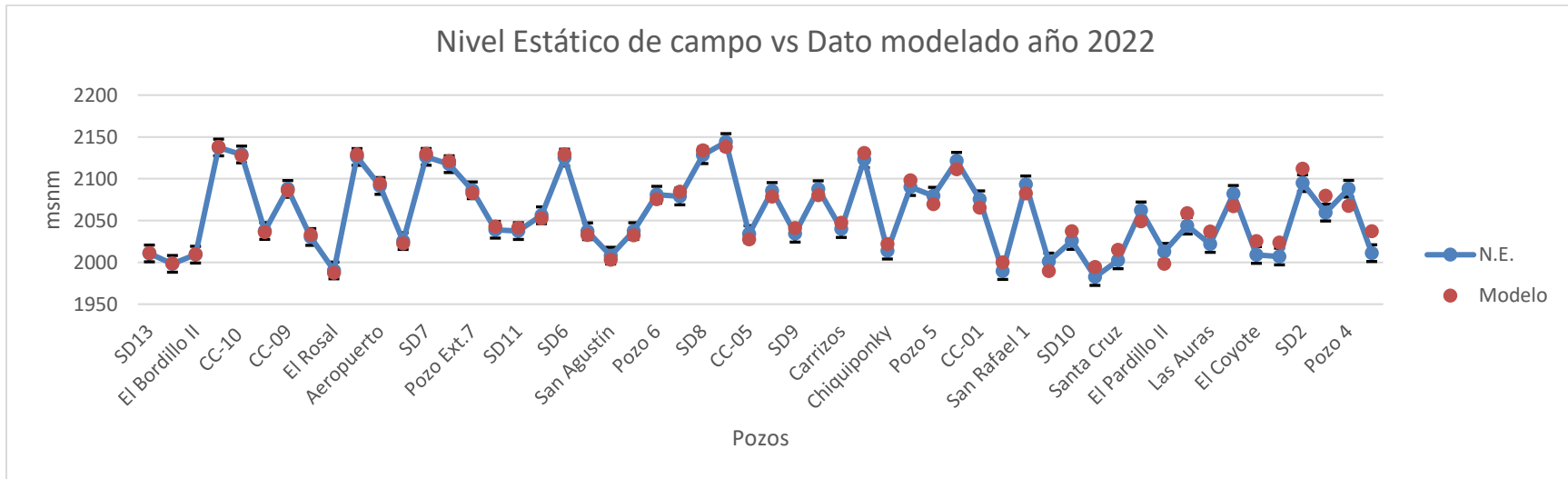


Figura 4.6 Comparativa entre el dato observado y el modelado en el año 2022

5 Actualización y mejora del modelo numérico de flujo subterráneo

5.1 Introducción

La modelación numérica del flujo de aguas subterráneas ha adquirido un papel fundamental en la gestión de este recurso desde los primeros desarrollos de modelos a principios de la década de 1970 (DVGW 2004). En la actualidad, se extiende a diversas aplicaciones que incluyen la delimitación de zonas de protección para sitios de producción de agua potable, la evaluación de contaminaciones en aguas subterráneas, la predicción de descensos o aumentos en los niveles de aguas subterráneas y la cuantificación de la disponibilidad del recurso, entre otros aspectos. La complejidad de un modelo específico varía según la naturaleza del problema abordado y puede oscilar entre una estimación sencilla y una simulación altamente sofisticada (DVGW 2004). Sin embargo, independientemente del tipo de modelo, la calidad y, por ende, la validez de este siempre están condicionadas por la calidad de los datos disponibles. En consecuencia, una simulación compleja de un acuífero demanda datos detallados que reflejen con precisión los factores geológicos e hidrogeológicos, así como sus procesos inherentes, a diferencia de un modelo más simple que se aplica de manera general. En este sentido, la formulación de una pregunta debe ajustarse a la calidad y disponibilidad de los datos, ya que la eficacia del modelo numérico está intrínsecamente ligada a la robustez de la base de datos.

5.1.1 Herramientas de modelación

Las soluciones numéricas se fundamentan en ecuaciones diferenciales que obedecen a las leyes físicas de equilibrios de volumen, masa y energía, junto con principios de flujo, transporte y reacción (DVWG 2004). Las condiciones iniciales y de borde describen la situación hidráulica al inicio del cálculo y caracterizan las condiciones en los bordes del modelo, respectivamente. La implementación de estas ecuaciones diferenciales implica la discretización del área del modelo en un número finito de vóxeles, elementos de datos o nodos en una cuadrícula 3D (DVWG 2004).

Cada vóxel contiene los parámetros descriptivos del sistema. Para resolver estas ecuaciones se destacan tres procedimientos numéricos: el Método de Elementos Finitos (MEF), el Método de Diferencias Finitas (MDF) y el Método de Volúmenes Finitos (MVF). El MEF emplea combinaciones lineales de funciones iniciales para encontrar soluciones al problema numérico dentro de un elemento, mientras que el MDF aproxima la solución mediante cocientes de diferencias finitas en los puntos de la cuadrícula. El MVF, aunque menos común en la modelización de aguas subterráneas, resuelve problemas de flujo mediante ecuaciones conservativas y permite soluciones no estacionarias. En este proyecto se optó por el MEF debido a que el modelo previo fue desarrollado en el software Feflow, que usa este sistema de soluciones. Como ventaja adicional, este sistema provee de mayores posibilidades de discretización en comparación con el FDM, ya que permite la implementación de elementos y geometrías irregulares.

Feflow, desarrollado por DHI-WASY, filial alemana del grupo DHI, se caracteriza por ser uno de los softwares más completos para el modelado del flujo de aguas subterráneas y la simulación del transporte de masa soluble. Este software es ampliamente utilizado por destacados institutos de investigación, universidades, empresas consultoras y organismos gubernamentales en todo el mundo. Su versatilidad se extiende desde modelos simples a escala local hasta modelos complejos de gran envergadura. Feflow destaca como un sistema integral que incluye una interfaz de programación pública para el código de usuario. Además, el software ofrece herramientas eficientes de pre y post procesamiento, así como algoritmos de cálculo de simulación altamente eficaces. Su interfaz gráfica de fácil utilización facilita el acceso a las numerosas opciones de modelado, lo que lo convierte en una herramienta poderosa y accesible para aquellos involucrados en la hidrogeoquímica y la modelación numérica de flujo de agua subterránea.

5.1.2 Ecuaciones

La modelación del flujo de agua subterránea en un medio poroso saturado requiere la aplicación de la ley de Darcy, que describe el comportamiento del flujo laminar en dicho medio. Esta ley se acopla con la ley de conservación de la masa para describir el flujo a través de un cuerpo, lo que justifica la necesidad de un modelo 3D parametrizado. La ecuación de flujo resultante para un

acuífero confinado, según el supuesto establecido por Kinzelbach y Rausch en 1995, se expresa de la siguiente manera:

$$\nabla(b\mathbf{K}_{ij}\nabla h) + q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.1)$$

Donde:

- ∇ operador nabla
- \mathbf{K}_{ij} coeficiente de conductividad hidráulica (m s^{-1})
- b espesor (m)
- h nivel estático (m)
- q fuentes o recursos ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$)
- S coeficiente de almacenamiento (-)
- t tiempo (s)

En el caso de un acuífero confinado donde $T = b * \mathbf{K}$, T representa una función de la ubicación. Por otro lado, en un acuífero no confinado, T también es función de la carga hidráulica, ya que el espesor del acuífero varía con la carga hidráulica.

En lo que respecta al coeficiente de almacenamiento S de un sistema acuífero confinado, S es una función de la compresibilidad del acuífero. En el caso de un acuífero libre, S es mayor que en condiciones confinadas debido al movimiento del nivel freático. Por lo tanto, S es esencialmente igual a la porosidad efectiva (n_e) y debe ser reemplazada por la misma, de modo que la ecuación 5.1 se desarrolle para:

$$\nabla((h - m)\mathbf{K}_{ij}\nabla h) + q = n_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.2)$$

$$\nabla((h - m)\mathbf{K}\nabla h) + q = n_e \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5.3)$$

Donde:

- m elevación del basamento del acuífero (m)
- n_e porosidad efectiva (%)

La discretización del modelo es esencial para aplicar la ecuación de flujo en los puntos nodales de la red. Todas las ecuaciones de flujo de una cuadrícula se resumen en un conjunto de ecuaciones diferenciales, las cuales se resuelven como un sistema de ecuaciones lineales mediante métodos de cálculo numérico y se expresan en forma de una matriz de coeficientes. Aunque existen soluciones analíticas como la Función Theis y Hantush, estas soluciones requieren supuestos específicos, como un acuífero homogéneo y extenso infinitamente, limitando su aplicabilidad a problemas de flujo regional, por lo tanto, se hace necesario recurrir a soluciones numéricas.

La solución numérica de las ecuaciones diferenciales ofrece dos enfoques: la solución explícita y la implícita. La solución explícita de la ecuación diferencial calcula la altura hidráulica para cada nodo, excepto aquellos con valores prescritos, mediante la distribución inicial y la aplicación repetida del resultado de un nodo como valor inicial para el siguiente. Este método crea la distribución de la altura hidráulica en todo el modelo en cualquier momento. Sin embargo, en muchas ocasiones, este método resulta poco práctico debido a su inestabilidad con el aumento de nodos y el tiempo de simulación, además de requerir una capacidad de cálculo significativa, por ende, este método rara vez se utiliza en la práctica (Kinzelbach y Rausch, 1995).

Mediante métodos de solución implícitos, se estiman los gradientes entre las celdas, generando un sistema de ecuaciones lineales acopladas entre los niveles estáticos conocidos y desconocidos en el sistema nodal. Para resolver este sistema de ecuaciones, existen varios métodos matemáticos con diferentes enfoques para calcular de manera iterativa o directa las cabezas hidráulicas. Los métodos directos ofrecen una solución exacta del sistema de ecuaciones, pero requieren una capacidad de cálculo considerable, especialmente en modelos con un gran número de nodos. Por otro lado, los métodos iterativos proporcionan la solución cuando el error cae por debajo de una tolerancia de error definida (Spitz y Moreno, 1996; Kinzelbach y Rausch, 1995).

Feflow ofrece dos solucionadores de ecuaciones: uno iterativo, el Gradiente Conjugado Precondicionado (GCP), que se aplica de manera predeterminada, y otro solucionador algebraico de múltiples redes (SAMG). Este último es más eficiente, pero requiere un sistema multiprocesador. La elección entre estos métodos dependerá de las características específicas del modelo y los recursos computacionales disponibles, para el presente caso de estudio se utilizó el método GCP.

5.2 Objetivos del modelo

Los modelos numéricos de flujo de agua subterránea usualmente son implementados con el propósito de influir en la gestión y toma de decisiones de algún organismo por medio de la interpretación hidrodinámica del sistema acuífero. Suelen incluir variables climáticas o escenarios de extracción intensiva para luego elegir las mejores alternativas.

El objetivo de la actualización del modelo numérico se enfoca en incorporar la información más reciente del sitio de estudio, la cual consta de información piezométrica del periodo 2016-2023, nueva información geofísica para mejorar la calidad del modelo geológico 3D, la incorporación de un modelo de recarga desarrollado con la herramienta Soil & Water Assessment Tool (SWAT) y el uso de Software y Hardware contemporáneos.

5.3 Datos e implementación del modelo

5.3.1 Discretización espacial

Para esta actualización, a diferencia del modelo inicial que consta únicamente del área saturada (995 km²), se contempló el total de la superficie del acuífero, que como se menciona en la sección 3.1.1 consta de 2,226 km². El área de trabajo está definida en la tabla 3.1 de coordenadas del límite del acuífero Calera. El sistema de coordenadas utilizado fue el WGS 84/UTM zona 13 norte.

De forma vertical el modelo consta de 20 capas con espesores variados. La representación en 3D consta de elementos con forma de prisma triangular, cada prisma se compone de 6 nodos, que a su vez se comparten con los prismas vecinos. En su totalidad, el modelo se conforma de 1,981,180 elementos que comparten 1,047,396 nodos.

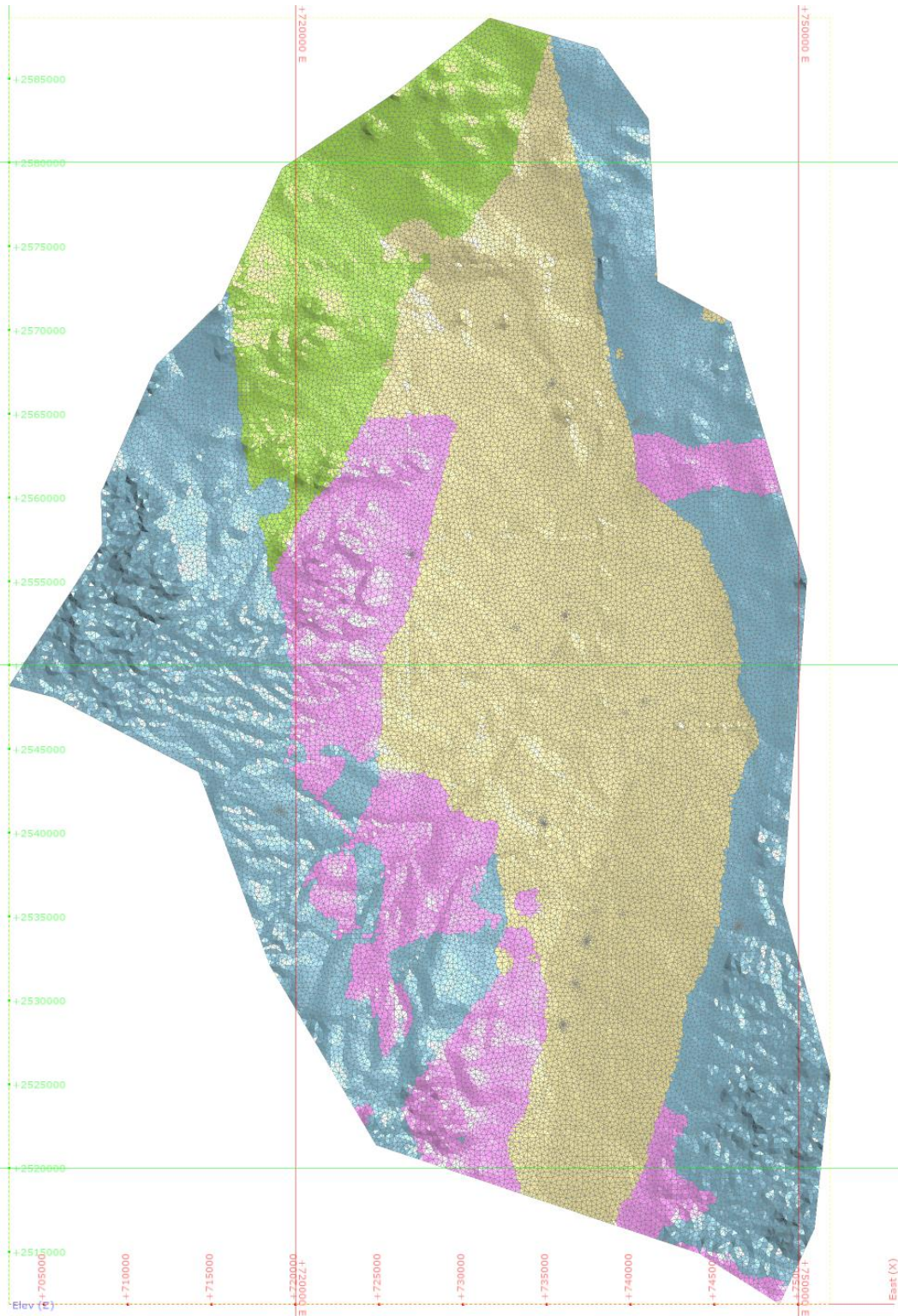


Figura 5.1 Planta de la discretización espacial del modelo

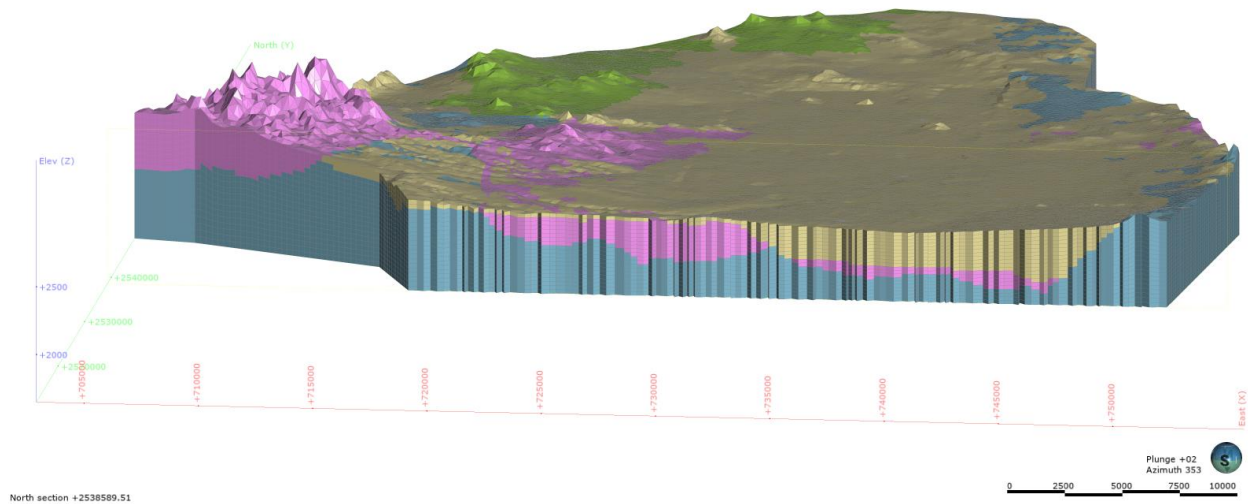


Figura 5.2 Sección transversal del modelo para visualizar las 20 capas

5.3.2 Unidades geológicas

El conjunto de información geológica se obtuvo de un cúmulo de estudios previos en el sitio de estudio que concluyen en la definición de 8 secciones geológicas del sitio de estudio desarrolladas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau en 2019 (figuras 5.3 a la 5.6). Para el desarrollo de estas, se realizaron diversas actividades en diversos proyectos y por diferentes investigadores. Todo este proceso se llevó a cabo por medio de actividades geofísicas: sondeos electromagnéticos, procesamiento de datos electromagnéticos, desarrollo de secciones geofísicas y finalmente la conversión de éstas en secciones geológicas, posteriormente discretizadas en UH. A continuación, se describe un poco en que constan estas actividades.

Sondeos Electromagnéticos

La técnica de exploración geofísica denominada sondeo electromagnético transitorio (SEMT o TDEM por sus siglas en inglés) se emplea para estimar la resistividad eléctrica de las capas subterráneas en diversos campos, como la geohidrología, la minería y la geotermia. En términos generales, los SEMT se llevan a cabo mediante una unidad emisora que se conecta a un cable, una bobina o un dipolo eléctrico, además de un sensor que recibe y transmite la señal a una unidad

receptora. Cuando se introduce una corriente constante en el cable emisor, se genera un campo magnético primario. Al interrumpir bruscamente esta corriente, se perturba el campo magnético primario y se originan corrientes eléctricas en el subsuelo para cumplir con la ley de Faraday. Estas corrientes fluyen en circuitos cerrados bajo tierra y se desplazan en sentido vertical y horizontal, disminuyendo su intensidad con el tiempo. Como resultado, se genera un campo magnético secundario transitorio que induce una variación de voltaje en el receptor. La manera en que disminuye este voltaje proporciona datos sobre la resistividad del subsuelo, ya que la magnitud y distribución de las corrientes inducidas se relacionan con la resistividad. Además, la forma en que las corrientes se desplazan en profundidad se utiliza para evaluar la profundidad de las capas subterráneas: los voltajes medidos en intervalos cortos ofrecen información sobre la resistividad superficial, mientras que los medidos en intervalos largos brindan datos sobre la resistividad a mayor profundidad. (Flores 2005).

Adquisición de datos

Se eligieron ubicaciones en áreas abiertas con un tamaño mínimo de 2,500 m², que es el espacio adecuado para instalar el equipo de medición. Además, se tuvo en cuenta la preferencia por áreas que carecieran de vegetación densa, líneas eléctricas, tuberías metálicas u otros elementos que pudieran causar interferencias en las lecturas debido a actividades humanas.

Se realizaron 2 secciones verticales de 52 y 61 kilómetros, mientras que en el sentido horizontal se realizaron 6 secciones que varían de 24 a 36 kilómetros, el espaciamiento entre sondeos también es variable y va de los 200 m a los 2.7 kilómetros, la figura 5.3 ilustra la ubicación de los TEM y las secciones.

El tipo de configuración del circuito empleada en este proyecto se conoce como "Single Loop" (circuito único). Se emplearon bobinas cuadradas de 50x50 metros, que funcionaron tanto como transmisores (Tx) como receptores (Rx) de la señal. La profundidad máxima de investigación alcanzada fue de 500 metros. Se llevaron a cabo un total de 179 sondeos, y en cada punto se realizaron tres lecturas con el propósito de estandarizar los parámetros del equipo, con el fin de obtener la información de mejor calidad posible y, por consiguiente, la respuesta óptima del medio.

En cuanto a los componentes utilizados para generar los sondeos, se emplearon cables calibre 18 para la construcción de los circuitos. Además, se utilizó un dispositivo GPS, con un margen de error de ± 5 metros, para determinar la ubicación precisa de cada punto de medición.

El resultado de cada sondeo se presenta en forma de gráficas que representan el decaimiento del voltaje en función del tiempo. Cada gráfica genera un archivo en formato “. sir”, que se procesa de acuerdo con estándares internacionales utilizando software especializado, como Temix para el primer procesamiento de los datos y Winglink para la creación de una base de datos. Esto permite establecer unidades geoelectricas para la formación de perfiles y secciones de resistividad en el área de estudio. La tabla 5.1 describe la relación entre la estratigrafía, la unidad geoelectrica a la que pertenece, el rango de resistividad y la U.H. a en la que se clasifican.

Tabla 5.1 Unidades geoelectricas, resistividad y UH. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauich-Kau (2019)

Estratigrafía	Unidad geoelectrica	Resistividad (ohm)	U.H.
Sedimentos aluviales	U1 a	5-10	QTU
Conglomerado polimíctico	U1 b	10-15	QTU
Basaltos	U2 a/b	20-25	Tv
Riolitas	U2 a/b	25-50	Tv
Tobas riolíticas	U2 a/b	25-50	Tv
Ignimbritas	U2 a/b	25-50	Tv
Granito	U3	250	Tv
Rocas calizas	U4	75-110	Ccal
Formación chilitos	U5 a/b	200-225	TMvs
Formación Zacatecas	U6	225	TMvs

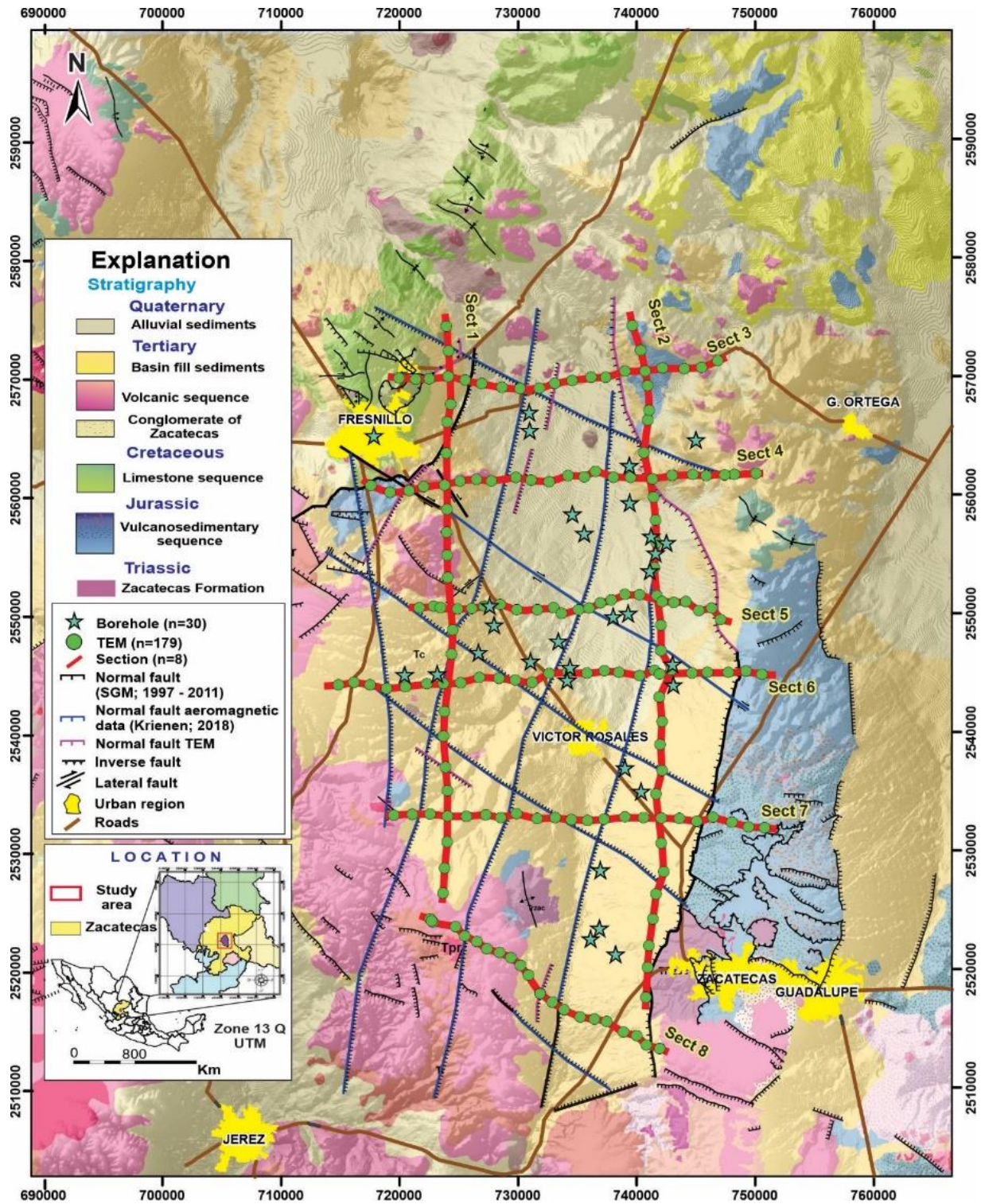


Figura 5.3 Ubicación de las secciones geoelectricas. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauch-Kau (2019)

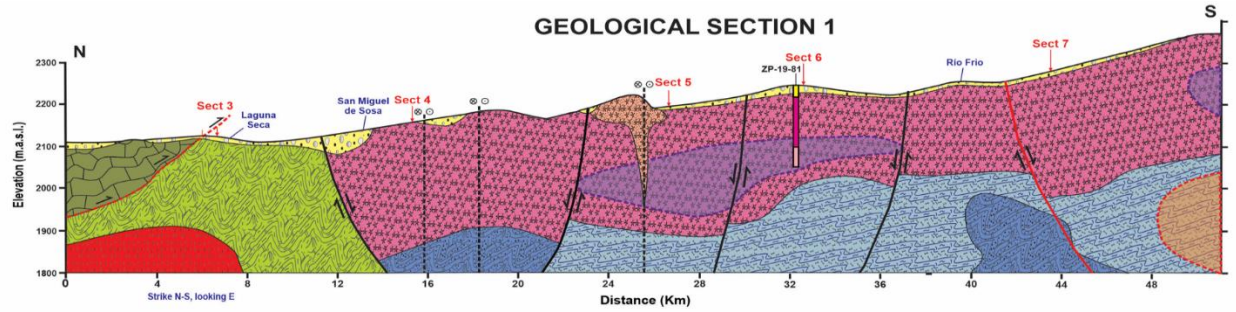


Figura 5.4 Sección geológica 1. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauch-Kau (2019)

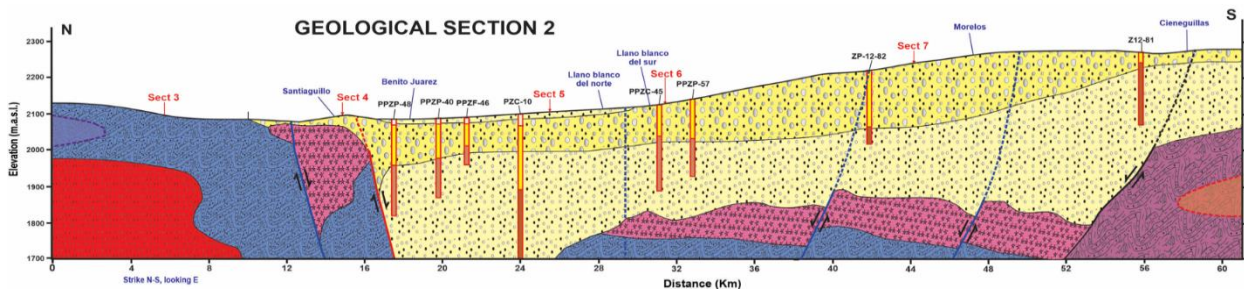


Figura 5.5 Sección geológica 2. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauch-Kau (2019)

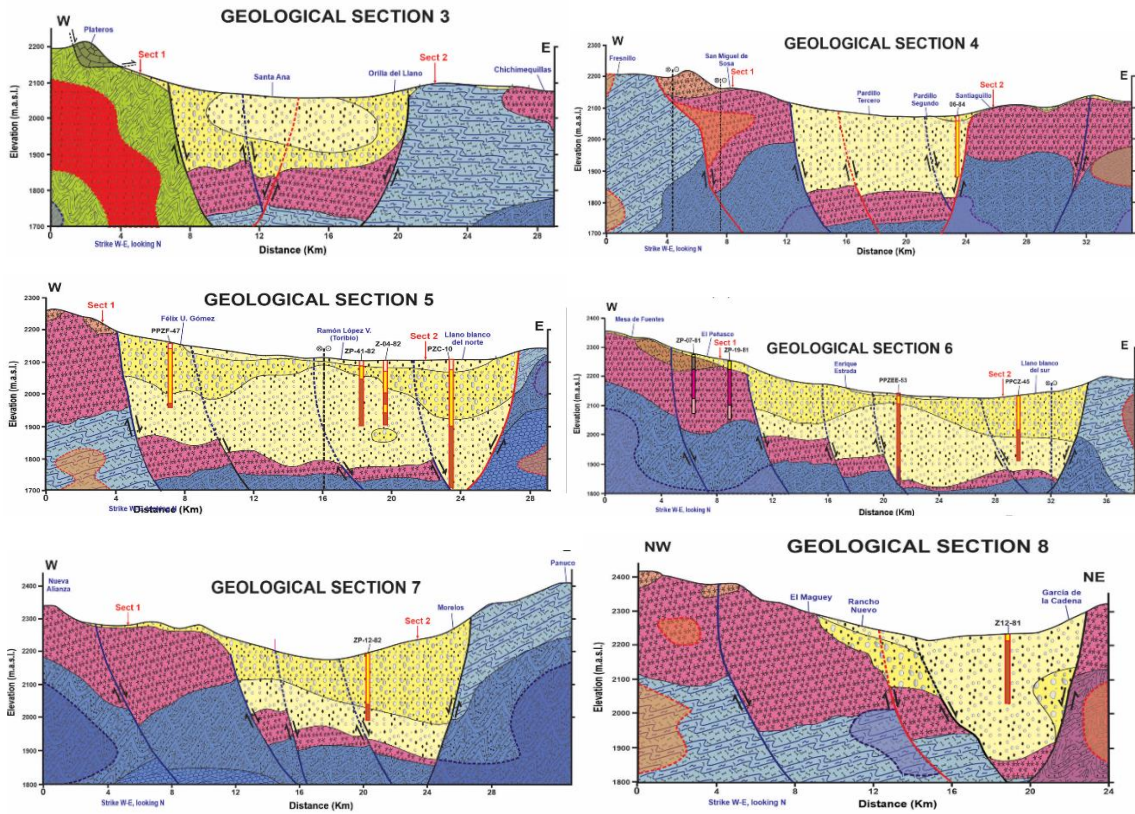


Figura 5.6 Secciones geológicas de la 3 a la 8. Elaboradas por Rivera-Armendáriz y Cauch-Kau (2019)

5.3.3 Procesamiento de las UH

La geología previamente discretizada en UH se trabajó en software de modelado geológico (Leapfrog Geo), en el cual, inicialmente se introdujeron las secciones geológicas descritas anteriormente, éstas se recortaron en secciones más pequeñas con el objetivo de orientarse en el sentido en el que fueron trazadas espacialmente en el acuífero. Posteriormente, se añadió la topografía, que consta de 6 MDE con pixeles con precisión a de 5 a 15 m (figura 5.7 Der.). En seguida se incorporó el sistema de fallas visualizado en la figura 5.8 Izq. Después se generaron los volúmenes para cada UH, que posteriormente fueron transformado en una malla triangular (Figura 5.9), a cada UH se le asignaron propiedades hidráulicas para facilitar el reconocimiento de estas en el software Feflow.

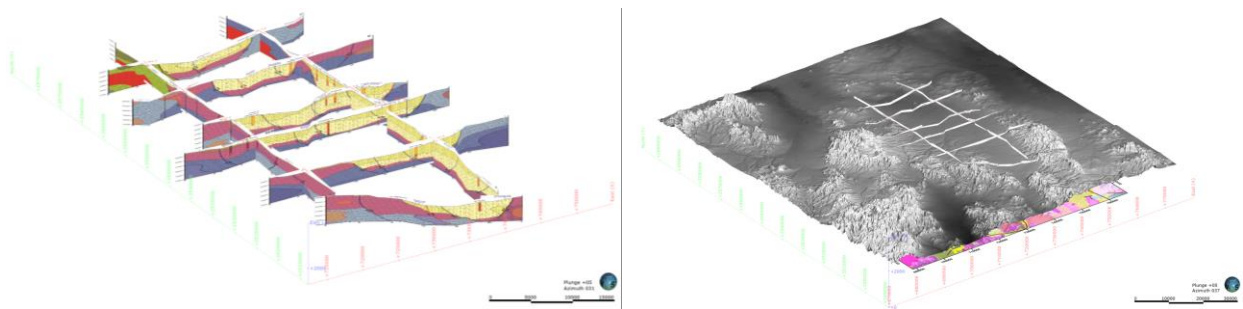


Figura 5.7 Secciones geológicas distribuidas espacialmente (Izq.) e incorporación de la topografía (Der.)

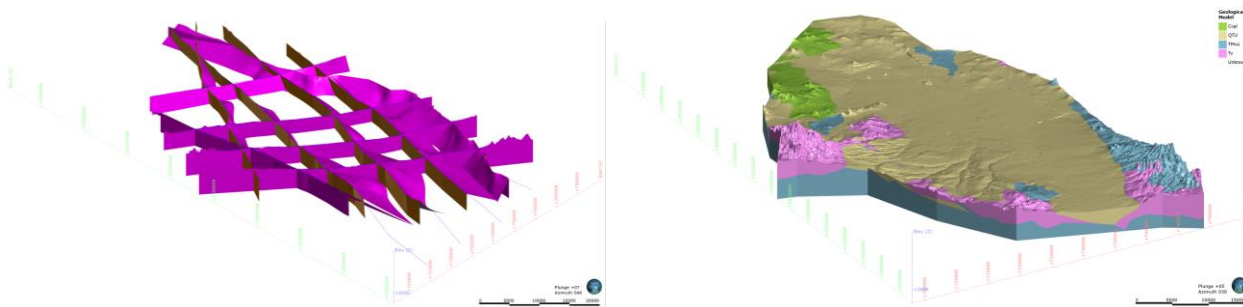


Figura 5.8 Desarrollo del sistema de fallas (Izq.) y Desarrollo de la geología (Der.)

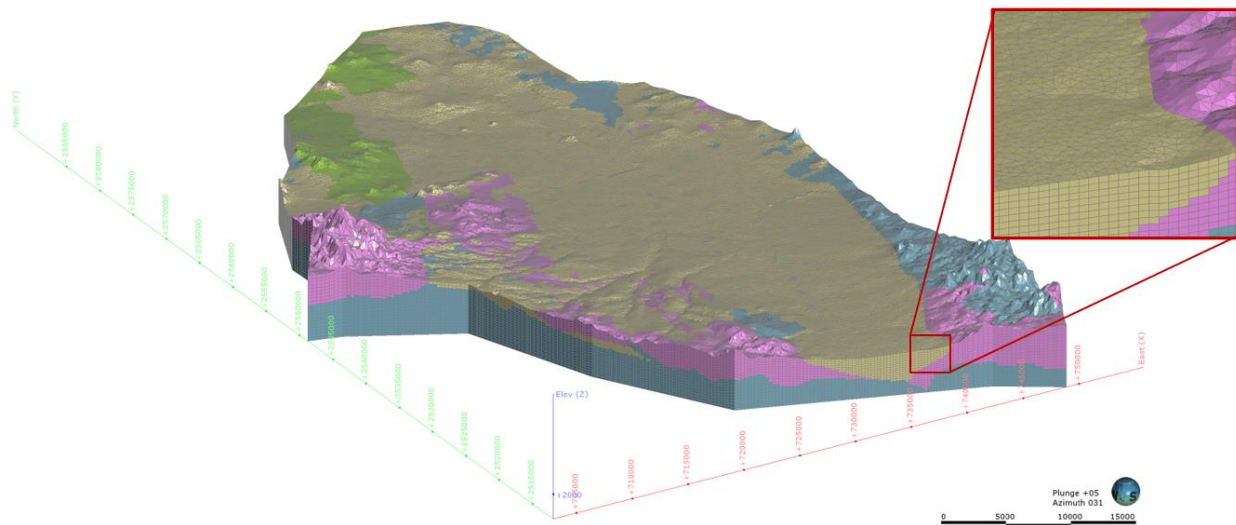


Figura 5.9 Triangulación para adaptar al software de modelación hidrológica Feflow

5.3.4 SWAT y recarga de agua subterránea

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es una herramienta de evaluación de suelos y aguas, opera como un modelo que abarca desde pequeñas cuencas hasta cuencas fluviales completas. Su función principal consiste en simular tanto la cantidad como la calidad del agua superficial y subterránea, con el propósito de anticipar los impactos ambientales resultantes del uso del suelo, las prácticas de manejo de la tierra y los cambios climáticos. La aplicación extensiva de SWAT se destaca en la evaluación de medidas para prevenir y controlar la erosión del suelo, así como en el manejo de la contaminación originada por fuentes difusas y en la planificación regional de cuencas hidrográficas.

SWAT discretiza el área del modelo en subcuencas, dividiéndolas a su vez en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Cada una de estas unidades conserva características similares para cada uno de los parámetros de entrada, como la cobertura y el uso del suelo (Gassman y cols., 2007). Dentro de cada HRU, se simulan procesos complejos generando balances hídricos en periodos de tiempo diarios, mensuales o anuales. A nivel de subcuenca, el modelo logra simular el escurrimiento y procesos de erosión, así como la evapotranspiración y el movimiento de biomasa, como el ciclo del carbono y el transporte y degradación de bacterias.

El intento de acoplar SWAT al software Feflow no se realiza con frecuencia, apenas es posible encontrar algunos casos en Irán y E.U.A., para el caso de México es algo que no se ha mencionado antes en la bibliografía. La interacción más común entre SWAT y los softwares de modelación es con Visual Modflow, la forma más común de interacción de los modelos fue desarrollada por Bailey (2016) el cual integró una interfaz más amigable para hacer esta interacción.

En el área de estudio se desarrolló un análisis anual del balance hídrico utilizando la herramienta SWAT. Este trabajo fue llevado a cabo por el Dr. Carlos Alfonso Muñoz Robles y su equipo en el Instituto de Investigaciones en Zonas Desérticas de la UASLP. El modelo incorporó datos diarios de precipitación y temperatura provenientes de cuatro estaciones automáticas gestionadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), los cuales abarcan el periodo de 2011 a 2021, sin embargo, el modelo requiere de un mínimo de 3 años para ajustarse, por lo que los años válidos son del 2014 al 2021. Además, se incluyeron capas de tipo y uso de suelo, así como un modelo digital de elevaciones con una refinación de 15x15 metros. El modelo resuelve la ecuación de balance general en dos fases en cada una de las diversas Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). La primera fase controla tanto la cantidad de agua como de sedimentos, mientras que la segunda fase aborda el movimiento del agua y la biomasa dentro de la cuenca. La ecuación de balance en la primera fase se describe de la siguiente manera:

$$S\omega_t = S\omega_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{suf} - Ea - W_{seep} - Q_{qw}) \quad (5.4)$$

Donde:

- $S\omega_t$ contenido final de agua en el suelo (mm)
- $S\omega_0$ contenido de agua en el suelo (mm)
- R_{day} lluvia en el día i (mm)
- Q_{suf} escurrimiento (mm)
- Ea evapotranspiración en el día i (mm)
- W_{seep} agua infiltrada (mm)
- Q_{qw} agua de retorno (mm)

En cuanto a la incertidumbre del modelo existe una gran discrepancia entre los valores de recarga reportados por CONAGUA (2015) y SWAT del orden mayor al 500%. Un punto clave para comprender las razones de dicha diferencia radica en la calibración del modelo de SWAT, esto debido a que no existen mediciones de aforo a la salida de la cuenca de estudio para corroborar los datos de salida de SWAT. Para el año 2015 SWAT reporta un 0.69% de recarga sobre el total de la precipitación, mientras que CONAGUA reporta un 3.79%, por lo que fue necesario realizar algunos ajustes en el modelo con la finalidad de alcanzar el mismo porcentaje de recarga. Al realizar esta acción se obtuvo la recarga estimada para el periodo de 2014 a 2021, la cual se relacionó con la precipitación para desarrollar una ecuación polinómica que permitiera estimar la recarga potencial del acuífero en el periodo de 1997 al 2013.

Debido a que no existe una herramienta para ligar directamente la recarga estimada en SWAT, se realizó un análisis temporal y una discretización espacial para introducir estas características de manera manual al software de modelación Feflow. SWAT estima la recarga por Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU), el modelo consta de 1278 HRU, estas unidades fueron discretizadas en 3 grupos de áreas con características de recarga alta, media y muy baja (FIGURA 5.10). La recarga que estima el modelo es para el periodo del 2014 al 2021, por que fue necesario realizar una regresión lineal para estimar la recarga para el periodo de modelación (1997-2022). Las recargas estimadas se pueden apreciar en la Tabla 5.2 a continuación.

Tabla 5.2 Estimación de la recarga a partir de SWAT (hm^3)

Año	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
A3_INF_BAJ	0.21	0.25	0.16	0.28	0.26	0.81	0.72	0.86	0.30	0.78	0.52	0.73	
A2_INF_MED	7.71	9.04	5.72	10.31	9.38	29.45	26.34	31.50	10.87	28.50	18.82	26.52	
A1_INF_ALT	2.64	3.09	1.96	3.53	3.21	10.09	9.02	10.79	3.72	9.76	6.45	9.08	
Año	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
A3_INF_BAJ	0.34	0.35	0.16	0.19	1.13	0.50	1.66	0.58	0.44	1.18	0.59	0.87	1.08
A2_INF_MED	12.23	12.59	5.69	6.98	41.11	18.42	60.66	21.07	16.13	43.09	21.68	31.64	39.58
A1_INF_ALT	4.19	4.31	1.95	2.39	14.08	6.31	20.77	7.21	5.52	14.76	7.43	10.84	13.56

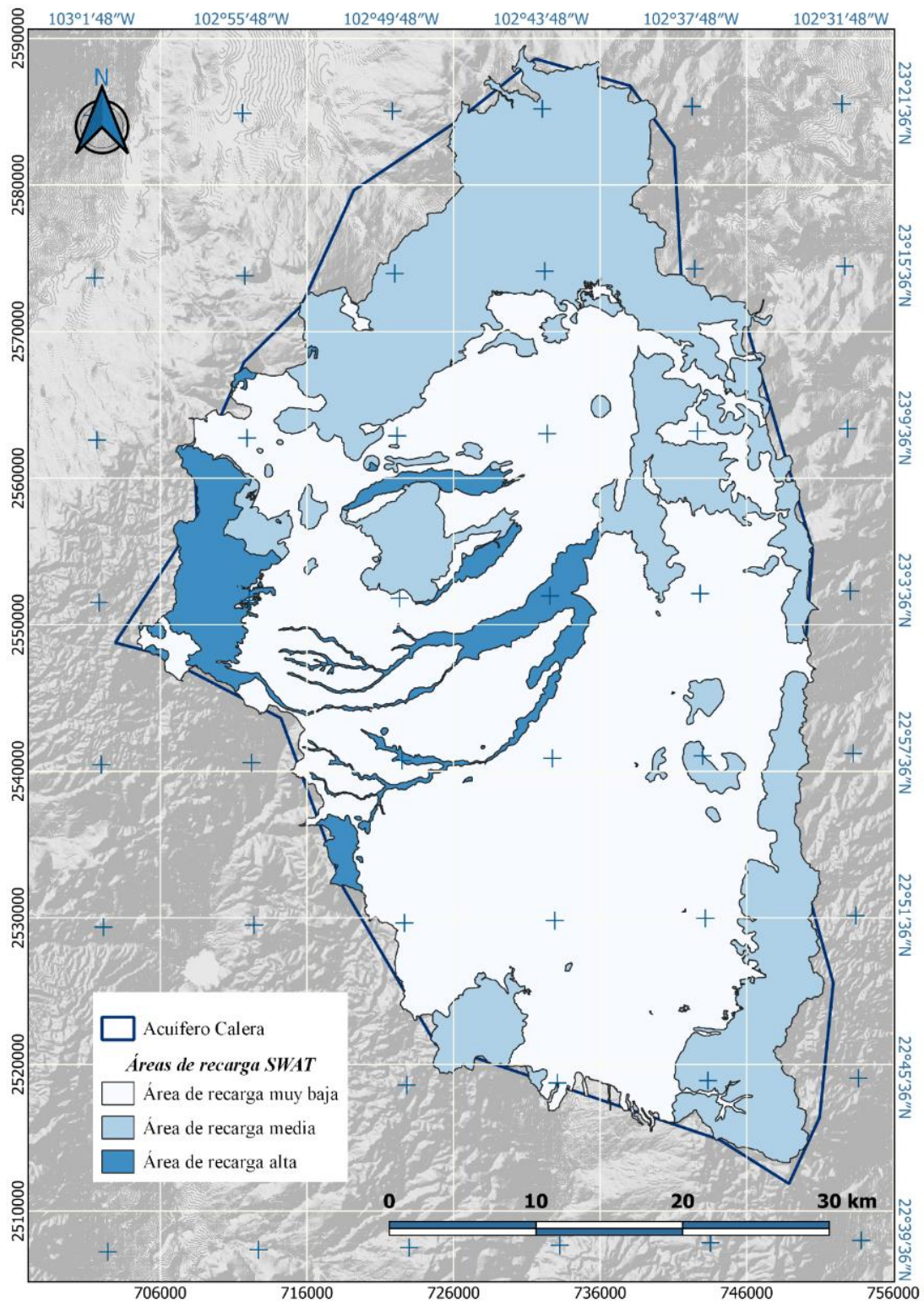


Figura 5.10 Áreas de recarga discretizadas a partir de las HRU de SWAT

5.3.5 Red de monitoreo

La piezometría histórica utilizada para la actualización del modelo consta de la base de datos de Krienen (2018) que fue adquirida a través de la CONAGUA para los años 1997, 2009, 2011, 2013, 2015. Estos datos son parte de una red de monitoreo gestionada y administrada por la CONAGUA y el Comité Técnico de Agua Subterránea (COTAS) del acuífero administrativo de Calera. La información consta de 91 pozos de medición, sin embargo, en el modelo actualizado el área de trabajo difiere, lo que reduce la cantidad de pozos viables a 76. De manera posterior, en otras campañas de monitoreo se recolectó información perteneciente a la misma red de monitoreo en los años 2017 y 2022. La tabla 5.3 ilustra la piezometría relatada.

Tabla 5.3 Datos históricos disponibles de pozos de observación

ID_GWM	ID	X	Y	1997	2011	2013	2015	2017	2022
1_GWM_97-11-13-15	313	733488.98	2541379.47	2120.80	2096.60	2089.90	2083.00	SD	2086.12
2_GWM_97-11-13-15	314	733643.51	2541154.14	2120.40	2095.80	2080.50	2085.40	SD	2076.09
3_GWM_97-11-13-15	315	734286.87	2541564.21	2118.60	2095.10	2088.60	2085.20	SD	SD
4_GWM_97-11-13-15	316	734758.15	2541860.83	2115.00	2092.60	2084.00	2083.30	SD	2085.05
5_GWM_97-11-13-15	317	734813.94	2542668.00	2114.45	2091.00	2087.85	2083.20	SD	2080.19
6_GWM_97-11-13-15	318	735192.51	2542147.66	2118.75	2096.70	2089.60	2082.00	SD	SD
7_GWM_97-11-13-15	319	735501.82	2542958.80	2109.90	2096.20	2087.00	2065.00	SD	2079.64
8_GWM_97-11-13-15	320	735873.26	2542712.27	2110.60	2095.75	2088.00	2080.90	SD	2086.95
9_GWM_13-15	321	728160.25	2561192.79	SD	SD	1999.00	2016.00	SD	1977.28
10_GWM_13	322	729781.54	2561248.45	SD	SD	1949.10	SD	SD	1989.89
11_GWM_11-13-15	323	730250.01	2556150.23	SD	2041.00	2025.55	2037.16	SD	2010.61
15-GWM_11-13-15	324	731414.21	2555057.25	SD	2023.20	2018.00	2019.50	SD	2007.90
16_GWM_13	325	732095.07	2555030.87	SD	SD	2011.00	SD	SD	1998.40
17_GWM_13	326	732447.04	2558212.27	SD	SD	1986.00	SD	SD	2000.99
18_GWM_11-13-15	327	732529.33	2556582.50	SD	2011.00	2006.50	1997.00	SD	1990.35
19_GWM_11-13-15	328	732900.35	2552864.55	SD	2022.50	2003.00	2014.00	SD	2002.78
20_GWM_11-13-15	329	733210.88	2552306.21	SD	1997.30	2024.50	1992.80	SD	2013.98
21_GWM_97-11-13-15	330	722361.62	2566459.70	2129.81	2130.90	2131.35	2131.70	SD	SD
22_GWM_97-15	331	725254.44	2536745.80	2188.00	SD	SD	2182.90	SD	2140.79
23_GWM_97-15	332	725786.89	2556294.50	2066.00	SD	SD	2038.02	SD	2038.86
24_GWM_97-11-13	333	725846.63	2546663.45	2139.82	2152.00	2145.20	SD	2107.78	SD
25_GWM_11-13	334	726064.45	2541650.76	SD	2165.50	2151.00	SD	2104.24	SD
26_GWM_13-15	335	726852.61	2565398.07	SD	SD	2079.46	2078.45	2081.47	SD
27_GWM_97-11-13-15	336	726854.06	2564742.62	2065.07	2071.93	2072.90	2071.30	2070.15	SD
28_GWM_13	337	727424.87	2567047.05	SD	SD	2071.20	SD	2074.89	SD

ID_GWM	ID	X	Y	1997	2011	2013	2015	2017	2022
29_GWM_97-11-13-15	338	727640.56	2569124.52	2057.28	2060.36	2060.20	2059.80	2069.48	SD
30_GWM_97-11-13	339	728225.95	2553161.85	2063.42	2038.00	2036.00	SD	SD	2024.58
31_GWM_97	340	729090.36	2567331.10	2050.91	SD	SD	SD	SD	SD
32_GWM_11-13-15	341	731687.34	2564970.88	SD	2013.65	2014.00	2029.90	SD	2010.27
33_GWM_97-11-13-15	342	732064.23	2544327.12	2120.43	2106.85	2106.00	2100.72	SD	2062.93
34_GWM_97-13-15	343	732396.13	2520882.73	2169.00	SD	2150.00	2151.15	2141.79	2143.89
35_GWM_11-13	344	733090.86	2527663.54	SD	2199.28	2209.00	SD	SD	SD
36_GWM_97-11-13-15	345	733442.24	2561920.78	2037.51	2015.78	2018.72	2016.65	2015.20	2012.58
37_GWM_97-11	346	734044.52	2543403.82	2117.48	2112.40	SD	SD	SD	SD
38_GWM_97-11-13-15	347	734491.16	2567599.89	2035.64	2029.05	2029.37	2028.90	SD	2025.44
39_GWM_11-13-15	348	734662.85	2560308.85	SD	2012.30	2012.00	2008.62	SD	SD
40_GWM_13	349	734934.51	2523731.44	SD	SD	2170.00	SD	SD	2162.72
41_GWM_97-11-13	350	734985.41	2541541.25	2118.68	2090.90	2088.57	SD	SD	2086.39
42_GWM_13-15	351	735102.10	2534058.73	SD	SD	2103.10	2100.65	2100.33	2094.69
43_GWM_97-11-13-15	352	735764.91	2529951.47	2137.20	2126.20	2123.55	2119.85	SD	2117.41
44_GWM_11-13-15	353	736189.44	2559163.46	SD	2000.00	1999.52	1994.20	1989.85	1989.60
45_GWM_13-15	354	736322.84	2570127.88	SD	SD	2035.00	2031.85	2030.87	2025.63
46_GWM_97-15	355	736673.81	2546522.48	2070.06	SD	SD	2049.12	SD	2043.93
47_GWM_11-13-15	356	736794.46	2548444.75	SD	2065.06	2063.87	2056.30	SD	2055.98
48_GWM_11-13-15	357	736877.54	2562436.58	SD	2017.10	2016.80	2010.08	2011.64	2009.21
49_GWM_97-11-13-15	358	737351.40	2536069.67	2118.64	2107.20	2106.66	2105.05	2102.93	2091.34
50_GWM_11-13-15	359	737491.64	2519853.70	SD	2139.50	2138.85	2137.40	SD	2126.04
51_GWM_11-13-15	360	738290.63	2524765.51	SD	2156.34	2156.44	2155.90	SD	2159.15
52_GWM_11-13-	361	738404.76	2541564.26	SD	2103.50	2103.40	SD	SD	2071.04
53_GWM_11-13-	362	738420.70	2549535.34	SD	2048.62	2047.77	SD	SD	SD
54_GWM_11-13-15	363	739116.54	2559459.34	SD	2014.70	2007.15	2004.55	SD	2008.98
55_GWM_97-11-13-15	364	739185.13	2521049.70	2160.00	2147.50	2141.42	2142.00	2135.51	2126.14
56_GWM_13-15	365	739333.77	2534925.38	SD	SD	2096.05	2094.15	2088.88	2078.89
57_GWM_97-15	366	739391.86	2533239.82	2115.16	SD	SD	2092.75	2099.38	2090.00
58_GWM_13-15	367	739853.10	2518324.37	SD	SD	2135.76	2132.31	2131.82	2128.10
59_GWM_97-13-15	368	739927.07	2542604.05	2099.63	SD	2089.39	2091.00	2089.72	2081.72
60_GWM_97-11-15	369	740152.18	2551686.51	2038.67	2070.00	SD	2018.03	2032.21	2022.12
61_GWM_97-11-13-15	370	740188.27	2561843.24	2052.05	2045.28	2043.31	2043.10	2042.97	2037.20
62_GWM_97-11-13-15	371	741059.45	2546623.03	2065.53	2044.75	2043.60	2041.85	SD	2039.82
63_GWM_11-13-15	372	741173.97	2537699.86	SD	2104.95	2101.20	2096.75	2102.22	2092.88
64_GWM_97-11-15	373	741344.56	2557214.65	2054.81	2042.37	SD	2036.40	2041.97	2037.37
65_GWM_11-13-15	374	741386.77	2527947.42	SD	2145.50	2142.00	2139.65	2138.19	2125.24
66_GWM_97-11-13	375	741617.83	2551220.74	2044.00	2019.50	2016.70	SD	2010.97	SD
67_GWM_11-13-15	376	743567.37	2548325.44	SD	2044.70	2043.69	2041.40	2051.68	2037.41
68_GWM_11-13-15	377	743574.66	2554884.08	SD	2038.70	2038.15	2046.90	2038.32	2036.24

ID_GWM	ID	X	Y	1997	2011	2013	2015	2017	2022
69_GWM_97-11-13-15	378	745403.16	2551032.96	2059.39	2032.25	2027.74	2026.65	2014.15	2025.86
70_GWM_11-13-15	379	745813.33	2562458.11	SD	2063.72	2064.00	2062.92	2061.45	2062.02
71_GWM_97-15	380	746478.29	2548003.65	2057.00	SD	SD	2037.25	2050.83	2034.21
87_GWM_11	396	719336.49	2567122.58	SD	2191.90	SD	SD	SD	SD
89_GWM_97	397	729417.62	2557149.90	2051.90	SD	SD	SD	2045.93	SD
90_GWM_11-15	398	730483.00	2559320.00	SD	2011.50	SD	2008.00	SD	1987.21
91_GWM_11-15	399	731631.00	2555932.00	SD	2011.00	SD	2002.00	SD	2001.57
94_GWM_97-11	400	732490.66	2520299.49	2205.10	2145.50	SD	SD	2140.97	2137.39
96_GWM_11	401	734014.07	2534355.72	SD	2101.90	SD	SD	2107.26	2091.91
99_GWM_11	402	737351.40	2536069.67	SD	2093.15	SD	SD	2102.93	2091.34
102_GWM_11-15	403	738962.72	2518861.21	SD	2136.60	SD	2172.20	2128.24	2123.11

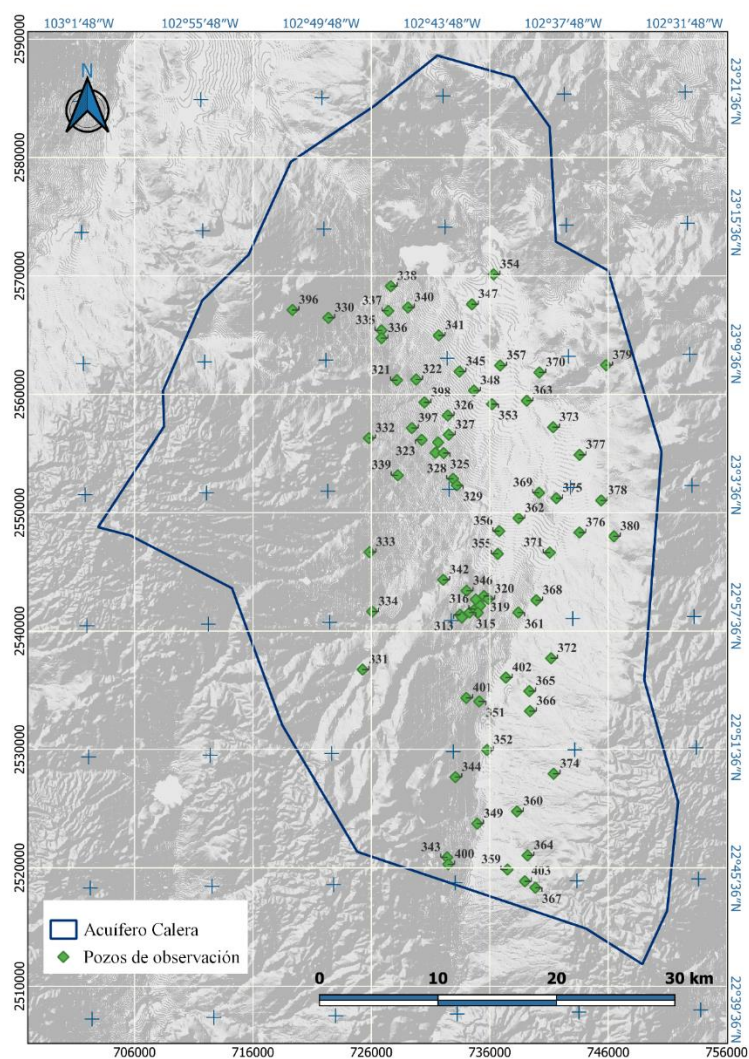


Figura 5.11 Ubicación de los pozos de observación

5.3.6 Pozos de bombeo

Hasta el año 2022 el número total de pozos registrados asciende a 2,280 dentro del área del acuífero Calera. para integrar dichos pozos se replicó la metodología desarrollada por Krienen, que consistió en la elección pozos con una tasa de extracción mayor o igual a 500 m³ por día para implementación “directa” con ubicaciones originales; por tanto, 230 pozos. Los pozos restantes con tasas de extracción menores a 500 m³ por día están representados por 45 “pozos de rejilla”, que se distribuyeron en una cuadrícula irregular dentro del área del modelo. La asignación de tasas de extracción a estos pozos de la red se realizó en correspondencia con las tasas de extracción de los pozos ubicados en las cercanías. Así, en total se implementaron 275 pozos de bombeo en el modelo transitorio.

Además de la información oficial existen otros censos no oficiales realizados en el sitio de estudio, por ejemplo: en Hernández Herrera (2014) se presenta una evolución temporal de los volúmenes de extracción de 1994 a 2009 para el acuífero y se revela un aumento lineal de 114,0 a 152,4 hm³. A partir de entonces, el aumento anual es menor y casi se estanca en los últimos años, de 2009 a 2015 (figura 5.12). También existe otro censo que incluyó casi 2,200 pozos activos en el sitio de estudio en 1994, 2010 y 2015, el cual revela mayores volúmenes de extracción, por lo tanto, utilizando el mismo criterio de Krienen, para obtener un volumen de extracción realista, las tasas de extracción se aumentaron para alcanzar las tasas de extracción del censo (figura 5.12). En el año 2015 el REPDA reportó un valor de 136.2 hm³, mientras que el censo estimó un volumen de 170.9 hm³. Los volúmenes de extracción del censo para los años 1997, 2009, 2011, 2013 y 2022 se estimaron a partir de la línea de tendencia polinómica de la figura 5.12.

Tabla 5.5 Datos de Hernández Herrera (2014)

Año	hm ³ /a
1994	114.0
1995	107.8
1996	112.1
1997	116.3
1998	120.6
1999	124.9
2000	124.6
2001	124.9
2002	129.1
2003	133.4
2004	137.7
2005	125.0
2006	146.2
2007	150.5
2008	154.7
2009	152.4

Tabla 5.4 Datos oficiales del REPDA y del Censo descrito por Krienen (2018)

Año	hm ³ /a	Fuente
1992	137.1	Censo
2009	130.4	REPDA
2010	160.1	Censo
2015	136.2	REPDA
2015	170.9	Censo calculado
2017	139.3	REPDA
2017	173.9	Censo calculado
2022	160.5	REPDA
2022	190.8	Censo calculado

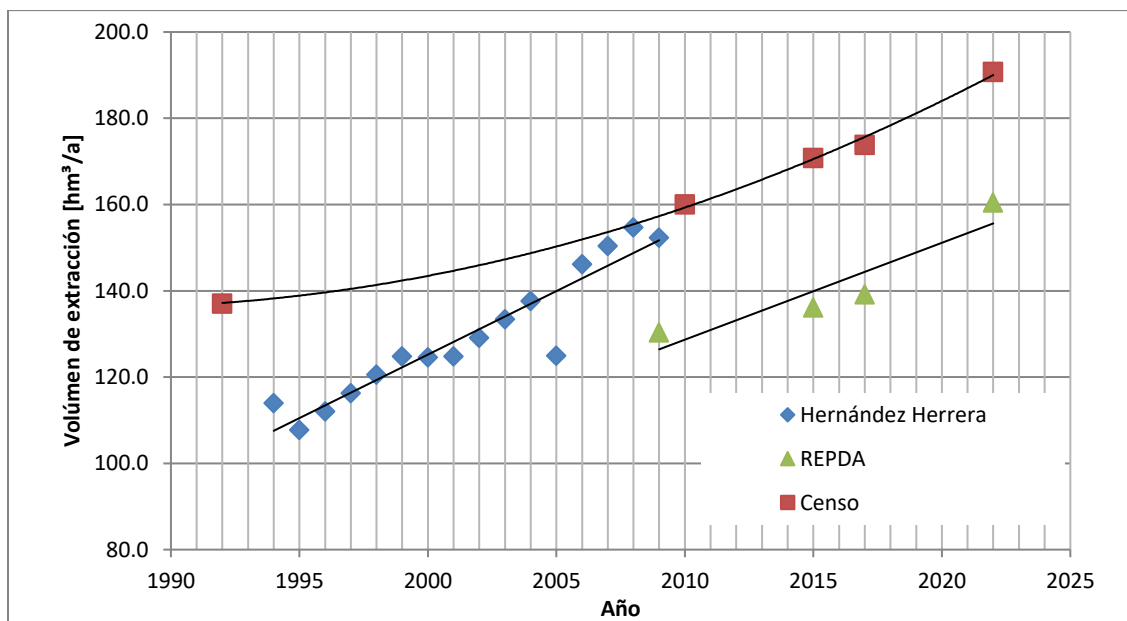


Figura 5.12 Evolución de los volúmenes de extracción. Elaborado por Krienen (2018) y ajustado por Padilla (2023)

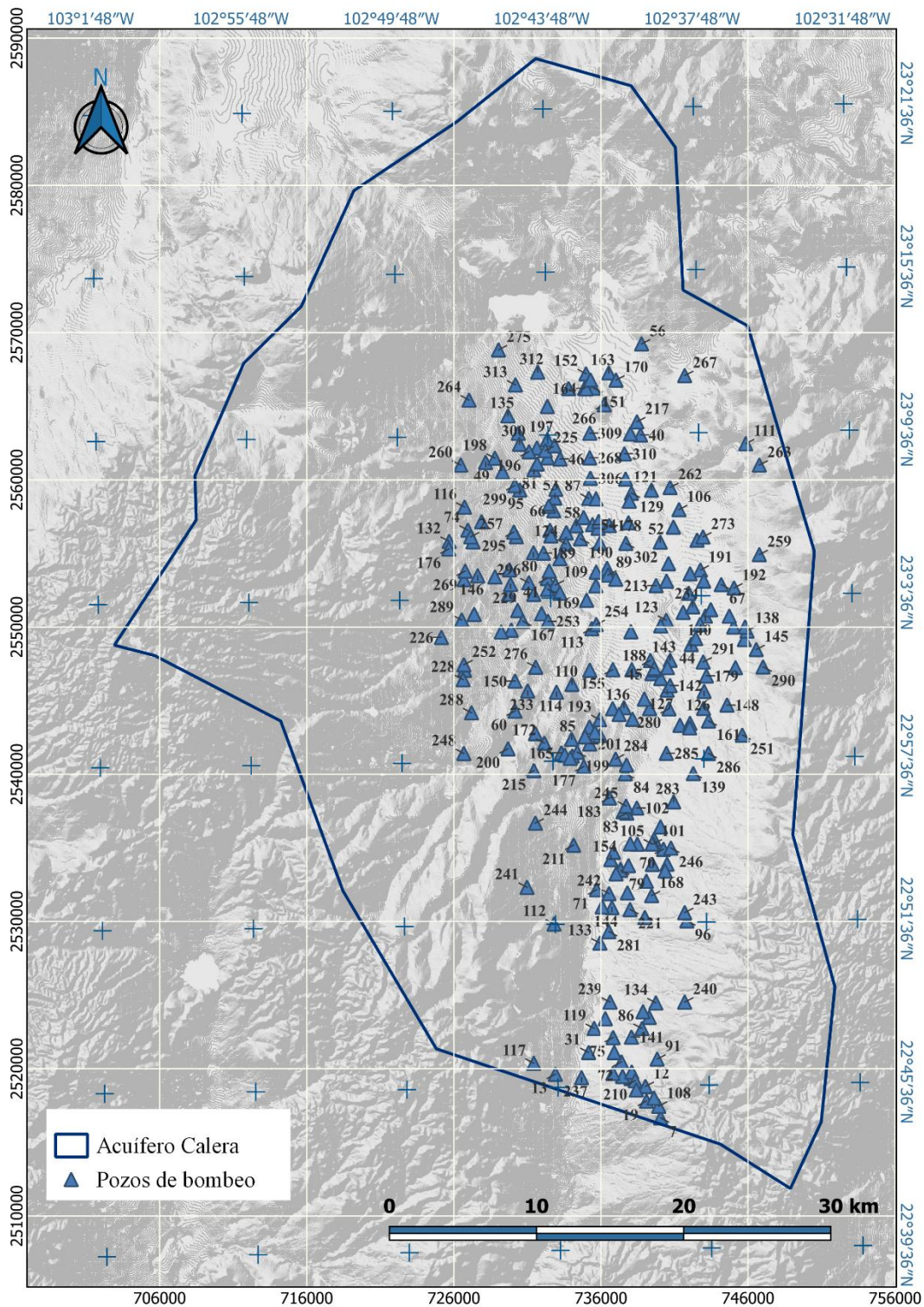


Figura 5.13 Mapa de ubicación de los pozos de bombeo

5.3.7 Piezometría inicial

Mediante los registros históricos obtenidos por Krienen se realizó la configuración de las cargas piezométricas iniciales, la cual inicia a partir del año 1997. El método de interpolación empleado fue la opción del método de Kriging realizada mediante el mismo software Feflow.

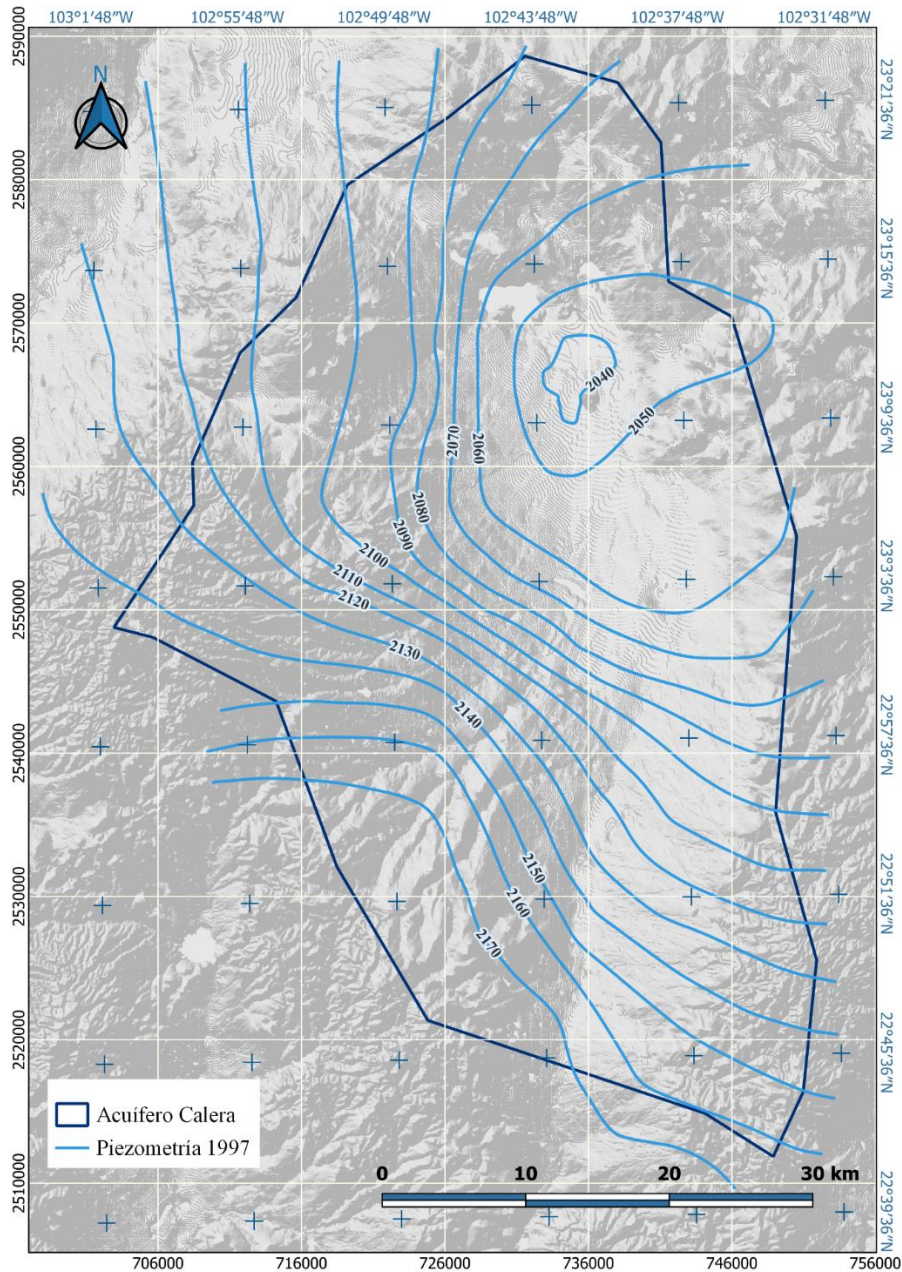


Figura 5.14 Piezometría del año 1997 utilizada como condición inicial en el modelo

5.3.8 Balance de aguas

Se propuso el siguiente esquema para el balance hídrico en la región de estudio (figura 5.15). Los componentes necesarios para determinar el balance hídrico en la región de estudio son la precipitación, infiltración, bombeo, escorrentía, recarga, evapotranspiración, entradas y salidas de agua subterránea, entre otros.

Por lo general, el procedimiento utilizado para evaluar el balance de un acuífero se realiza por medio de la ecuación de equilibrio, que determina la recarga natural de agua subterránea en función de los parámetros anteriores y de la diferencia entre entradas y salidas. Esta ecuación trabaja bajo la condición de continuidad que establece que las entradas son iguales que las salidas. Durante el desarrollo del modelo conceptual se encontró bibliografía que apoya la entrada de un flujo horizontal y también bibliografía que rechaza esta idea. Para fines prácticos, en principio se rechazará la idea de recarga por flujo horizontal, lo cual se espera corroborar durante el proceso de calibración. Si el balance de masas no permite una calibración óptima del modelo será necesario indagar en una propuesta de recarga o descarga por flujo horizontal.

La tabla 5.6 presenta de manera resumida los datos de balance de agua requeridos por el modelo para el periodo de 1997 a 2022.

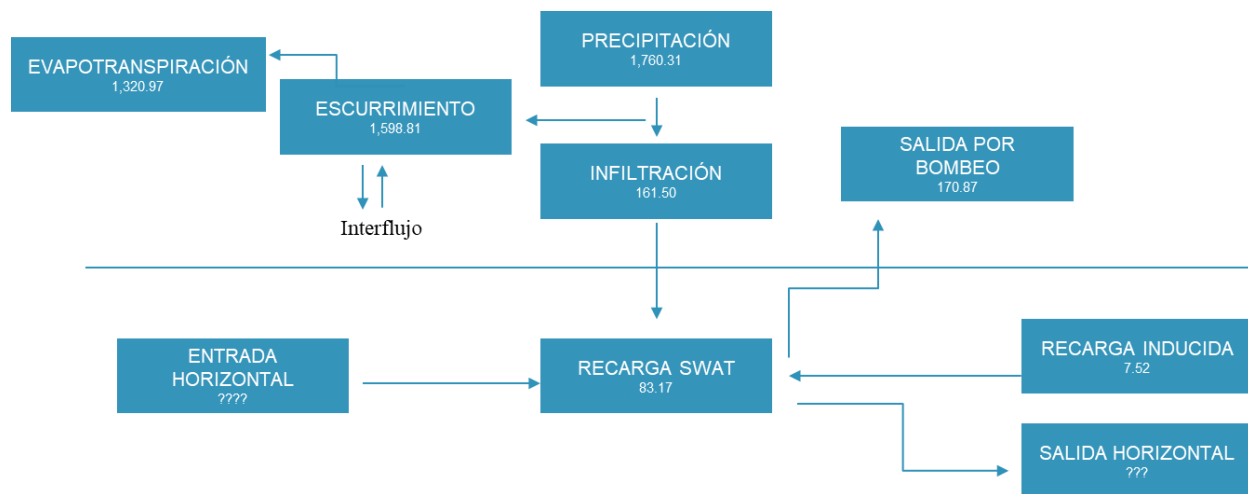


Figura 5.15 estimación del balance hídrico para el año 2015 en hm^3

Tabla 5.6 Resumen de los datos de balance introducidos en el modelo numérico estimados en hm^3

Año	Extracción	Infiltración Agrícola	Recarga SWAT	Diferencia
1997	143.26	6.02	10.57	-126.67
2009	167.36	7.03	16.75	-143.57
2011	169.36	7.11	7.80	-154.45
2013	170.37	7.16	56.31	-106.90
2015	170.87	7.52	83.10	-80.25
2017	182.59	7.67	22.10	-152.82
2022	190.79	8.59	54.22	-127.98

5.3.9 Discretización temporal

En concordancia con el modelo Krienen, el período de simulación inicia desde el 01/01/1997, sin embargo, para al nuevo modelo se le agregaron los datos de 7 años más, finalizando el día 31/12/2022, teniendo así una duración total de 9,131 días (25 años). Los datos del año 2022 corresponden a una campaña de monitoreo de pozos para el diseño de una red de monitoreo automática, dichos datos son los que se consideran para validar la calibración del modelo actualizado.

5.3.10 Calibración

La calibración de cualquier modelo requiere habilidad y conocimiento del sitio por parte del modelador. Este proceso de calibración facilita la evaluación de las características propuestas inicialmente y busca minimizar las discrepancias con la realidad. Es esencial durante este proceso asegurarse de que las suposiciones realizadas estén bien fundamentadas en el modelo conceptual, se debe tener en cuenta que un modelo numérico de agua subterránea siempre contendrá ciertos errores, entendiendo el error como la diferencia entre la simulación numérica y la realidad (Anderson y cols., 2015). A pesar de que numéricamente se busque minimizar estos errores, un modelo nunca será una representación exacta de la realidad.

Generalmente se utilizan dos tipos de calibración, la primera es en estado estacionario, la cual es una modelación numérica que no considera los cambios en el almacenamiento a lo largo del periodo de modelación, sin embargo, este tipo de simulación no se apega mucho a la realidad, por lo que usualmente se utiliza como etapa inicial del segundo tipo de calibración, la transitoria. La calibración en estado transitorio consiste en realizar simulaciones con variaciones en el tiempo de la extracción de agua mediante pozos y la recarga, este proceso representa con mayor semejanza la realidad del sistema ya que puede considerar varios periodos de medición del nivel estático, cambios en las tasas de recarga y extracción y así mismo el cambio en el almacenamiento (Amaya-Varela 2023).

Existen dos enfoques generales para la calibración: uno manual, que implica ajustar los valores a prueba y error, y otro automático, que aplica algoritmos de simulación inversa. En el caso de este modelo, se optó por utilizar la calibración manual. Aunque se reconoce que este método es laborioso, intensivo y puede ser subjetivo (Anderson y cols., 2015), es el más ampliamente aceptado, ya que mantiene una estrecha relación con lo propuesto en los modelos conceptuales de agua subterránea.

El método de manual se implementa mediante la selección de valores para los parámetros inciertos, y el modelo se ejecuta iterativamente hasta alcanzar un resultado satisfactorio. El grado de calibración se determina mediante el grado de discrepancias entre las variables calculadas y sus valores observados correspondientes (Reisinger, 2013).

En FEFLOW, el diagrama de dispersión (scatter plot) proporciona la capacidad de contrastar los valores observados con los calculados. Es esencial verificar la calibración a través del empleo de este gráfico, el diagrama de dispersión no solo permite identificar la presencia o ausencia de un error sistemático en la distribución espacial de las discrepancias entre la piezometría calculada y observada, sino que también facilita una evaluación de la calidad del modelo de flujo de agua subterránea. Se sugiere realizar esta evaluación mediante la comparación de la coherencia de los contornos calculados con respecto a las alturas de los puntos correspondientes a los niveles de agua subterránea observados (Middlernis, 2000). Además de la diferencia de medias residual, el gráfico muestra el error cuadrático medio de la raíz y la desviación estándar.

Para cuantificar los procedimientos de calibración, es esencial incorporar ecuaciones estadísticas de análisis de errores, elementos cruciales en este análisis incluyen la diferencia de medias residual y la raíz del error cuadrático medio normalizado (Reisinger, 2013).

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) se puede utilizar para comparar diferentes modelos. Sin embargo, el RMSE no funciona bien al comparar ajustes de modelos para diferentes variables de respuesta o si la variable de respuesta está estandarizada, transformada con logaritmo o modificada de alguna otra manera. Para superar estos problemas, en su lugar se utiliza el NRMSE. Una desventaja es que el NRMSE perderá las unidades asociadas con la variable de respuesta. En general, valores más bajos de NRMSE indican una menor varianza residual para un modelo. Sin embargo, el indicador no siempre es confiable para encontrar el mejor modelo cuando la cantidad de muestras es pequeña.

Para el presente caso de estudio, se realizaron simulaciones en estado transitorio considerando seis periodos de mediciones del nivel estático, con fechas de octubre de 1997, febrero de 2011, diciembre de 2013, diciembre de 2015, noviembre de 2017 y mayo de 2022. Se consideró el día último de cada mes como fecha de observación.

La Figura 35, Figura 36 y Figura 37, y Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 muestran los resultados de calibración del modelo numérico de agua subterránea en estado transitorio para las diferentes fechas.

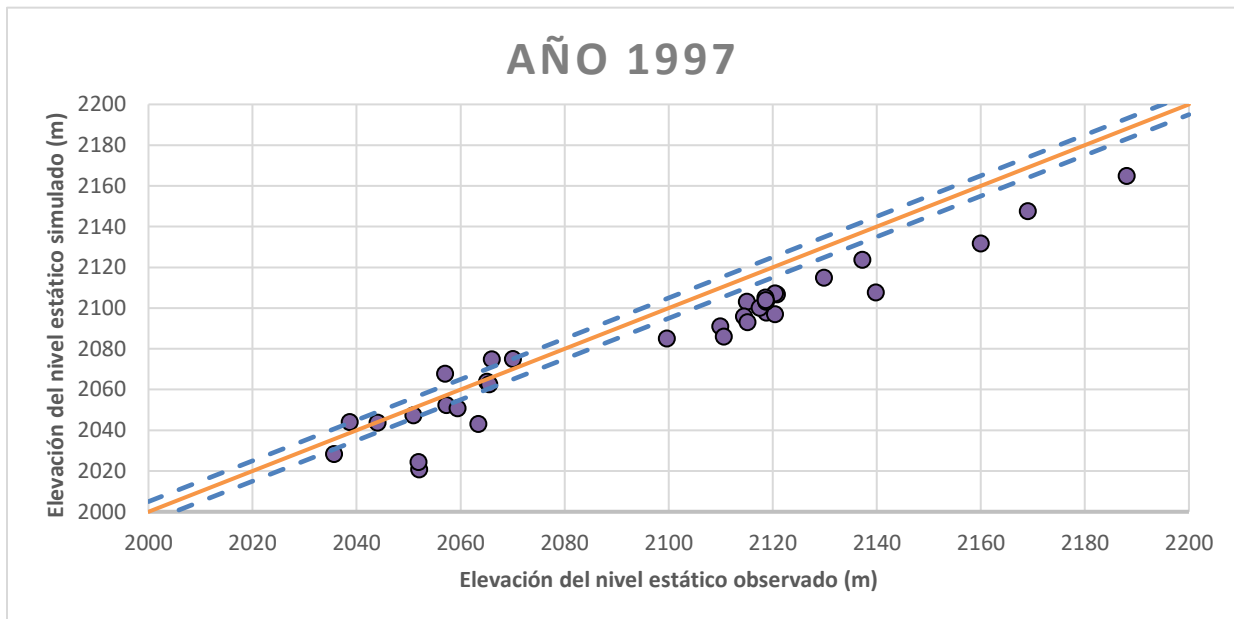


Figura 5.16 Calibración en estado transitorio para el año 1997

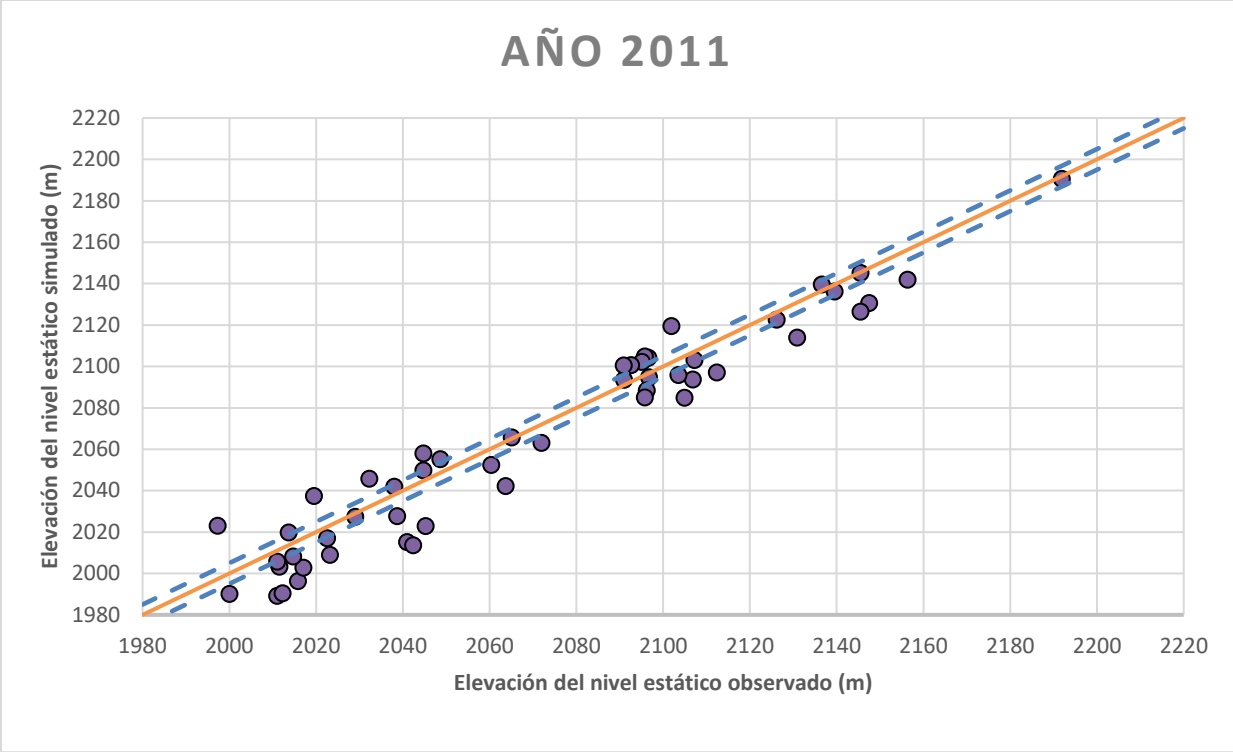


Figura 5.17 Calibración en estado transitorio para el año 2011

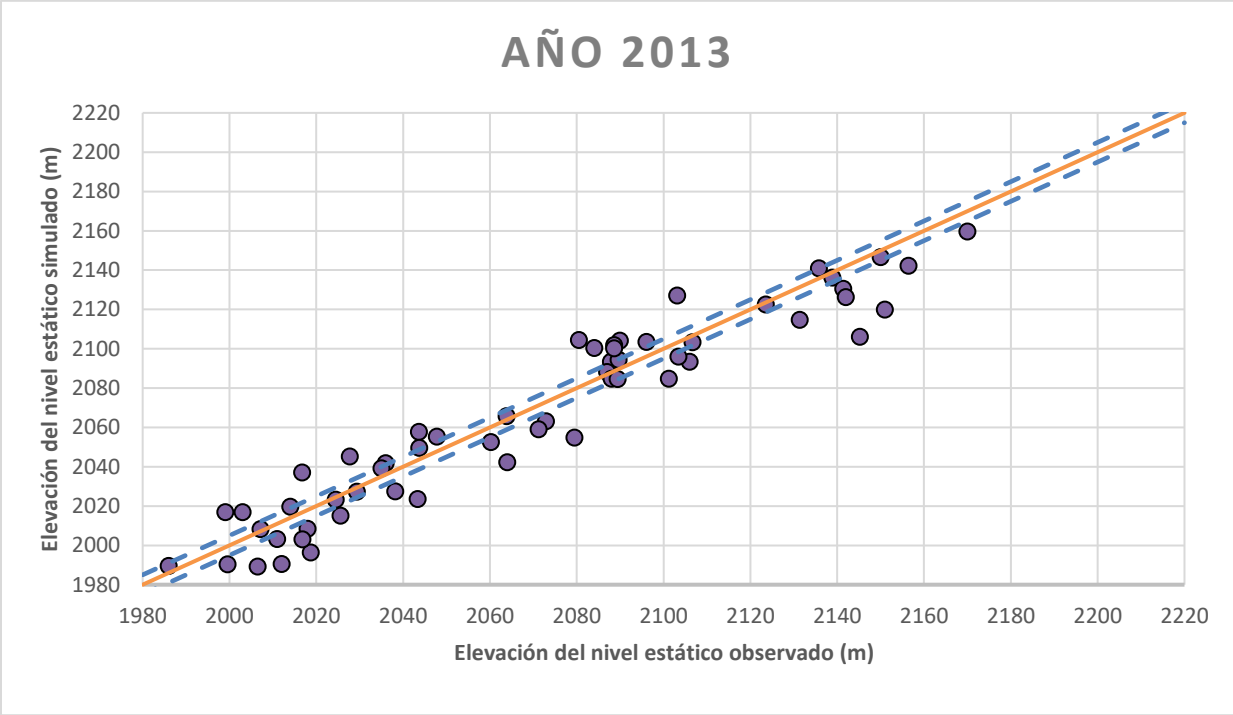


Figura 5.18 Calibración en estado transitorio para el año 2013

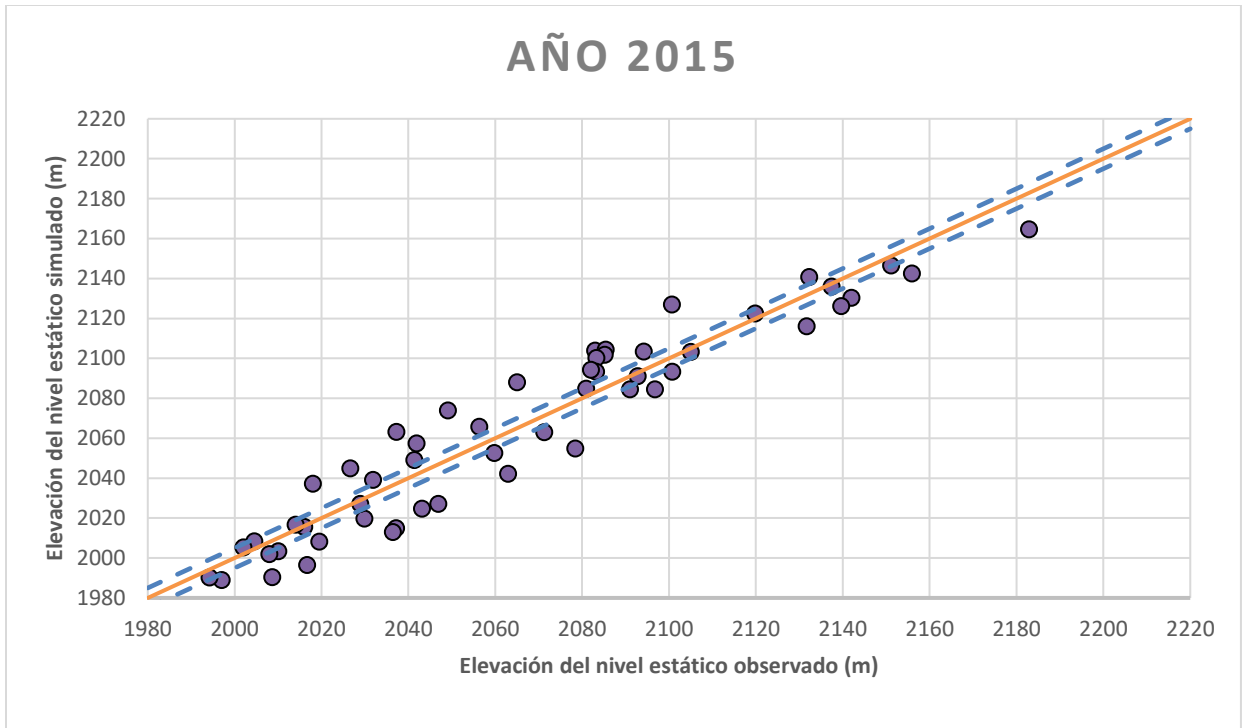


Figura 5.19 Calibración en estado transitorio para el año 2015

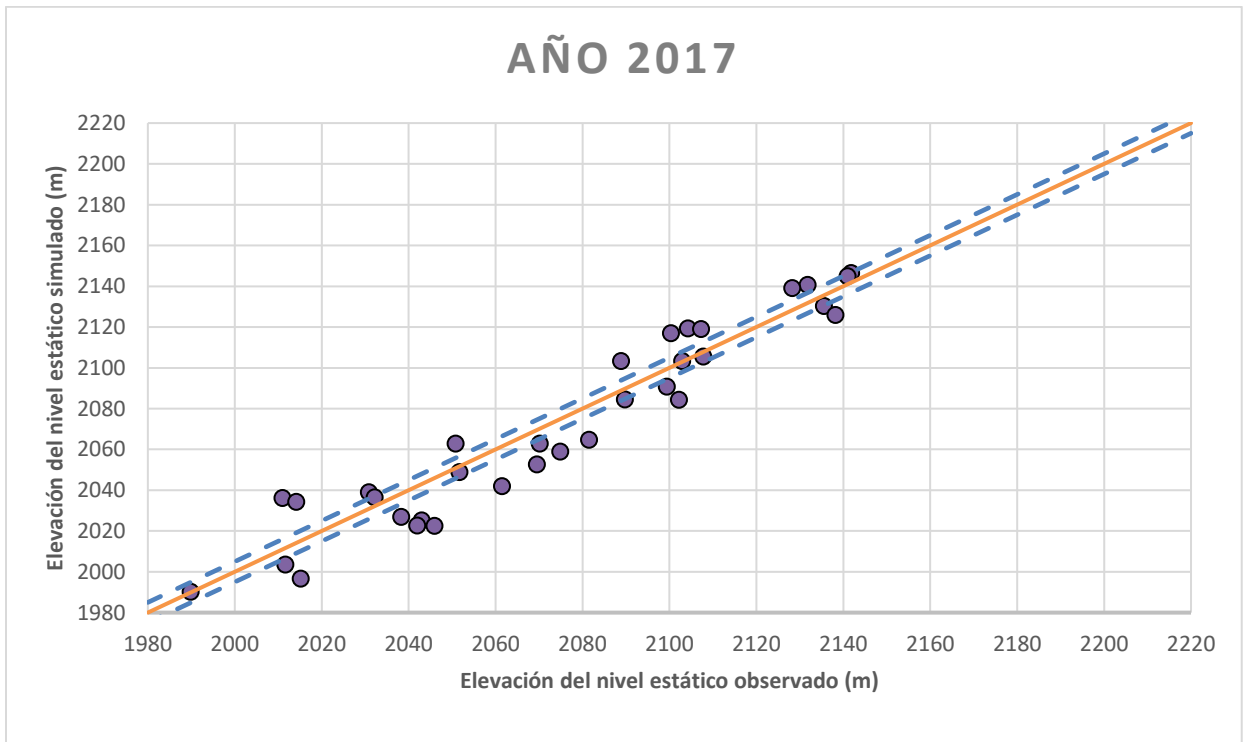


Figura 5.20 Calibración en estado transitorio para el año 2017

Tabla 5.7 Resumen del análisis estadístico de los datos de calibración del modelo actualizado

Año	1997	2011	2013	2015	2017	Promedios
RMSE	17.35	13.36	14.14	14.29	13.47	14.52
NRMSE	11.39%	6.86%	7.69%	7.58%	8.87%	8.48%
E	13.90	10.34	11.22	11.73	11.69	11.78
MIN ENE	2035.64	1997.30	1986.00	1994.20	1989.85	2000.60
MAX ENE	2188.00	2191.90	2170.00	2182.90	2141.79	2174.92
MAX-MIN	152.36	194.60	184.00	188.70	151.94	174.32

La tabla 5.8 muestra que el balance simulado comparado con el calculado en el modelo conceptual difiere en promedio 4% en la extracción mientras que en la recarga difiere en promedio en un 1%.

Tabla 5.8 Comparación entre los valores del modelo conceptual y los simulados en el modelo actualizado. Extracción por año y Recarga acumulada, ambos en hm^3

Año	Extracción		Diferencia	Recarga		Diferencia
	Balance	Feflow	Bal/Fef	Balance	Feflow	Bal/Fef
1997	137.20	143.26	0.96	16.54	19.07	0.87
2009	160.40	167.36	0.96	327.48	320.22	1.02
2011	161.30	169.36	0.95	362.86	345.37	1.05
2013	161.90	170.37	0.95	430.56	411.30	1.05
2015	165.80	170.87	0.97	520.91	519.64	1.00
2017	173.00	182.59	0.95	584.00	570.57	1.02
2022	183.80	190.79	0.96	765.52	827.46	0.93

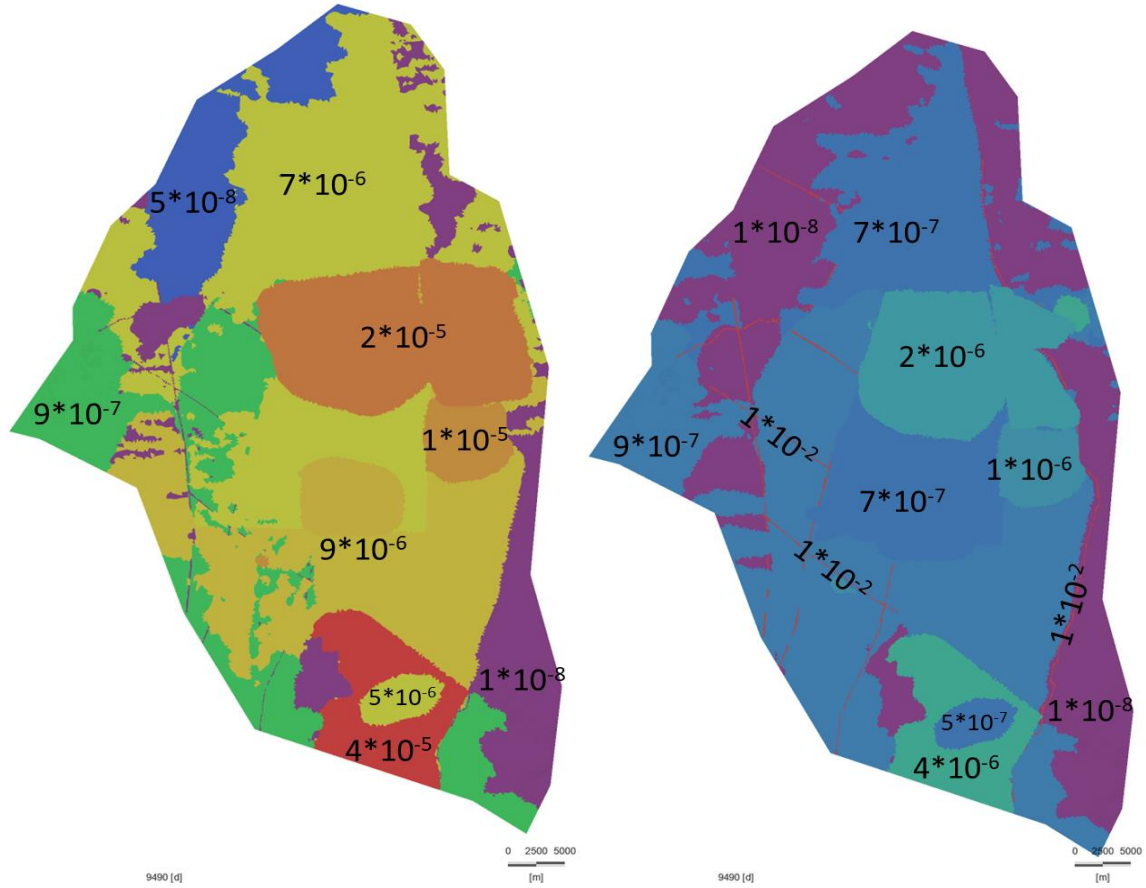


Figura 5.21 Valores de K calibrados. Vista 2D capa 1 valores de K_h (Izq.) y vista 2D capa 2 valores de K_v (Der.)

Tabla 5.9 Resumen de valores de conductividad calibrados

HU	K_h [m/s]	K_v [m/s]
TMvs	1.00E-08	1.00E-08
Ccal	5.00E-08	1.00E-08
Tv	9.00E-07	9.00E-07
Fallas	TV/MVS	1.00E-02
QTU norte	7.00E-06	7.00E-07
QTU central 1	2.00E-05	2.00E-06
QTU central 2	1.00E-05	1.00E-06
QTU intermedio	9.00E-06	9.00E-07
QTU sur 1	4.00E-05	4.00E-06
QTU sur 2	5.00E-06	5.00E-07

5.3.11 Validación y análisis de sensibilidad

En los meses de abril a junio de 2022 se realizó una campaña de monitoreo de pozos en el acuífero, este monitoreo consideró aproximadamente 85 pozos, de los cuales algunos estaban secos y otros se encontraban en operación, por lo que se obtuvo el dato de su nivel dinámico. Para ser considerados como datos de validación se consideró que estos datos deberían ser los niveles estáticos y que pertenecieran a la red de monitoreo descrita en el capítulo 5.3.5, por lo tanto, solo 32 pozos corresponden a las ubicaciones de los pozos de observación anteriormente mencionados. La figura ## ilustra la comparación entre los datos observados y los simulados mediante el modelo, mientras que la tabla ## revela los valores de calibración para este año.

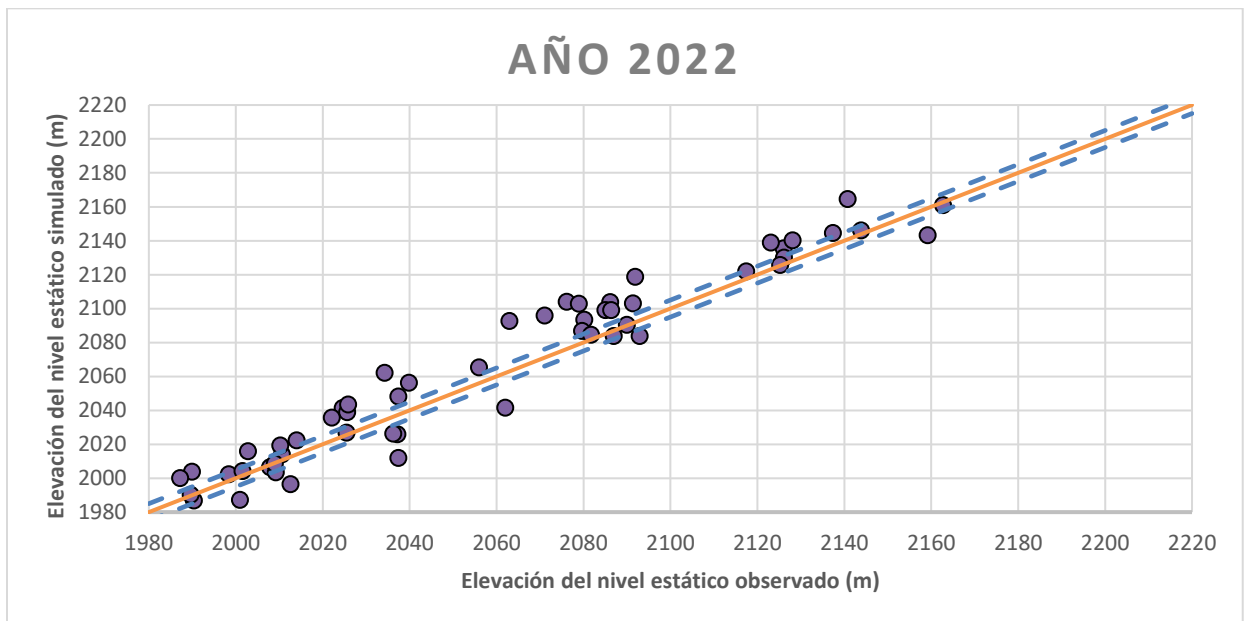


Figura 5.22 Calibración en estado transitorio para el año 2022

Tabla 5.10 Resumen estadístico de valores de calibración año 2022

Año	2022
RMSE	14.17
NRMSE	8.08%
E	10.80
MIN ENE	1987.21
MAX ENE	2162.72
MAX-MIN	175.51

La finalidad del análisis de sensibilidad radica en cuantificar la influencia de las variaciones en los valores de entrada del modelo sobre las salidas correspondientes. Este análisis implica la exploración de la relevancia de los insumos del modelo en el contexto de la toma de decisiones o modelado. Dichos estudios pueden ofrecer una evaluación global de la precisión del modelo al evaluar el desempeño del sistema en escenarios alternativos, al mismo tiempo que brindan información detallada sobre la importancia relativa de los errores en diversos parámetros, por ende, los resultados sensibles se presentan como relevantes tanto para los usuarios como para los desarrolladores del modelo (UNESCO, 2005).

El primer paso para realizar un análisis de sensibilidad es identificar qué parámetros de entrada del modelo deben variarse. Luego, el valor de entrada calibrado será cambiado por algunos factores (Putranto 2013).

Una vez calibrado el modelo para el periodo deseado, se realizaron diferentes simulaciones para determinar la sensibilidad del modelo para medir la susceptibilidad del comportamiento del sistema a cambios en parámetros como conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento específico y recarga. Los cambios se realizaron de forma independiente para cada uno de estos parámetros, afectando a todas las capas al mismo tiempo que representan los medios geológicos. Los valores se modificaron en un 25%, 50% y 75% por encima y por debajo de los valores calibrados, utilizando como referencia de calibración el valor directo proporcionado por el programa del error absoluto “ \bar{E} ”. La figura 5.23 ilustra las variaciones del error al modificar los parámetros del modelo.

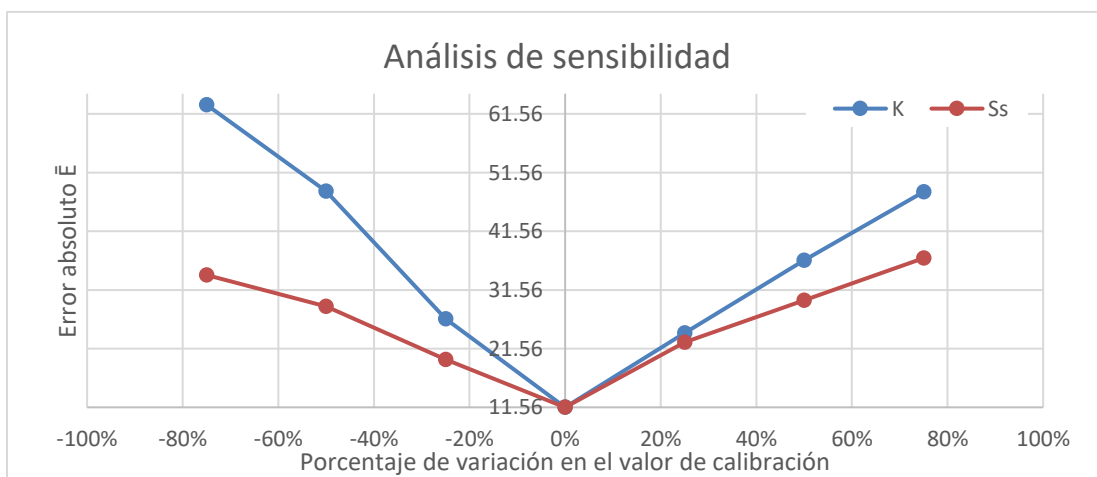


Figura 5.23 Análisis de sensibilidad mediante los parámetros de K y Ss

5.3.12 Discusión de la implementación del modelo

Como se ha mencionado con anterioridad, el software empleado en esta investigación fue Feflow en su versión 8.0 (2023), el cual resuelve el sistema de ecuaciones mediante el método de elementos finitos. Este mismo software se utilizó previamente en el estudio de Krienen (2018) en la versión 7.0 desarrollada en el año 2016, donde se implementó un modelo con un enfoque en el área central del acuífero. Por lo tanto, el modelo actualizado representa el segundo modelo desarrollado en Feflow en el acuífero de Calera.

En comparación con los modelos de Ingeniería y Gestión Hídrica (2011), Hernández y Cols., (2012) y el más reciente de Amaya-Varela (2023), que fueron implementados en Modflow 2000 y Visual Modflow 2009 respectivamente, estos modelos se resuelven con un enfoque de diferencias finitas, ambos sistemas de modelado presentan ventajas y desventajas. Por ejemplo, Visual Modflow tiene una curva de aprendizaje más rápida y es más ampliamente aceptado; sin embargo, la refinación es bastante simple y además trabaja principalmente con valores promedio anuales, esto obliga a simplificar significativamente lo establecido en el modelo conceptual. En contraste, Feflow ofrece una mejor capacidad de refinamiento, lo que permite el refinamiento requerido en sitios puntuales como pozos o fallas geológicas. No obstante, su interfaz de usuario, aunque visualmente mejor que la de Visual Modflow, resulta más compleja al momento de analizar los resultados del modelado, ya que los valores como el NRMSE deben ser calculados por otros medios, lo que resulta en un proceso de calibración y validación más largo.

El modelo geológico se desarrolló en el software Leapfrog Geo versión 2021.2.5, en este software se introdujeron de manera espacial las 8 secciones geológicas mencionadas con anterioridad, lo cual acompañado de la interpolación semiautomática de la geología resultó en un trabajo muy complejo, pero como resultado se obtuvo una representación geológica mejorada en comparación con todos los modelos existentes. A diferencia de Feflow, Leapfrog cuenta con un entorno visual enfocado en la geología con un motor de procesamiento espacial 3D mejor que Feflow, además cuenta con un Plug in de Hidrogeología, el cual se desarrolló en colaboración con DHI y Visual Modflow. Esta última herramienta permite a Leapfrog convertir un modelo 3D sólido en un modelo 3D conformado por prismas triangulares (elementos finitos) o cubos (diferencias finitas),

para posteriormente guardarse como un archivo ejecutable en cada software de modelación respectivamente.

Para el presente caso de estudio, se optó por una configuración en Leapfrog que permitiera prismas triangulares con un área en la cara superior de 40,000 a 45,000 m², es decir, con lados de 250 a 300 metros de longitud. Posteriormente, el software permite un refinamiento en sitios específicos, esto se aplicó en el sistema de fallas y en las ubicaciones de los pozos de bombeo, lo cual permite a Feflow mejorar la precisión de modelación en esos sitios en particular, ya que se generaron celdas con áreas menores a los 90m². El resultado final se puede comparar con el modelo de Krienen (2018) a través de la cantidad elementos y nodos finales, es decir: el modelo de Krienen cuenta con 542,820 nodos y 1,024,442 elementos, mientras que el modelo actualizado se conforma de 1,047,396 nodos y 1,981,180 elementos, casi el doble de elementos en general. Ambos modelos cuentan con 20 capas. En contraste con los modelos de IGH y Amaya-Varela, estos se desarrollaron con celdas de 1000x1000m y 500x500m respectivamente, las cuales no pueden ser refinadas.

La forma de estimar la recarga y su distribución mediante SWAT es algo que no se ha aplicado en todo México, lo cual representa un hecho innovador. Esta investigación también se consideró la adición de recarga por el hecho de la infiltración (5 %) de retornos agrícolas y urbanos.

El periodo de simulación y el porcentaje de calibración (NRMSE) de los 5 modelos se contrastan en la siguiente tabla (5.11).

Tabla 5.11 Resumen comparativo con modelos previos en el sitio de estudio

Modelo	IGH (2011)	Hernández (2012)	Krienen (2018)	Amaya (2023)	Padilla (2024)
Software	VMOD 2009	MOD 2000	FEFLOW 7.0	VMOD 2009	FEFLOW 2023
Simulación (días)	14235	18250	6608	10064	9460
Área (km ²)	3360	SD	995	5400	2226
Periodos de calibración	3	4	4	7	6
Calibración	SD	25.5	7	9.64	8.41
Parámetro sensible	K	SD	Recarga y K	Ss	K
Validación	No	Si	No	Si	Si

5.4 Escenario a futuro

Generalmente en la generación de escenarios a futuro de los modelos numéricos se realizan análisis de variabilidad climática debido a la tendencia de disminución de recarga relacionada con el aumento global de temperatura y el aumento desmesurado de la extracción de agua en los acuíferos, como en Krienen (2018) y Amaya-Varela (2024), sin embargo, puesto que para esta investigación no se contempló este análisis, la proyección del siguiente escenario se generó considerando valores constantes de recarga y extracción en el acuífero hasta el año 2060. Es innegable que este escenario no es el más realista, sin embargo, podría brindar signos de alarma si se mantiene la extracción actual de agua en el acuífero.

Para el año 2060 al no tener pozos de observación no es posible calcular el NRMSE, sin embargo, Feflow utiliza la desviación entre los datos observados y los resultados calculados y lo muestra en un diagrama de dispersión (figura 5.24). Los diagramas de dispersión se muestran a través del menú contextual de los gráficos para las variables de piezometría. FEFLOW utiliza automáticamente los datos de observación cargados para calcular la desviación, además, se muestran el error absoluto (\bar{E}), la raíz cuadrática media (RMS) y la desviación estándar (σ).

Todos los puntos de observación que proporcionan valores de referencia para la variable de proceso actual se dibujan en el gráfico, con los valores observados en abscisas y los valores calculados en ordenadas. El gráfico siempre refleja los resultados en el momento de simulación seleccionado actualmente, en este caso del día 31 de diciembre del 2060.

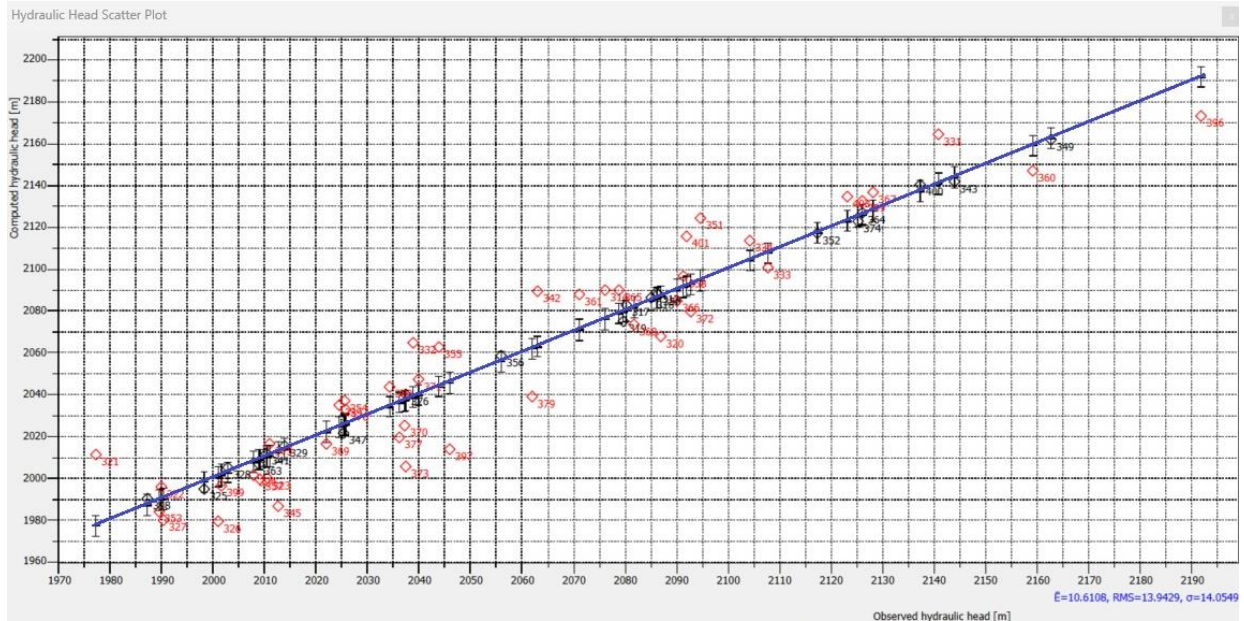


Figura 5.24 Diagrama de dispersión del modelo para el año 2060

En el acuífero es posible observar dos sitios relevantes, el primero es el centro de la cuenca, hacia donde tiende a fluir el agua, el segundo sitio es en la parte sur del acuífero, en este se pueden apreciar algunas de las cotas más altas (figura 5.25). En ambos puntos la modelación del año 2060 se logra observar una disminución de 10 a 15 metros en la piezometría. También existe una zona de transición que se encuentra entre ambos puntos mencionados, en esta sección longitudinal se aprecia menor afectación a los niveles, ya que son del orden de 5 a 10 metros, esto puede relacionarse con la recarga establecida, ya que en los últimos años las precipitaciones fueron buenas, lo que hace que el modelo considere en promedio una recarga de 38.5 hm^3 por año. Por otro lado, al considerar la extracción de agua constante, resulta en volumen promedio de 173.23 hm^3 por año.

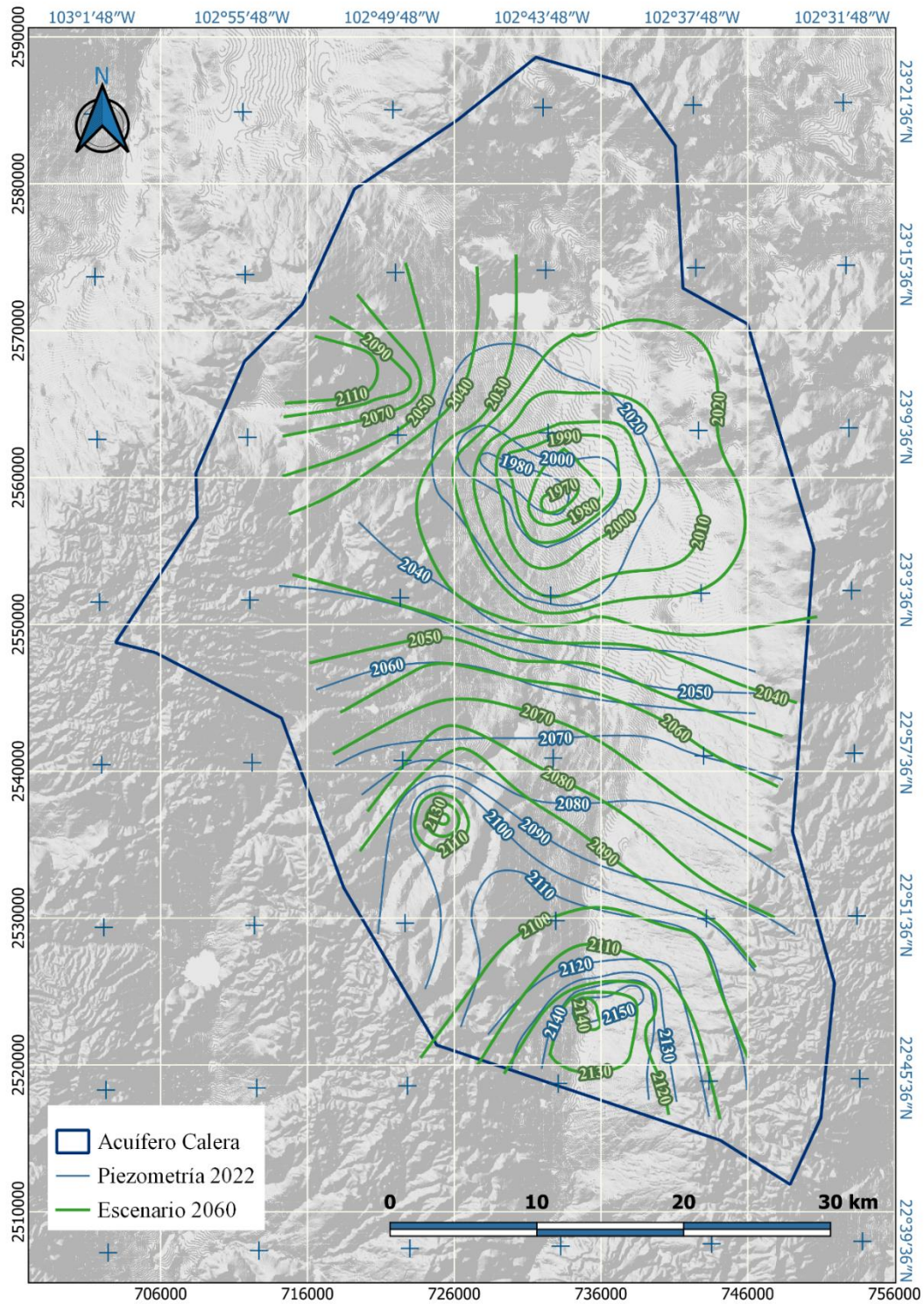


Figura 5.25 Comparativa de la piezometría simulada en los años 2022 y 2060

6 Conclusiones

El desarrollo de esta investigación tuvo 5 etapas importantes, las cuales están ligadas directamente a los objetivos específicos: (1) el desarrollo de un modelo conceptual, (2) la verificación del correcto funcionamiento del modelo numérico existente, (3) el análisis comparativo de las predicciones del modelo numérico y los datos de campo, (4) desarrollo del modelo geológico y acoplamiento de SWAT y por último (5) la actualización del modelo numérico y el desarrollo de escenarios.

Desarrollo del modelo conceptual

Para el desarrollo del modelo conceptual se requirió de una basta recopilación de información bibliográfica y estadística, el procesamiento y análisis resultó ser un desafío considerable debido a la procedencia multidisciplinaria de la información. Fue necesario comprender la hidrogeología e hidrogeoquímica para categorizar y presentar esta información de manera más accesible en este informe.

El entorno hidrogeológico del acuífero Calera se caracteriza por condiciones semiáridas que limitan la recarga de agua subterránea, mientras que las extracciones de agua subterránea superan la cantidad de recarga. Este desequilibrio ha llevado a que se utilicen los términos "sobreeplotación" o "explotación excesiva" para describir el desarrollo experimentado en las últimas décadas. Las consecuencias negativas de esta situación se hacen evidentes, por ejemplo, en la disminución anual del nivel freático, que en las principales zonas de extracción alcanza hasta -2,5 metros (Krienen 2018).

En el entorno hidrogeoquímico fue posible identificar una serie de cambios químicos bien definidos a lo largo del flujo de agua subterránea a través de sedimentos y rocas volcánicas que se asemejan a la evolución química secuencial de los iones principales descritos en la teoría de sistema de flujo de Tóth (1998). También fue posible identificar los tres tipos principales de agua presentes en el acuífero, tal como fueron descritos por Núñez (2003). El primer tipo, denominado $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, se encuentra en la parte central de la cuenca y circula a una profundidad relativamente

superficial, es usualmente asociado con tiempos de residencia cortos. El segundo tipo, conocido como HCO₃-MIX (con Ca⁺ y Na⁺), se ubica en el borde oriental de la cuenca y está relacionado con el flujo a una profundidad intermedia. El tercer tipo de agua, ampliamente distribuido en el acuífero, corresponde al HCO₃-Na, que se caracteriza por niveles más altos de Li⁺ y temperaturas más elevadas, alcanzando hasta 30°C. Según lo informado por Edmunds (1988), este tipo de agua refleja tiempos de recorrido más prolongados en las zonas más profundas de la cuenca.

El presente modelo conceptual sugiere que la recarga de agua en el acuífero tiene lugar mediante la infiltración de agua de lluvia, y no se considera influencia alguna de acuíferos vecinos, sin embargo, Krienen (2018) sugiere que sí existe un ingreso de agua por medio de flujos regionales a través de fallas geológicas. En el presente modelo se consideró la existencia de las fallas, sin embargo, no se consideró un ingreso adicional por este medio fracturado. La cuenca que rodea al acuífero es de tipo endorreico, lo que significa que los escurrimientos convergen hacia el punto topográfico más bajo, que son las lagunas de Santa Ana y el Sedano.

Verificación del funcionamiento del modelo

Este proceso se llevó a cabo mediante un análisis de sensibilidad. El análisis de sensibilidad proporciona una evaluación del impacto que las variaciones en los parámetros tienen en los resultados de la simulación. En este proceso se efectuaron cambios porcentuales en los parámetros individuales para determinar si influyen los resultados de la simulación, de este modo sirven como indicador de la relevancia de cada parámetro en el proceso de modelado. Debido a que Krienen reporta los valores de su análisis de sensibilidad, únicamente se consideraron las variaciones máximas por debajo y por encima de los parámetros calibrados para la conductividad y el almacenamiento específico, ya que si estos valores cuadran con lo reportado se puede validar el análisis de sensibilidad desarrollado previamente. Los parámetros modificados por Krienen fueron: las conductividades hidráulicas (K), el coeficiente de almacenamiento específico (S_s) y la tasa de recarga (Q), variándolos desde un 0% hasta un 200% por encima y por debajo de los valores previamente calibrados. Como resultado, al modificar los parámetros de K y S_s de la primera capa, se obtuvo un valor cercano al 98% reportado por Krienen en 2018, por lo que se consideran válidos los resultados existentes. Estas variaciones demuestran la influencia de los parámetros en el modelo, lo que a su vez significa que se encuentra trabajando de manera correcta.

Post auditoría del modelo existente

Al ejecutar el modelo numérico este trabaja de forma adecuada y logra asimilar de manera muy aproximada las elevaciones observadas espaciotemporalmente, no obstante, la discordancia más significativa entre esta investigación y otros autores (Núñez 2003, Ávila-Carrasco 2012, Hernández et al. 2012, CONAGUA 2015 Cal) es la consideración de una capa confinante en el acuífero. En contraste, por medio de la calibración del modelo actualizado se demostró que el acuífero trabaja de manera eficiente sin dicha capa confinante, ya que el caso pertenece a un esquema local en la zona centro del acuífero, lo cual no parece pertinente aplicarlo a todo el modelo.

En relación con los aspectos de construcción del modelo numérico del acuífero, en términos generales, se puede afirmar que la herramienta se ha desarrollado de manera consistente con el modelo conceptual, especialmente en lo que concierne a la elección de los componentes numéricos que representan los límites, las propiedades y las condiciones de frontera. Además, se han detectado ciertos aspectos que fueron atendidos durante la actualización para mejorar la herramienta.

- Dentro de los aspectos que se consideran adecuados, destacan la discretización temporal y de las unidades geológicas, las condiciones iniciales de recarga vertical del acuífero, la explotación por bombeo, el retorno de agua por riego agrícola y la selección de los pozos de observación.
- Entre los elementos significativos que fueron incorporados en el modelo numérico revisado y que, según el punto de vista del presente auditor, requieren atención debido a la discrepancia con el modelo conceptual, son la discretización de la supuesta capa confinante en el acuífero y el refinamiento de las fallas geológicas.

En cuanto a la representación de la herramienta para el periodo mencionado de la auditoría, en términos de su grado de concordancia con la información histórica observada, se considera que el modelo numérico reproduce de manera apropiada los niveles de agua subterránea y aspectos del balance hídrico apegado al NRMSE con el que fue calibrado el modelo (7%). Durante este proceso se recolectó información piezométrica del año 2017, 2018, 2020 y 2022, esta información se ubica espacialmente cercana a los pozos de observación, para obtener la cota específica de los pozos de

observación se desarrollaron Modelos Digitales de Elevación (MDE), los cuales se interpolaron con el método IDW y posteriormente se obtuvo la elevación del nivel estático de manera manual observando la información de cada píxel. Una vez obtenida toda la información, se realizó un análisis estadístico para determinar el NRMSE, el cual para los años analizados (2016-2022) resultó en un promedio de 7.85%, lo cual es acorde a los valores obtenidos por Krienen durante su calibración.

Desarrollo del modelo geológico e implementación de SWAT

Tanto el desarrollo del modelo geológico como la implementación del modelo desarrollado en SWAT representaron un grado de complejidad avanzado, ya que no es algo que se observa de manera frecuente en la bibliografía. La discretización de la geología en UH realizadas por Krienen simplifican el proceso de modelación de la geología y la inclusión de la nueva información geológica desarrollada por Rivera-Armendáriz y Cauch-Kau permitieron una representación espacial más acertada en comparación con los modelos previos desarrollados en el acuífero. El desarrollo de esta actividad requirió de Software educativo, Hardware actualizado y cientos de horas de trabajo durante el aprendizaje del Software y el desarrollo del modelo.

Para la implementación de SWAT dentro del entorno de Feflow no existen herramientas especializadas, como lo hay para para otros softwares de modelación como Modflow, por tanto, se integró de forma manual por medio de la discretización de las HRU, no obstante, aunque esto requirió un tiempo de trabajo considerable no fue la discretización más importante, ya que también se tuvo que ajustar la recarga para que coincidiese con las cifras reportadas por la CONAGUA en 2015. Esto se considera una discretización apropiada ya que el modelo desarrollado en SWAT aun requiere de estaciones de aforo para ajustar los parámetros de calibración, dicho proceso es muy similar al desarrollado por Krienen (2018) en el ajuste de extracción de agua por medio de pozos de bombeo descrito en el capítulo 5.3.6.

Actualización del modelo

Una vez integrada la información nueva en el modelo numérico se intentó ejecutar en estado estacionario, sin embargo, la simulación presentó dificultades en el modelo, generando un error desconocido, dado que el proveedor del software no cuenta con una sección de ayuda para este tipo de problemas no fue posible desarrollar el modelo en este estado, por tanto, se consideraron los valores establecidos por Krienen como arranque inicial en la calibración en estado transitorio.

La calibración en estado transitorio concuerda con lo establecido en el modelo conceptual, tanto en las cargas piezométricas (con un 92%) como en el balance de agua del modelo conceptual (98%). Aunque la literatura de modelación no establece un porcentaje mínimo de error, de manera interna se sugiere que este sea igual o menor al 10% (NRMSE). Dado las dimensiones del sistema sería bastante complejo desarrollar una calibración con un error por debajo del 5%.

Los valores calibrados de las unidades hidroestratigráficas se asemejan en gran medida a las establecidas por Krienen (2018) ya que fueron el punto de partida para este procedimiento, la diferencia principal es que se atendieron de forma particular algunas zonas donde grupos de pozos distaban de las medidas observadas, sin embargo, en su totalidad el modelo concuerda aproximadamente en un 85% con los valores globales utilizados en la calibración de Krienen.

Para la validación se utilizó el último año de observación (2022) lo cual consistió en el mismo procedimiento de cálculo del NRMSE, el cual resultó en un 8.08%, dentro del rango aceptable. Mientras que para el análisis de sensibilidad se utilizó el valor directo el error absoluto (\bar{E}), ya que este se desarrolla de manera directa dentro del entorno de Feflow, y calcular el NRMSE de forma manual requiere de un procedimiento muy extenso. Como resultado se obtuvo que al variar los parámetros de calibrados de la UH QTU la conductividad se fue el factor más sensible.

Finalmente, en el desarrollo del escenario para el 2060 se hace hincapié en que al mantener los parámetros de recarga y de extracción constantes no se tiene el escenario más realista, sin embargo, esto arrojó que en el sitio de descarga y en la colindancia sur del acuífero se logra observar una disminución de 10 a 15 metros en la piezometría, mientras que en la zona de transición que se encuentra entre ambos puntos se aprecia menor afectación a los niveles, ya que son del orden de 5 a 10 metros.

Hipótesis

Finalmente, desde el desarrollo de la post auditoría es posible inferir que la hipótesis queda comprobada, dado que se puede observar que el valor promedio del NRMSE para el periodo de 2016-2022 es de 7.85%, menor al 10% sugerido en la hipótesis, esto es posible que esté relacionado a que el periodo de observación es casi inmediato a la fecha de calibración última del modelo (2015), será interesante el hecho de comparar nuevamente en años posteriores hasta qué fecha el valor de calibración se mantiene por debajo del 10%.

Referencias

Amaya-Varela, L.D. (2023). Evaluación del funcionamiento de los sistemas de flujo de agua subterránea mediante un modelo numérico en el acuífero de Calera Zacatecas. [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Anderson, M. P., W. W. Woessner, y R. J. Hunt. (2015). Applied Groundwater Modeling (Segunda Edición), Academic Press, San Diego

Aquist. (2021). La elaboración de un Modelo Hidrogeológico Numérico. Recuperado 18 de mayo de 2022, de Aquist Hidrogeológica Página web: <https://www.aquist.cl/2021/02/26/elaboracion-del-modelo-hidrogeologico-numerico/>

Ariel Consultores. (1996). Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca, inédito. Contrato GAS-012-PRO-96

Ávila-Carrasco, J.; Mojarro, F.; Moriasi, D.; Gowda, P.; Bautista-Capetillo, C.; Echavarría-Cháirez, F.; Garbrecht, J.; Stenier, J.; Howell, T.; Kanemasu, E.; Verser, A.; Wagner, K. & Hernández, J. (2012): Calibration of SWAT2009 Using Crop Biomass, Evapotranspiration, and Deep Recharge: Calera Watershed in Zacatecas, Mexico Case Study.- Journal of Water Resource and Protection, 4: 439-450p.

Barlow, P. M. & A. F. Moench. (1998). Analytical solutions and computer programs for hydraulic interaction of stream-aquifer systems: Open-File Report 98-415ARep., Marlborough, Massachusetts.

Batu, V. (1998). Aquifer Hydraulics, a Comprehensive Guide to Hydrogeologic Data Analysis. – New York (John Wiley & Sons, Inc.). 752 pp.

Bear, J. (1988). Dynamics of fluids in porous media, 784p.

BGR Hannover (2015). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: The global map of groundwater vulnerability to floods and droughts, Paris:UNESCO

Botsford, C. (1909). The Zacatecas district and its relations to Guanajuato and other camps: Engineering and Mineral Journal, 87, 80-95p.

Burckard, C. (1906). "Sobre el descubrimiento del Tríasico marino en Zacatecas". Soc. Geol. Méx., Bol., Vol.2, p 43-45p.

Burkart, J. (1836). Aufenthalt und Reisen in México in der Jahren 1825 bis 1834, vol. 2: Stuttgart, Schweizerbart, 286 p.

Castañeda, M. (2017). Propuesta de Metodología para la Elaboración y Evaluación de Modelos Conceptuales y Numéricos de Aguas Subterráneas. ResearchGate, 6-21p. DOI:10.13140/RG.2.2.30418.35525

CONAGUA, (2015 Cal): Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Calera (3225), Estado de Zacatecas. Comisión Nacional del Agua. 27p.

CONAGUA. (2019a). Capítulo 8 de Agua en el mundo. Sistema Nacional de Información del agua. Comisión Nacional del Agua, Disponible en internet. Consultado en Noviembre 2022. Página web: <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/agua-en-el-mundo>

CONAGUA. (2019b). Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Edición 2019. 40p.

Cubas, F., Llano, M., & J. de Rosenzweig, L. (2017). El misterio del agua subterránea en México. México, 2017. 1p.

Cuevas-Pérez, E., Servais, M., Vortisch, W. & Monod, O. (1985). Una interpretación tectónica de Sinaloa a San Luis Potosí, México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 37(2), 31-57p.

Darcy, H. P. G. (1856). Determination of the Laws of Water Flow through Sand, the Public Fountains of the City of Dijon, Appendix D e Filtration, Section 2 of Appendix D on Natural Filtration. Translated from the French by Patricia Bobeck., Kendall/Hunt Publishing Company, Iowa, 455 – 458p.

De Cserna, Z. (1976). Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 87(8), 1191-1199p.

DOF. (2019). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Calera, clave 3225, en el Estado de Zacatecas, Región Hidrológico-Administrativa VII, Cuencas Centrales del Norte. Recuperado en junio de 2013. Página web:

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5572271&fecha=13/09/2019#gsc.tab=0

DVGW, (2004). - DEUTSCHE VEREINIGUNG DES GAS- UND WASSERFACHES: Technische Regeln: Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten, 24p.

Edwards, J. (1955). Studies of some early Tertiary red conglomerates of Central Mexico: United States Geological Survey Professional Paper, 264-H, 153-185p.

Flores, C. (2005). LA EXACTITUD DEL PROBLEMA DIRECTO DE SONDEOS ELECTROMAGNÉTICOS TRANSITORIOS. GEOS, Vol. 20, (No. 2), 70-88p.

Frost, J. (2023). Root Mean Square Error (RMSE). Statistics By Jim. Recuperado el 21 de julio de 2023. Página web: <https://statisticsbyjim.com/regression/root-mean-square-error-rmse/#:~:text=What%20is%20the%20Root%20Mean,line%20and%20the%20data%20points>

Gardea, A. (2019). CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL DEL MANANTIAL “OJO DE AGUA”, MOCTEZUMA, S.L.P. Y ACCIONES PARA SU CONSERVACIÓN Y USO. [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 93-95p.

GW Proyect. (s.f.). The Ground Water Proyect, “La importancia de las aguas subterráneas” Disponible en internet. Consultado en Mayo 2023. Página web: <https://gw-project.org/la-importancia-de-las-aguas-subterraneas/?lang=es>

Haitjema, H. (2006). The Role of Hand Calculations in Ground Water Flow Modeling, Ground Water, 44(6), 789p.

Hermann, E., & Prunes, E. (2023). ¿Qué es el agua subterránea y por qué es tan importante?. Recuperado 17 de febrero de 2023, de WWF Página web: <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/que-es-el-agua-subterranea-y-por-que-es-tan-importante>

Imlay, R. (1937). Geology of the middle part of the Sierra de Parras, Coahuila, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 48, 567-630p.

Konikow, L. (1986). Predictive accuracy of a groundwater model-lesson from a post audit. Groundwater. 173-184p.

Konikow, L. F., & Bredehoeft, J. D., (1992). Ground-water models cannot be validated. Advances in Water Resources 15: 75-83p.

Krienen, L. (2018). Understanding deep ground water flow systems to contribute to a sustainable use of the water resource in mexican altiplano (Tesis Doctoral no publicada). RWTH-Aachen University.

MacDowell, F. & Clabaugh, S. (1979). Boletín de la Geological Society of America Vol. Special paper 180: 113-124p.

MCI, IGME, DA. (2010). Desarrollo sostenible, uso conjunto y gestión integral de recursos hídricos. Estudios y actualizaciones realizadas en la Provincia de Alicante. Ministerio de Ciencia e Innovación. Instituto Geológico y Minero de España. Diputación de Alicante. España. 398 p. ISBN: 978-96979- 40-6

Mifflin, M. (1988). “Region 5, Great Basin”, en: Back, W., J. S. Rosenhein and P. R. Seaber (eds.). The Geology of North America, v. 0-2. Hydrogeology. Boulder, Colorado; Geological Society of America.

Nieto-Samaniego, A., Alaniz-Alvarez, S. & Tolson, G. (2005). Spatial Distribution, Scaling and Self-similar Behavior of Fracture Arrays in the Los Planes Fault, Baja California Sur, Mexico. Pure appl. geophys. 162, 805–826. <https://doi.org/10.1007/s00024-004-2642-y>

Niswonger, R., Prudic, D., & Regan, R. (2006). Documentation of the Unsaturated-Zone Flow (UZFI) Package for modeling unsaturated flow between the land surface and the water table with MODFLOW-2005: Tomo 6, Capítulo A19 U.S. Geological Techniques and Methods. 62p.

Núñez, E. (2003). El Acuífero de Calera Zacatecas, situación actual y perspectivas para un desarrollo Sustentable. [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Parkhurst, D. & Appelo, C. (2013). Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3-A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. US Geological Survey Techniques and Methods, Libro 6, Capítulo A43, 497p. <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43>

Ponce, B. & Clark, K. (1985). The Zacatecas mining district: A Tertriary caldera complex associated with precious and base metal mineralization. Revista Economic Geology. Vol. 83: 1668-1682p.

Price, M. (2003). Capítulo 3 Agua en Movimiento. Agua Subterránea. Ed. Limusa S.A. de C.V. 13-19 p. ISBN 968-18-5560-4

Raisz, E. (1964). Landforms of Mexico, mapa scale 1:3,000,000: Cambridge, Massachusetts, U.S., Office of Naval Research, Geography Branch, Second Edición

Reisinger, T. (2013). Modelo hidrogeológico preliminar y modelización 2D del flujo de agua subterránea del acuífero kárstico desde Mérida hasta la costa norte (Yucatán, México). Tesis de maestría. Facultad de Georecursos e Ingeniería de Materiales. RWTH Universidad de Aquisgrán.

Samper, J., y M. Lorenzo. (2008). Soluciones analíticas para el cálculo de caudales de infiltración en túneles, El agua y las infraestructuras en el medio subterráneo. AIH - GE. Barcelona, nov. 24-26p.

Sandoval, L. (2008). ¿Qué son y para qué sirven los Cotas?. Periódico AM, p. 1.

Schuster, E. T., & White, W. B. (1971). Seasonal Fluctuations in the Chemistry of Limestone Springs: A Possible Means for Characterizing Carbonate Aquifers. Ed. J. Hydrol., 14p.

SEA, (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Servicio de Evaluación Ambiental.

SGM, (2020). Geofísica. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado el 22 de julio de 2023. Página Web: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geofisica/Introduccion-geofisica.html>

Stone, J. (1956). Geology and the ore deposits of the Cantera Mine, Zacatecas, Mexico: Economic Geology, 51(1), 80-95p.

Tóth, J. (1998). Groundwater as a geological agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. Hydrogeology Journal, 7: 1-14p.

Vargas, S., Mollard, E. (2005). Problemas socio-ambientales y experiencias organizativas en las cuencas de México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Institut de Recherche pour le Développement. México, 2005. 386p.

White, W.B. (1988). Capítulo 3 Modelo numérico. Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains. Ed. Oxford University Press, New York. 30p. ISBN 0 19504444 4

WWAP. (2016). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo, París: UNESCO

Yta, M. (1992). Etude Geodynamique et metallogénique D'un secteur de la "Faja de Plata", Mexique: La zone de Zacatecas-Francisco I.-Saucito: Universidad de Orleans, tesis doctoral, 265p.

Apéndice digital

Apéndice 1. Cálculos de NRMSE

Apéndice 2. Archivos del modelo geológico 3D

Apéndice 3. Archivos del modelo numérico de flujo de agua subterránea