



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA

***“ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y CALIDAD DEL
AGUA DE LOS ACUÍFEROS ZAMORA Y COTIJA EN EL ESTADO DE
MICHOACÁN”.***

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ING. MARIA GUADALUPE MANZO OSEGUERA

ASESOR:

DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

CO-ASESOR:

DRA. LILIANA GARCÍA ROMERO

MORELIA MICH. AGOSTO 2025

A Dios y a mis padres...
Con mucho cariño y amor.

Lupita Manzo Oseguera.

Agradecimientos

A Dios

Gracias por permitirme llegar a este momento tan importante en mi vida, gracias por estar siempre presente, por abrir caminos y sostenerme a lo largo de esta etapa académica, eres tú quien guía el destino de mi vida.

A mis padres

Alfredo Manzo Oseguera y Ma. Del Refugio Oseguera Oseguera

Es difícil encontrar palabras que estén a la altura del agradecimiento que merecen por todo su apoyo incondicional. Agradezco tenerlos en mi vida y ser los pilares más importantes en ella, gracias por permitirme lograr alcanzar una meta más en mi vida, ustedes son mi inspiración y han sido la base sobre la cual he podido construir cada uno de mis logros, gracias infinitas por su amor incondicional, todo mi respeto y admiración, los amo con todo mi corazón.

A mis asesoras de tesis:

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Agradezco su apoyo y preocupación por mi desarrollo académico, gracias por impulsarme a seguir y concluir esta etapa de estudio, agradezco infinitamente sus consejos, su apoyo y el que haya creído en mi incluso cuando yo dudaba, no solo es una excelente profesora, usted es un ser humano admirable.

A la Dra. Liliana García Romero

Gracias por su asesoría, apoyo y tiempo dedicado a la realización de este proyecto.

A mi mesa sinodal:

Dr. Jesús Pardo Loaiza, Dr. Julio César Orantes Ávalos, Dr. Marco Antonio Martínez Cinco, quienes me acompañaron en estos dos años e hicieron sugerencias y observaciones en mi proyecto.

A la dependencia de CONAGUA Michoacán

Ing. Rigoberto López Hernández, jefe del departamento de aguas subterráneas por su atención, información proporcionada y buena disposición en el apoyo para la medición de niveles piezométricos. Dra. Viridiana jefa del departamento de calidad de agua 2023 por su buena disposición y apoyo en la realización de las pruebas de calidad de agua. Mtra. Silvia Gómez Orozco jefa del departamento de calidad de agua 2024 por su apoyo en la elaboración del documento necesario para la autorización de toma de muestras.

A mi brigada del trabajo en campo

Mar Farfán, Israel Ledesma, Diego Guerrero, Ángel Saucedo, Liz García y Joel Bedolla.

Al programa CONAHCYT por el apoyo financiero a través de la beca proporcionada en el programa para lograr estudiar estos dos años mi Maestría en Ciencias de la Ingeniería Ambiental.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por permitirme ser miembro de su comunidad en mi licenciatura y posgrado.

Índice

Índice de tablas.....	9
Índice de figuras.	10
Resumen.....	13
Abstract	14
1. Marco Conceptual	15
1.2 Introducción	15
1.2 Hipótesis.....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 General	17
1.3.2 Particulares	17
1.4 Justificación	18
2. Marco teórico	20
2.1 Acuíferos.....	20
2.2 Tipos de materiales que conforman un acuífero.	20
2.3 Acuíferos en México.	21
2.4 Ciclo hidrológico.	22
2.5 Hidrología.	22
2.6 Hidrología superficial.	23
2.7 Hidrología subterránea.....	23
2.8 Modelos matemáticos.	25
2.8.1 Modelos hidrológicos superficiales.....	26
2.8.2 Modelos hidrológicos subterráneos	26
2.9 Calidad de agua.	27
2.10 Diagnostico de la calidad de agua.....	28
2.11 Hidrogeoquímica y calidad del agua en el acuífero de Zamora.	30
2.12 Hidrogeoquímica y calidad del agua en el acuífero de Cotija.	31
2.13 Contaminación del agua.	32
2.13.1 Contaminación del agua subterránea.....	33
2.14 Clasificación de las aguas subterráneas según su origen y tiempo de contacto en el acuífero.	33
2.15 Características del agua.....	35
2.15.1 Anhídrido carbónico (CO ₂).	35

2.15.2	Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea.....	35
2.16	Composición química del agua subterránea.....	37
2.16.1	Iones mayoritarios.	37
2.16.3	Elementos traza	43
3.	Antecedentes.....	45
4.	Metodología	51
4.1	Recopilación de información.	52
4.1.1	INEGI.....	52
4.1.2	CONABIO.....	53
4.1.3	Información Meteorológica.	53
4.1.4	Información hidrométrica.....	54
4.1.5	Información subterránea.	55
4.2	Análisis y gestión de datos.....	55
4.2.1	Pruebas en las estaciones.	56
4.3	Polígonos de Thiessen.	60
4.4	Generación de las series.	60
4.4.1	Llenado de datos faltantes.....	60
4.4.2	Llenado de estaciones de temperatura.	62
4.4.3	Obtención de series de evapotranspiración.	62
4.5	Estaciones hidrométricas.....	64
4.5.1	Estaciones a régimen natural.....	65
4.6	Modelación superficial.	66
4.6.1	Weap.	66
4.6.2	Soil Moisture Method (SMM).	67
4.7	Calibración del modelo.	70
4.8	Indicadores de bondad de ajuste.....	71
4.8.1	Eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE).	71
4.8.2	Eficiencia de Nash-Sutcliffe modificada (Ln NSE).....	72
4.8.3	Coeficiente de correlación de Pearson (r).	72
4.8.4	Coeficiente de simetría (cs).	73
4.9	Similitud hidrológica.	73
4.10	Balance hídrico.	74
4.11	Características del acuífero.....	75

4.11.1 Relieve continental.....	76
4.11.2 Salidas y descargas del acuífero.....	76
4.11.3 Pozos de extracción.....	76
4.11.4 Manantiales.....	76
4.12 Modflow.....	76
4.12.1 Discretización del acuífero.....	77
4.12.2 Obtención de la información que alimenta al modelo subterráneo.....	79
4.12.3 Tipos de celdas y simulación de condiciones de contorno.....	82
4.13 Paquetes de simulación en Modflow.....	83
4.13.1 Paquete básico.....	83
4.13.2 Variable IBOUND.....	84
4.14 Calibración del Modelo.....	86
4.15 Colecta de muestras para el análisis del agua.....	86
4.15.1 Trabajo de campo.....	88
4.15.2 Objetivo del trabajo de campo.....	89
4.15.3 Metodología del trabajo en campo.....	89
4.16 Calidad de agua.....	91
4.16.1 Balance iónico.....	91
4.16.2 Intercambio iónico.....	91
4.16.3 Fenómenos de oxidación-reducción.....	91
4.17 Hidroquímica.....	92
4.17.1 Diagrama de Piper.....	92
4.17.2 Diagrama de Stiff.....	94
4.17.3 Secuencia de Chevorateb.....	95
4.17.4 Diagrama de Durov.....	96
4.17.5 Diagrama de Schoeller.....	97
4.17.6 Diagrama de Gibbs.....	98
4.18 Relaciones hidrogeoquímicas.....	99
4.19 Índice de calidad del agua subterránea.....	101
5. Resultados.....	104
5.1 Caracterización de la zona de estudio.....	104
5.2 Recopilación de datos para la modelación superficial.....	118
5.3 Modelación Superficial.....	123

5.4 Similitud hidrológica.	129
5.5 Balance hídrico.	130
5.6 Gestión de datos subterráneos.....	133
5.7 Recopilación de datos para la simulación subterránea.	143
5.8 Trabajo de campo.....	153
5.8.1 Colecta de muestras.	153
5.9 Análisis de parámetros in si tu.....	156
5.9.1 Temperatura.....	156
5.9.2 Conductividad eléctrica.	157
5.9.3 Solidos disueltos totales.	158
5.9.4 Dureza.....	159
5.10 Análisis de iones mayoritarios.	160
5.10.1 Calcio (Ca^{2+}).	161
5.10.2 Magnesio (Mg^{2+}).	161
5.10.3 Sodio (Na^+).	162
5.11 Análisis de iones minoritarios.	163
5.11.1 Bicarbonatos (HCO_3^-).	163
5.11.2 Sulfatos (SO_4^{2-}).	164
5.11.3 Cloruros (Cl^-).	165
5.11.4 Nitratos (NO_3^-).	166
5.12 Balance iónico.....	167
5.13 Arsénico (As).....	168
5.14 Distribución espacial de los parámetros analizados del agua subterránea.	168
5.14.1 Parámetros de campo.....	169
5.14.2 Iones mayoritarios.	171
5.14.3 Iones minoritarios.....	173
5.14.4 Arsénico (As).....	177
5.15 Análisis hidrogeoquímico.....	177
5.15.1 Diagrama de Piper.	178
5.15.2 Diagrama de Stiff.	179
5.15.3 Diagrama de Durov.	181
5.15.4 Diagrama de Schoeller.	182
5.15.5 Diagrama de Gibbs.....	183

5.16 Relaciones Hidrogeoquímicas.....	184
5.16.1 Relación rNa^+/rCl^-	184
5.16.2 Relación rNa^+/rK^+	185
5.16.3 Relación rMg^{2+}/rCl^-	186
5.16.4 Relación rCa^{2+}/rMg^{2+}	186
5.16.5 Relación rCa^{2+}/rSO_4^{2-}	187
5.16.6 Relación $rHCO_3^-/rCl^-$	188
5.17 Diagrama hidro químico binario.....	188
5.18 Intercambio iónico.....	189
5.19 Índice de calidad del agua subterránea.....	191
6. Conclusiones.....	193
7. Referencias.....	195
8. Anexos.....	203
8.1 Registro fotográfico del trabajo en campo (2023).....	203
8.2 Registro fotográfico del trabajo en campo (2024).....	206

Índice de tablas

Tabla 1. Iones fundamentales.	29
Tabla 2. Clasificación de agua por contenido de solidos disueltos totales.	30
Tabla 3. Composición química del agua en el acuífero de Zamora (CONGUA,2020).	30
Tabla 4. Equilibrio entre las distintas formas de carbono disuelto en el agua subterránea.	35
Tabla 5. Rangos de valores de la conductividad según (Sánchez,2022).	36
Tabla 6. Límites máximos permisibles por la NOM-127-SSA1-1994	37
Tabla 7. Iones mayoritarios.	38
Tabla 8. Límites máximos permisibles de iones mayoritarios por la NOM-127-SSA1-1994.	40
Tabla 9. Iones minoritarios.	40
Tabla 10. Límites permisibles por la NOM-127-SSA1-1994.	44
Tabla 11. Rangos de cambios permitidos para la prueba de secuencias, según el número de datos.	58
Tabla 12. Términos presentes en las ecuaciones del SMM.	68
Tabla 13. Calidad de ajuste con los diferentes indicadores de bondad.	73
Tabla 14. Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros/día). Recopilación (Sanders,1998).	81
Tabla 15. Valores estimados de la porosidad (%) (Sanders, 1998).	82
Tabla 16. Pozos de extracción a muestrear en el acuífero de Zamora.	87
Tabla 17. Pozos de extracción a muestrear en el acuífero de Cotija.	88
Tabla 18. Ponderaciones de los parámetros para evaluar el índice de Calidad del Agua.	101
Tabla 19. Límites máximos permitidos por estándares nacionales o internacionales.	103
Tabla 20. Categorías del índice de Calidad del Agua.	103
Tabla 21. Estaciones principales.	120
Tabla 22. Estaciones meteorológicas utilizadas para la modelación superficial.	121
Tabla 23. Información de entrada para el modelo superficial.	122
Tabla 24. Errores en la evapotranspiración.	125
Tabla 25. Indicadores de ajuste obtenidos de la modelación con Weap.	129
Tabla 26. Parámetros utilizados para la modelación de la Cuenca 5 con el SMM.	130
Tabla 27. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance del acuífero de Cotija.	131
Tabla 28. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance del acuífero de Zamora.	132
Tabla 29. Volúmenes concesionados para el acuífero de Zamora.	134
Tabla 30. Volúmenes concesionados en el acuífero de Cotija.	134
Tabla 31. Manantiales con información en la zona de estudio.	137
Tabla 32. Parámetros medidos en campo, muestreo (2023).	155
Tabla 33. Parámetros medidos en campo, muestreo (2024).	155
Tabla 34. Resultados de iones analizados y balance iónico.	160
Tabla 35. Simbología de los pozos de extracción muestreados.	169
Tabla 36. Simbología de muestreos.	177
Tabla 37. Valor del ICA en la zona de estudio.	192

Índice de figuras.

Figura 1. Esquema metodológico de la gestión de datos y la modelación superficial.	51
Figura 2. Esquema metodológico de la simulación subterránea.	51
Figura 3. Esquema metodológico de la determinación de la Calidad del agua.	52
Figura 4. Etapas para el desarrollo de un modelo en WEAP.	67
Figura 5. Representación del SMM de WEAP ((Navarro Farfán et al., 2019).	70
Figura 6. Discretización del acuífero por medio de celdas, marcando filas, columnas y capas. Figura de (Harbaugh, 2005).	78
Figura 7. Tipos de celdas y condiciones de contorno en el acuífero (Harbaugh, 2005).	83
Figura 8. Ejemplo de la variable IBOUND para una capa simple (García Pérez et al., 2021).	84
Figura 9. Mapa de los sitios de muestreo preliminar.	87
Figura 10. Diagrama del triángulo catiónico. Imagen adaptada de (Hounslow, 1995).	93
Figura 11. Diagrama de clasificación hidroquímica para aguas naturales usando el diagrama de Piper (1944).	94
Figura 12. Diagrama de Stiff.	95
Figura 13. Zonas de profundidad de acuíferos.	96
Figura 14. Diagrama de Durov.	97
Figura 15. Diagrama de Schoeller.	98
Figura 16. Diagrama de Gibbs (Cationes).	98
Figura 17. Diagrama de Gibbs (Aniones).	99
Figura 18. Localización de la zona de estudio.	105
Figura 19. Topografía de la zona de estudio.	106
Figura 20. Municipios que abarcan la zona de estudio.	107
Figura 21. Acuíferos asociados a los estudiados.	107
Figura 22. Precipitación media anual de la zona de estudio.	108
Figura 23. Localización de las regiones hidrológicas administrativas de la zona de estudio.	109
Figura 24. Hidrografía de la zona de estudio.	110
Figura 25. Escurrimientos superficiales de la zona de estudio.	111
Figura 26. Distritos de riego en la zona de estudio.	112
Figura 27. Tipos de rocas en la zona de estudio.	113
Figura 28. Masas geológicas que conforman la zona de estudio.	114
Figura 29. Tipo de suelo en la zona de estudio.	116
Figura 30. Uso de suelo en la zona de estudio.	117
Figura 31. Mapa de vegetación de la zona de estudio.	118
Figura 32. Estaciones meteorológicas iniciales en la zona de estudio.	119
Figura 33. Estaciones meteorológicas principales.	119
Figura 34. Polígonos de Thiessen para las cuencas de simulación.	121
Figura 35. Estaciones hidrométricas localizadas en la zona de estudio.	123
Figura 36. Cuencas de simulación a régimen natural.	124
Figura 37. Esquemas de modelación de la Cuenca 5 y 8.	125
Figura 38. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 5 (12310).	126
Figura 39. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 5 (12310).	127
Figura 40. Resultados de los volúmenes mensuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 5 (12310).	127
Figura 41. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SMM para la cuenca 8 (12326).	128
Figura 42. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 8 (12326).	128
Figura 43. Resultados de los volúmenes mensuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 8 (12326).	128
Figura 44. Cuencas para la similitud hidrológica.	129

Figura 45. Balance hidrológico medio anual de la cuenca perteneciente al acuífero de Cotija, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con SMM.	132
Figura 46. Balance hidrológico medio anual de la cuenca perteneciente al acuífero de Zamora, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con SMM.	133
Figura 47. Pozos de extracción concesionados en la zona de estudio.	135
Figura 48. Clasificación de los pozos de extracción de la zona.....	135
Figura 49. Localización de manantiales en la zona de estudio.....	136
Figura 50. Pozos con información piezométrica en la zona de estudio.	137
Figura 51. Cortes en los acuíferos para la evolución del nivel estático.	138
Figura 52. Corte A-A' de la evolución del nivel estático de la zona de estudio.	139
Figura 53. Corte B-B' de la evolución del nivel estático de la zona de estudio.	139
Figura 54. Corte C-C' de la evolución del nivel estático de la zona de estudio.	139
Figura 55. Comportamiento del nivel estático (Año 2001).	140
Figura 56. Comportamiento del estático (Año 2008).	141
Figura 57. Comportamiento del nivel estático (Año 2023).	141
Figura 58. Malla de los acuíferos Zamora y Cotija con resolución de 2kmx2km.	143
Figura 59. Mapa de condiciones de contorno de los acuíferos estudiados.	144
Figura 60. Ráster ajustado a la malla del relieve.	145
Figura 61. Elevación de fondo (Acuíferos de la zona).	146
Figura 62. Manantiales por celda en la zona de estudio.	146
Figura 63. Celdas con pozos de extracción.	147
Figura 64. Numero de pozos de extracción por celda.	147
Figura 65. Volúmenes de extracción en la zona de estudio en m ³ /año.	148
Figura 66. Numero de pozos por celda con retorno de riego.	149
Figura 67. Conductividad hidráulica inicial para el acuífero.	150
Figura 68. Coeficiente de almacenamiento para el acuífero.	150
Figura 69. Celdas con información de niveles estáticos.	151
Figura 70. Mapa de representación de acciones elementales por las que estará sometido el modelo.	152
Figura 71. Configuración de los acuíferos en PMWIN – MODFLOW.	152
Figura 72. Altura Piezométrica inicial para el año 2001.	153
Figura 73. Pozos y manantiales muestreados (Julio 2024).	154
Figura 74. Valores de Temperatura de las muestras en (°C) de los sitios de muestreo.	156
Figura 75. Valores de Temperatura del ambiente en la toma de muestra en (°C).	157
Figura 76. Valores de conductividad eléctrica (µS/cm) de los sitios de muestreo.	158
Figura 77. Valores de solidos disueltos totales (mg/L) de los sitios de muestreo.	159
Figura 78. Valores de dureza (mg/L) en la zona de estudio.	159
Figura 79. Concentraciones de Calcio (Ca ²⁺) de las 12 muestras analizadas.	161
Figura 80. Concentraciones de Magnesio (Mg ²⁺) de las 12 muestras analizadas.	162
Figura 81. Concentraciones de Sodio (Na ⁺) de las 12 muestras analizadas.	163
Figura 82. Concentraciones de Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻) de las 12 muestras analizadas.	164
Figura 83. Concentraciones de Sulfatos (SO ₄ ⁻) de las 12 muestras analizadas.	165
Figura 84. Concentraciones de Cloruros (Cl ⁻) de las 12 muestras analizadas.	166
Figura 85. Concentraciones de Nitratos (NO ₃ ⁻) de las 12 muestras analizadas.	167
Figura 86. Representación gráfica del Balance iónico.	167
Figura 87. Concentración de As (mg/L) en los sitios de muestreo (Julio 2024).	168
Figura 88. Mapas de distribución espacial de temperatura.	169
Figura 89. Mapas de distribución espacial de la conductividad eléctrica.	170
Figura 90. Mapas de distribución espacial de Solidos Disueltos Totales (SDT).	171
Figura 91. Mapa de distribución espacial de Ca ²⁺ en la zona de estudio (Julio, 2024).	172

Figura 92. Mapa de distribución espacial de Mg^{2+} en la zona de estudio (Julio, 2024).	172
Figura 93. Mapa de distribución espacial de Na^+ en la zona de estudio (Julio, 2024).	173
Figura 94. Mapa de distribución espacial de HCO_3^- en la zona de estudio (Julio, 2024).	174
Figura 95. Mapa de distribución espacial de SO_4^{2-} en la zona de estudio (Julio, 2024).	174
Figura 96. Mapa de distribución espacial de Cl^- en la zona de estudio (Julio, 2024).	175
Figura 97. Mapa de distribución espacial de nitratos en la zona de estudio (Julio, 2024).	176
Figura 98. Mapa de distribución espacial de F^- en la zona de estudio (Julio, 2024).	176
Figura 99. Mapa de distribución espacial de As en la zona de estudio (Julio, 2024).	177
Figura 100. Diagrama de Piper de la zona de estudio (colecta Julio, 2024).	178
Figura 101. Recopilación de diagramas de Stiff de la zona de estudio (Colecta, Julio 2024).	179
Figura 102. Diagrama de Durov para la zona de estudio (Colecta, Julio 2024).	182
Figura 103. Diagrama de Schoeller de la zona de estudio (Colecta Julio, 2024).	183
Figura 104. Diagrama de Gibbs para Aniones y Cationes.	184
Figura 105. Representación gráfica de la relación rNa^+/rCl^- en los sitios de muestreo.	185
Figura 106. Representación gráfica de la relación rNa^+/rK^+ en los sitios de estudio.	185
Figura 107. Representación gráfica de la relación rMg^{2+}/Cl^- en los sitios de estudio.	186
Figura 108. Representación gráfica de la relación rCa^{2+}/rMg^{2+} .	187
Figura 109. Representación gráfica de la relación rCa^{2+}/rSO_4^{2-} en los sitios de estudio.	187
Figura 110. Representación gráfica de la relación $rHCO_3^-/rCl^-$ en los sitios de estudio.	188
Figura 111. Diagrama hidroquímico binario $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ vs HCO_3^- .	189
Figura 112. Índice de Cloro Alcalino (CAI-1).	190
Figura 113. Índice de Cloro Alcalino 2 (CAI-2).	191
Figura 114. Mapa de calidad de agua de la zona de estudio (ICA).	192

Resumen

El agua subterránea representa un recurso estratégico para el desarrollo económico del estado de Michoacán, particularmente en la región que considera el presente estudio. Su disponibilidad resulta determinante para la expansión de las actividades productivas, especialmente en el ámbito agrícola, al cual se destina cerca del 80 % del volumen total extraído. Esta situación pone de manifiesto la importancia del recurso para el fortalecimiento del sector primario y el crecimiento económico regional, destacando la necesidad de una gestión adecuada y sostenible del agua subterránea.

Una gestión oportuna y eficiente de los recursos hídricos es fundamental para garantizar la coexistencia y sostenibilidad de sus distintos usos. En este estudio, se propone una planificación integral del recurso mediante la implementación un modelo hidrológico superficial, utilizando el método de Humedad del Suelo del software *Water Evaluation and Planning system* (WEAP), con el objetivo de estimar las series de recarga que alimentan el acuífero profundo. Esta información permitió realizar posteriormente la simulación del sistema subterráneo mediante el modelo numérico para simular el flujo en los acuíferos, MODFLOW.

Además, se llevó a cabo la evaluación de la calidad del agua subterránea en 12 pozos estratégicamente distribuidos en ambos acuíferos. Para ello, se analizaron parámetros fisicoquímicos, la concentración de iones mayoritarios y la presencia de arsénico como elemento traza. Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites establecidos por las normas mexicanas e internacionales, con el fin de determinar la aptitud del recurso para distintos usos y contribuir al conocimiento de las condiciones hidrogeoquímicas de la zona.

Palabras clave: Acuíferos, modelación hidrológica, calidad del agua, Zamora y Cotija.

Abstract

Groundwater represents a strategic resource for the economic development of the state of Michoacán, particularly in the region covered by this study. Its availability is crucial for the expansion of productive activities, especially in agriculture, to which approximately 80% of the total volume extracted is allocated. This situation highlights the importance of this resource for strengthening the primary sector and regional economic growth, highlighting the need for proper and sustainable groundwater management.

Timely and efficient management of water resources is essential to ensure the coexistence and sustainability of its various uses. This study proposes comprehensive resource planning through the implementation of a surface hydrological model, utilizing the Soil Moisture method of the Water Assessment and Planning system (WEAP) software, with the aim of estimating the recharge series that feed the deep aquifer. This information allowed for subsequent simulation of the underground system using the MODFLOW numerical model for simulating aquifer flow. In addition, groundwater quality was assessed in 12 wells strategically distributed throughout both aquifers. Physicochemical parameters, the concentration of major ions, and the presence of arsenic as a trace element were analyzed. The results were compared with the limits established by Mexican and international standards to determine the resource's suitability for different uses and contribute to understanding the hydrogeochemical conditions of the area.

Keywords: Aquifers, hydrological modeling, water quality, Zamora and Cotija.

1. Marco Conceptual

1.2 Introducción

El agua es uno de los recursos naturales fundamentales para asegurar el bienestar y el desarrollo pleno de las personas. Su función es indispensable para la preservación de la vida en la Tierra, debido a sus propiedades únicas que la convierten en un elemento insustituible. El ser humano requiere del agua no solo para cubrir necesidades esenciales como beber, mantener la higiene y preparar alimentos, sino también para actividades secundarias, tales como la agricultura, la ganadería e incluso la generación de energía. Estos usos resaltan la importancia de su preservación y gestión adecuada. La agricultura depende directamente de la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico para llevar a cabo actividades como el riego, y otros procesos productivos. Por ello, una gestión eficiente del agua en este sector es indispensable para garantizar su uso y sobre todo el bienestar de las poblaciones que dependen de él.

En la actualidad, la escasez de agua se ha consolidado como uno de los factores determinantes en la generación de conflictos sociales, condiciones de pobreza y procesos migratorios en diversas regiones del mundo (FAO, 2003). De acuerdo estadísticas de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), aproximadamente el 39 % del agua destinada al uso consuntivo en México proviene de fuentes subterráneas. Esta cifra resalta la importancia de supervisar que el recurso hídrico distribuido a la sociedad mantenga condiciones óptimas de calidad. Asimismo, es fundamental contar con información precisa sobre la disponibilidad hídrica en cuerpos superficiales y subterráneos, para lograr una gestión responsable y sostenible del recurso. Desafortunadamente, México carece de la información necesaria, lo que dificulta la realización de estudios hidrológicos (superficiales y subterráneos) fiables (Manzo Oseguera et al., 2022).

La gestión del agua considera a los acuíferos como piezas fundamentales dentro de su planificación, debido a que aproximadamente el 38 % de los existentes en México se encuentran en condiciones de sobreexplotación. Adicionalmente, una proporción significativa presenta distintos niveles de contaminación, lo que compromete tanto la cantidad disponible como las condiciones de calidad del agua destinada a los sectores agrícola, industrial y doméstico. Esta problemática se intensifica debido a la disminución progresiva en la disponibilidad de aguas subterráneas. Esta situación se agrava ante la tendencia decreciente en la disponibilidad de agua subterránea, resultado de una extracción intensiva y una recarga natural insuficiente (Navarro Farfán et al., 2019).

En particular, la modelación hidrológica e hidrogeológica constituye una herramienta fundamental para el análisis de los sistemas de agua superficial y subterránea, ya que permite interpretar y representar de manera más precisa sus propiedades físicas,

características estructurales y dinámicas de funcionamiento (Hughes Lomelín et al., 2023). La modelación en cuencas que presentan escasez e incertidumbre en la disponibilidad de datos es bastante común (Arellano-Lara & Escalante-Sandoval, 2014), aunque esta situación así implica diversas limitaciones y desafíos metodológicos, es posible llevar a cabo el proceso de modelación utilizando periodos de calibración y simulación considerablemente breves, siempre que se apliquen criterios técnicos adecuados (Navarro Farfán et al., 2019). El propósito de la modelación del agua subterránea es analizar y comprender el comportamiento del flujo a través del medio poroso, tomando en cuenta el incremento en el consumo de agua potable y su vinculación con los sistemas hídricos superficiales.

En las últimas décadas, la contaminación del agua subterránea se ha transformado en un problema ambiental de gran importancia en todo el mundo. Esta situación se origina tanto por fuentes naturales como por diversas actividades humanas, cuyas repercusiones pueden comprometer significativamente la calidad del agua (Busico et al., 2018), en estas aguas, la mayoría de las sustancias disueltas se presentan en forma iónica. Existen ciertos iones que se encuentran de manera predominante y cuya concentración conjunta constituye la mayor parte de la carga iónica disuelta. Estos iones principales incluyen, entre los cationes, al calcio, magnesio, sodio y potasio; y entre los aniones, al bicarbonato, sulfato y cloruro. Adicionalmente, el ion nitrato suele incorporarse en este grupo, aunque sus concentraciones son generalmente bajas en zonas donde la influencia de actividades antropogénicas es mínima.

El estudio de la calidad del agua ha adquirido gran relevancia, dado que se requiere un recurso que cumpla con las condiciones necesarias para cubrir tanto las demandas domésticas como las agrícolas. La evaluación y el monitoreo continuo de sus características son fundamentales para establecer medidas preventivas orientadas a proteger la salud humana, la vida animal y la vegetación.

La calidad del agua subterránea depende de sus características físicas y químicas que están determinados por diversos factores, entre ellos están las características de las formaciones geológicas, la influencia de la precipitación atmosférica, la interacción con aguas superficiales, también los procesos geoquímicos que ocurren durante el contacto entre el agua y el medio rocoso. Adicionalmente, las actividades antropogénicas, también pueden alterar significativamente su composición y calidad (Saravanan et al., 2015). Asimismo, este tipo de estudios ofrece información clave para identificar el origen del agua subterránea, determinar el tiempo que tarda el agua en desplazarse, analizar los patrones de flujo, y entender la estructura geológica y mineralógica de los acuíferos, así como los procesos hidrogeoquímicos que en ellos ocurren (Toscano Reyes et al., 2019).

La composición hidrogeoquímica de las aguas subterráneas está regulada por diversos procesos geoquímicos, entre los que destacan el intercambio iónico, las reacciones de oxidación-reducción, así como los fenómenos de precipitación y disolución. Estos mecanismos determinan en gran medida la calidad y el comportamiento químico del recurso en el subsuelo. La presente investigación tiene como objetivo principal llevar a cabo una modelación hidrológica mediante un Modelo de Precipitación-Escurrimiento (MPE), con el fin de estimar el balance hídrico y generar las series temporales de recarga, ya que es el ingreso principal para realizar simulaciones de un modelo subterráneo. Estos elementos permitirán evaluar de manera integral la disponibilidad del recurso hídrico en la zona de estudio. Adicionalmente, en este estudio también se contempla la realización de análisis hidrogeoquímicos en la zona, con el propósito de caracterizar la calidad química de las aguas subterráneas de ambos acuíferos. Dichas características están influenciadas por los procesos de meteorización de las formaciones geológicas, los cuales se encuentran estrechamente vinculados con la litología del entorno, el volumen de agua de recarga y los mecanismos de interacción entre el agua y la roca.

1.2 Hipótesis

El análisis de la disponibilidad hídrica a través del uso de modelos matemáticos y el monitoreo permitirá conocer la dinámica del agua superficial y subterránea en los acuíferos Zamora y Cotija identificando su calidad y procedencia.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Obtener la disponibilidad hídrica superficial y subterránea mediante el uso de modelos matemáticos y evaluar su calidad y procedencia a través del análisis de los resultados del monitoreo en campo.

1.3.2 Particulares

- Recopilar y gestionar la información necesaria para el desarrollo del estudio (datos meteorológicos, hidrométricos, geológicos, etc.).
- Llevar a cabo la modelación hidrológica superficial mediante la aplicación de un modelo de precipitación–escorrentía, utilizando la plataforma WEAP.
- Generar las series de recarga de los acuíferos Zamora y Cotija (infiltración).
- Simular el comportamiento subterráneo de los acuíferos a través de un modelo de diferencias finitas (Modflow).
- Llevar a cabo un monitoreo en campo de la zona de estudio en 2 etapas.

- Evaluar el origen del agua subterránea y determinar el estado de la calidad del agua subterránea mediante el cálculo del índice de calidad del agua (ICA), estableciendo un diagnóstico integral para la zona de estudio.

1.4 Justificación

A través del análisis de la interacción entre los recursos hídricos superficiales y subterráneos, es posible generar información complementaria a la obtenida directamente en los sitios de muestreo, lo que permite una evaluación más completa de las posibles afectaciones al sistema hídrico. Esta interacción puede abordarse inicialmente desde un enfoque conceptual; sin embargo, en los últimos años se ha avanzado en el desarrollo de representaciones matemáticas que permiten describir y simular el comportamiento conjunto de estos recursos mediante herramientas de modelación hidrológica e hidrogeológica. Por otro lado, el Programa Nacional Hídrico establece la necesidad de fortalecer los procesos de monitoreo y evaluación de la calidad del agua, así como de identificar con mayor precisión las principales fuentes de contaminación. En este marco, se reconoce la importancia de determinar los efectos que el uso de agroquímicos tiene sobre los cuerpos de agua y de promover su aplicación responsable como una estrategia para mitigar la contaminación difusa. Especialmente en zonas agrícolas, se plantea como prioridad el incremento de estudios orientados a la clasificación del agua y a la identificación de impactos en su calidad. En este contexto, se hace indispensable evaluar y controlar la contaminación para que permitan no solo preservar la calidad del recurso hídrico, sino también contribuir a la conservación del suelo.

Dentro del estudio están estos dos acuíferos de gran relevancia económica para el estado de Michoacán, no solo por su función como fuente de abastecimiento hídrico, sino también por su vinculación directa con actividades agrícolas de alto valor comercial. En el acuífero de Cotija se ubica una porción significativa de la franja aguacatera destinada a la exportación, considerada la más importante del estado debido a su volumen de producción y su impacto en el mercado internacional. Por su parte, en la región de Zamora, el uso intensivo del agua subterránea está asociado al cultivo de bayas, mejor conocidas como *berries*, productos que también ocupan un lugar destacado en la economía agrícola regional y nacional.

Estas zonas agrícolas, al depender directamente de la disponibilidad y calidad del agua subterránea para su sostenimiento y productividad, evidencian la necesidad de contar con estudios integrales que permitan entender el comportamiento hidrogeológico de los acuíferos que las abastecen. La generación de información científica en estos contextos es esencial para garantizar la sostenibilidad de la actividad agrícola, prevenir la sobreexplotación del recurso y proteger su calidad frente a posibles procesos de contaminación.

Los acuíferos de este estudio, al igual que muchos otros en el territorio nacional, presentan una limitada disponibilidad de información tanto técnica, como científica. Esta situación se debe principalmente a la escasez de estudios previos realizados en la región, lo que ha impedido generar un conocimiento sólido sobre el funcionamiento y el comportamiento de los sistemas subterráneos. Esta carencia representa una barrera significativa para el diseño de estrategias de gestión eficiente y sustentable del recurso hídrico, ante este contexto, el presente estudio contribuirá de manera sustancial al conocimiento hidrogeológico e hidrogeoquímico de los acuíferos, al generar información sobre la disponibilidad y calidad del agua subterránea. Además, se creará una base de datos que va a funcionar como referencia para investigaciones posteriores, así como para la formulación de políticas y acciones orientadas a la protección y aprovechamiento responsable del recurso hídrico en la zona.

2. Marco teórico

2.1 Acuíferos.

De acuerdo con las necesidades identificadas, se han llevado a cabo distintos tipos de caracterización de acuíferos, siendo las más comunes y representativas la caracterización hidrogeológica y la hidrogeoquímica.

En este contexto, la caracterización hidrogeológica se enfoca en el análisis del vínculo entre las condiciones geológicas y físicas que afectan a un acuífero, y su interacción con los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos presentes en la zona, lo cual permite comprender el comportamiento y funcionamiento del acuífero (P. C. L. García et al., 2021).

Los acuíferos son formaciones geológicas compuestas por materiales rocosos, generalmente heterogéneos, que contienen espacios vacíos tales como poros, grietas y fracturas donde se almacena agua. Una característica distintiva de un acuífero es la presencia de una continuidad física del agua en su zona de saturación, lo que implica que, teóricamente, una molécula de agua podría desplazarse libremente dentro de esta unidad. En cambio, dos acuíferos se consideran sistemas distintos cuando no existe dicha continuidad, es decir, cuando una molécula de agua debe atravesar una zona no saturada (seca) para pasar de uno al otro (Navarro Farfán et al., 2017).

En su libro, Martínez Alfaro et al., 2006 menciona que las rocas desde un punto geológico se clasifican en:

- Acuíferos: Son formaciones de rocas que poseen una alta capacidad tanto para almacenar como para transmitir agua en cantidades significativas.
- Acuitardos: Aunque también pueden almacenar agua, su capacidad de transmitirla es muy limitada, por lo que el flujo de agua a través de ellos ocurre de manera muy lenta.
- Acuicludos: Estas formaciones pueden retener agua en su interior, pero prácticamente no permiten su transmisión, actuando como barreras al flujo subterráneo.
- Acuífugos: Son materiales geológicos que carecen tanto de capacidad de almacenamiento como de transmisión de agua, por lo que no participan en el flujo subterráneo.

2.2 Tipos de materiales que conforman un acuífero.

Las rocas sedimentarias son típicas y muy comunes en la formación de acuíferos, según su origen, estas rocas se clasifican en dos grandes grupos: químicas y clásticas.

Las rocas sedimentarias químicas resultan de procesos de precipitación química o como resultado de actividad biológica, siendo ejemplos representativos las calizas y las dolomías. Por otro lado, las rocas clásticas están compuestas por clastos, es decir, fragmentos o sedimentos provenientes de la desintegración de otras rocas; dentro de este grupo se incluyen las lutitas, limolitas, areniscas y conglomerados (Solís de la Paz & Domínguez Sánchez, 2014).

La extracción de agua subterránea es posible en la mayoría de los tipos de rocas sedimentarias, no obstante, los estratos conformados por lutitas caracterizados por su grano fino y baja permeabilidad suelen ofrecer rendimientos muy limitados, generando únicamente unos pocos litros de agua por día.

La porosidad depende de factores como la clasificación del tipo de material, la estructura de los granos y el nivel de cementación. Además, las fracturas influyen significativamente en el flujo de fluidos a través de las areniscas, pudiendo incrementar notablemente su conductividad hidráulica en comparación con una arenisca similar que no presenta fracturas (Solís de la Paz & Domínguez Sánchez, 2014).

2.3 Acuíferos en México.

El instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), define que los acuíferos son formaciones geológicas interconectadas hidráulicamente, a través de las cuales circula o se almacena el agua subterránea, la cual puede ser extraída para su uso. Estos reservorios naturales de agua, localizados bajo la superficie del suelo, pueden extenderse desde pequeñas áreas de unos pocos kilómetros hasta regiones que alcanzan varios miles de kilómetros cuadrados, donde el agua se mueve de manera lenta y continua. El comportamiento de los acuíferos depende principalmente de las propiedades de la formación geológica que los rodea, tales como su porosidad y permeabilidad.

En el contexto de la gestión de las aguas subterráneas, México ha delimitado un total de 653 acuíferos para fines administrativos. De estos, 195 acuíferos, que representan el 30%, no cuentan con disponibilidad, lo que implica que el volumen total de agua ha sido concesionado o se encuentra comprometido. Asimismo, 105 acuíferos (16%) están en situación de sobreexplotación, 32 (5%) presentan la presencia de suelos salinos y agua salobre, y 18 (3%) registran intrusión marina (Navarro Farfán et al., 2019).

Las aguas subterráneas son vitales para el desarrollo económico de México, reflejado en la magnitud del volumen que abastecen a los principales usuarios. En 2014, el 38.7% del volumen total concesionado para uso consuntivo, incluye los sectores agrícolas, de consumo público e industrial provino de fuentes subterráneas, lo que equivale a 32,906 hm³ anuales (Hughes Lomelín et al., 2023).

2.4 Ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico, se basa en la idea de que la cantidad total de agua en el planeta permanece constante. Esto implica que, aunque se produzcan variaciones en los flujos y almacenamientos de agua, el volumen global no se ve alterado. Dichas variaciones ocurren a través de una serie de procesos interconectados que actúan en distintas escalas de espacio y tiempo (Hughes Lomelín et al., 2023). El ciclo hidrológico es el punto de partida para el estudio de la hidrología, ya que permite comprender la circulación global del agua en la Tierra.

En el libro de Campos Aranda, 1998 el ciclo hidrológico se define como la "Serie de etapas que recorre el agua al trasladarse desde la atmósfera hacia la superficie terrestre y retornar nuevamente a la atmósfera".

Entonces, el agua en la naturaleza no permanece estática. El movimiento masivo del agua, causado principalmente por la energía solar, se conoce como "Ciclo hidrológico," previamente descrito como la sucesión de etapas que atraviesa el agua en su recorrido. Comprender este ciclo es fundamental, ya que representa el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimentos de la hidrosfera, involucrando la transición a través de los tres estados de la materia, sólido, líquido y gaseoso. El vapor de agua se condensa y es transportado a través de las nubes hasta que se precipita en forma de lluvia. Una vez en la superficie, esta precipitación puede experimentar distintos procesos: parte del agua es absorbida por las plantas y devuelta a la atmósfera mediante la evapotranspiración; otra parte fluye superficialmente hasta alcanzar cuerpos de agua, mientras que el resto se infiltra en el suelo, ya sea de manera superficial o subterránea. Estas diversas etapas conforman un auténtico ciclo, dado que el proceso culmina en el mismo lugar donde se origina.

2.5 Hidrología.

La hidrología constituye el fundamento de esta investigación y se define como la ciencia encargada del estudio del agua en el planeta, abarcando su presencia en los océanos, la atmósfera y la superficie terrestre. Chow, 1988 define la hidrología como la ciencia natural encargada de analizar el agua, su presencia, movimiento y distribución sobre la superficie terrestre, así como sus características físicas y químicas, y su interacción con el entorno, incluyendo los organismos vivos.

En el ámbito de la hidrología, cada caso constituye un nuevo problema de investigación que requiere el apoyo de diversas ciencias, debido a que la circulación del agua involucra múltiples medios. Un análisis hidrológico implica la recopilación y el examen de una amplia cantidad de datos, tales como los registros de precipitación, temperatura y escurrimientos, con el propósito de determinar su relevancia y representatividad en la zona de estudio. Sin embargo, en algunas ocasiones surge la dificultad de contar con un

historial de datos suficiente, lo que afecta directamente la precisión de las soluciones hidrológicas.

La exactitud de estos cálculos se fundamenta en procedimientos de ingeniería que requieren un factor de seguridad, el cual está directamente relacionado con la disponibilidad y calidad de los datos. Por esta razón, resulta fundamental que la información utilizada sea lo más precisa posible.

2.6 Hidrología superficial.

La hidrología superficial es una rama de la hidrología que se dedica al análisis del ciclo del agua en la superficie terrestre. Su enfoque principal es el estudio de los procesos que tienen lugar en la zona no saturada del suelo, conocida como zona vadosa, y en la propia superficie, tales como la escorrentía, la evaporación, la transpiración y la infiltración. Esta disciplina analiza el comportamiento del agua procedente de la lluvia y otros tipos de precipitaciones, así como su interacción con el suelo, la vegetación y los cuerpos de agua superficiales, como ríos, lagos y lagunas.

La hidrología superficial desempeña un papel fundamental en la comprensión y gestión del suministro de agua en una región, la previsión de inundaciones y la evaluación de los efectos de las actividades humanas sobre los recursos hídricos. Asimismo, resulta clave en el diseño de infraestructuras hidráulicas. Su estudio también contribuye a la conservación y el uso sostenible de los recursos hídricos superficiales, esenciales para la vida y el desarrollo humano.

2.7 Hidrología subterránea.

La hidrología subterránea se dedica al análisis del agua del subsuelo y su movimiento a través del mismo. Su estudio requiere examinar los procesos hidrológicos que tienen lugar en la zona saturada del suelo (acuífero), donde los espacios porosos se encuentran completamente ocupados por agua. Esta disciplina busca comprender cómo el agua se almacena, circula y se extrae de los acuíferos, además también analiza su relación con la geología y las aguas superficiales. Esta hidrología desempeña un papel esencial en la comprensión del comportamiento de los acuíferos, los cuales representan una fuente vital de agua y su análisis resulta clave para evaluar el aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos y mitigar riesgos como la sobreexplotación de los acuíferos. Asimismo, es fundamental para la gestión sostenible del agua, en particular en aquellas regiones donde el agua subterránea tiene una influencia significativa en el ciclo hidrológico.

▪ Infiltración

La infiltración es el proceso por el cual el agua de lluvia penetra en el suelo desde la superficie, guiada por la gravedad y la capilaridad. Sin embargo, en zonas con poca

vegetación, pavimento o urbanización, gran parte del agua escurre sin infiltrarse, lo que reduce la recarga al acuífero, entonces, la infiltración está estrechamente relacionada con la cantidad de lluvia que se convierte en escurrimiento, por lo que es un factor clave para el diseño de obras hidráulicas. En cuencas con poca urbanización, el volumen de agua que se infiltra en el suelo suele ser mucho mayor que el agua que escurre por la superficie (Martínez Alfaro et al., 2006).

Lo señalado por Navarro Arellano et al., 2021, es que hay diversos factores influyen en la capacidad de infiltración del suelo, entre los cuales destacan: la textura del suelo, la humedad presente antes de la infiltración, la humedad en condiciones de saturación, la cobertura vegetal, el tipo de uso del suelo, la presencia de aire atrapado, la pérdida de materiales finos, el grado de compactación y la temperatura.

- **Porosidad**

El conocimiento de la porosidad reviste gran importancia en el ámbito de la hidrogeología, pues permite estimar el volumen máximo de agua que una roca o sedimento puede albergar cuando se encuentra completamente saturado. No obstante, es fundamental considerar que únicamente una fracción de ese volumen será efectivamente accesible para su extracción mediante obras de captación (Solís de la Paz & Domínguez Sánchez, 2014). La porosidad se calcula mediante la relación entre el volumen de los huecos de un sedimento o roca y el volumen total del suelo o roca y se expresa como fracción decimal o porcentaje.

- **Conductividad Hidráulica**

La conductividad hidráulica, en términos sencillos, se refiere a la facilidad con la que un material geológico permite el paso del agua a través de él. Se expresa como la cantidad de agua que puede fluir a través de una unidad de área de un medio poroso, durante un determinado intervalo de tiempo, cuando existe un gradiente hidráulico que impulsa el movimiento (Solís de la Paz & Domínguez Sánchez, 2014). La conductividad hidráulica está gobernada por el tamaño y forma de los poros, cuando los poros están poco conectados o son de dimensiones reducidas, el paso del agua a través del medio se ve limitado, lo que da lugar a una conductividad hidráulica baja.

- **Transmisividad**

La transmisividad en un acuífero es una propiedad hidrogeológica que indica la capacidad del acuífero para transmitir agua subterránea a través de todo su espesor saturado. Se define como el producto de la conductividad hidráulica del material poroso y el espesor del acuífero. En términos prácticos, cuanto mayor es la transmisividad, más agua puede fluir horizontalmente a través del acuífero bajo un gradiente hidráulico dado. Es un

parámetro clave para diseñar pozos, evaluar el rendimiento de acuíferos y modelar el flujo subterráneo.

- **Coeficiente de Almacenamiento**

El coeficiente de almacenamiento se refiere al volumen de agua que un acuífero puede liberar o retener por cada unidad de área, como consecuencia de una variación unitaria en la carga hidráulica perpendicular a la superficie del acuífero. Esta propiedad es adimensional, ya que representa una proporción del volumen total que responde a cambios en la presión o en el nivel del agua subterránea.

En acuífero libre el descenso del nivel de agua también ocasiona el drenado de poros saturados, producto del rendimiento específico de la unidad geológica. Los valores de coeficiente de almacenamiento para acuífero libre son de 0.02 a 0.030 (Solís de la Paz & Domínguez Sánchez, 2014).

2.8 Modelos matemáticos.

Los modelos matemáticos son representaciones idealizadas de procesos reales, formuladas a través de ecuaciones matemáticas. En estas ecuaciones, los parámetros definen las propiedades del sistema, así como sus condiciones de frontera y presiones, mientras que las variables dependientes describen el estado potencial del sistema y se obtienen mediante la resolución de dichas ecuaciones (Fowler, 1997).

Navarro Arellano et al., 2021, menciona que dentro de los modelos matemáticos se encuentran 3 principales:

- **Determinísticos:** En este tipo de modelos no se toma en cuenta la probabilidad de que el fenómeno analizado ocurra.
- **Estocásticos:** Se emplean variables probabilísticas y aleatorias para modelar el comportamiento del fenómeno.
- **De simulación numérica:** En este tipo de modelos se utilizan ecuaciones diferenciales que requieren condiciones de frontera para iniciar el análisis. La resolución y representación del fenómeno se ejecuta por medio de procedimientos basados en el método de diferencias finitas.

El método de diferencias finitas modela el sistema mediante una malla compuesta por elementos geométricos, como triángulos o cuadrados. En cada nodo o punto de intersección de dicha malla se calcula el valor de una variable de interés, como el nivel freático en el caso de los acuíferos (Navarro Arellano et al., 2021). Este modelo resulta muy factible ya que se puede discretizar el tamaño de la malla dependiendo de la complejidad del fenómeno a simular.

Para construir un modelo, es fundamental comenzar con el análisis de los procesos hidrogeológicos que influyen en el flujo del agua subterránea. Posteriormente, se debe identificar qué leyes y formulaciones matemáticas son adecuadas para representar dichos fenómenos de manera precisa.

2.8.1 Modelos hidrológicos superficiales

De manera simple un modelo puede definirse como una representación de un sistema o un proceso real. La modelación de los recursos hídricos busca representar los diversos fenómenos involucrados en el ciclo del agua, como la precipitación, evaporación, escorrentía, infiltración y el movimiento del agua a través de medios porosos, entre otros. A lo largo del ciclo hidrológico, el agua puede experimentar modificaciones en sus propiedades fisicoquímicas o biológicas. En este sentido, los modelos actuales son capaces de simular dichas alteraciones, proporcionando una visión más precisa de estos procesos (Correa González et al., 2015). Sin embargo, hay pocos modelos que analizan todo el sistema hidrológico, incluyendo el flujo de agua superficial, el flujo subterráneo y la calidad del agua. Esto se debe a que el sistema es muy complejo y requiere una gran cantidad de información para poder modelarlo correctamente.

La cuenca hidrológica constituye la unidad básica en los modelos hidrológicos, ya que en ella tienen lugar los procesos de generación del escurrimiento. Este fenómeno está directamente relacionado con variables como la temperatura, la precipitación y las características del suelo, las cuales influyen en la formación de la escorrentía superficial (Lucas Urbina et al., 2018). A través de los modelos hidrológicos, se realiza un balance de estas variables, lo que permite estimar el volumen de agua que se infiltra en el terreno y contribuye a la recarga de los acuíferos. En otras palabras, estos modelos ayudan a comprender y cuantificar el movimiento del agua en la cuenca, desde que precipita hasta que se infiltra o fluye por la superficie.

2.8.2 Modelos hidrológicos subterráneos

Los modelos hidrológicos subterráneos, se centran en el análisis del movimiento del agua a través de las formaciones geológicas. La recarga de los acuíferos está directamente vinculada a este flujo, siendo clave la evaluación de parámetros como la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento (Lucas Urbina et al., 2018). Mediante la incorporación de datos sobre entradas y salidas de agua en el sistema, los modelos permiten simular el comportamiento del agua subterránea y determinar el estado del acuífero. Esto posibilita la identificación de zonas de recarga y áreas de abatimiento del nivel piezométrico, información esencial para diseñar estrategias que promuevan el uso adecuado y sostenible del sistema subterráneo.

La finalidad esencial de este tipo de modelos es estimar el comportamiento del flujo subterráneo del agua y su reacción frente a modificaciones de origen natural o inducidas

por el ser humano. Desde los años sesenta, se han desarrollado modelos deterministas con parámetros distribuidos, los cuales se implementan mediante herramientas computacionales para examinar el funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos (Hughes Lomelín et al., 2023).

Estos modelos demandan la asignación de valores específicos a los parámetros en cada unidad geométrica o celda, lo cual implica un considerable volumen de información. Se distinguen principalmente dos tipos, los modelos analíticos y los modelos con parámetros agregados (P. C. L. García et al., 2021).

Modflow, fue desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), es un modelo hidrológico modular ampliamente utilizado como herramienta estándar para simular y prever el comportamiento de las aguas subterráneas, así como su interacción con cuerpos de agua superficial. Su estructura matemática se basa en la aplicación del método de diferencias finitas para resolver la ecuación de flujo subterráneo (Pérez González et al., 2022). Es un modelo que utiliza la interfaz gráfica *Processing Modflow for Windows* (PMWIN), a través de la cual es posible construir modelos que simulan los niveles piezométricos mediante el uso de matrices, permitiendo así la caracterización integral del acuífero para su representación matemática y posterior calibración con el uso de Modflow.

2.9 Calidad de agua.

Cualquier estudio sobre recursos hidráulicos debe incluir un capítulo fundamental que aborde las características del agua, con el fin de evaluar su idoneidad para diversos usos.

La molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno unidos a uno de oxígeno., lo que se representa con la fórmula química H_2O . El agua en su estado puro no se encuentra en la naturaleza, por lo que la definición teórica que la describe únicamente como una combinación química de oxígeno e hidrógeno no es aplicable al estado en el que usualmente se presenta (Custodio & Llamas, 2001). Una de sus propiedades más destacadas es su alta tensión superficial, la más elevada entre los líquidos conocidos, lo que le permite adherirse fácilmente a la mayoría de las superficies sólidas.

Vivimos en un planeta donde aproximadamente el 75% de su superficie está cubierta por agua, pero solo entre el 2% y el 3% corresponde a agua dulce. Sin embargo, diversas actividades humanas han provocado un deterioro considerable en su calidad, reduciendo la cantidad de agua apta para el consumo humano. Actualmente, el agua subterránea es la principal fuente de abastecimiento, ya que muchas fuentes superficiales han sido severamente afectadas. No obstante, el problema se agrava debido a la sobreexplotación de los acuíferos a nivel mundial, lo que también impacta negativamente en su calidad (Correa González et al., 2015).

La disponibilidad del agua no solo está determinada por su cantidad, sino también por su calidad, siendo esta última un factor clave en estudios científicos. Evaluar la calidad del agua subterránea es esencial, así como desarrollar índices adaptados a las condiciones específicas de cada región. Además, los estudios hidrogeológicos que analizan los cambios espaciales y temporales del agua representan una oportunidad valiosa para mejorar su gestión. La combinación de estas investigaciones puede ayudar a optimizar el uso del recurso hídrico subterráneo (Kumar et al., 2009).

La calidad del agua subterránea está determinada por múltiples factores físicos y químicos, los cuales se ven afectados por la composición geológica del área, las precipitaciones, las aguas superficiales y los procesos geoquímicos que estos son los que ocurren cuando el agua interactúa con las rocas y también las actividades humanas pueden alterar sus propiedades (Saravanan et al., 2015). En México, especialmente en el estado de Michoacán, hay regiones donde las concentraciones de ciertos contaminantes superan los límites establecidos por las normativas nacionales, lo que provoca diversos problemas de salud en la población (Toscano Reyes et al., 2019).

Además, la calidad del agua y su análisis permite también obtener información clave sobre el origen, el tiempo de circulación, los patrones de flujo y la composición geológica y mineralógica de los acuíferos, incluso los procesos hidrogeoquímicos que ocurren en ellos (Morán-Ramírez et al., 2016). Por esta razón, el estudiar la calidad en el agua ha sido objeto de especial atención, porque es fundamental contar con agua de buena calidad tanto para el uso doméstico como para el riego. Su monitoreo y evaluación son esenciales para implementar medidas preventivas que protejan la salud humana, la fauna y la vegetación.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), publicó que el acceso a agua salubre y de fácil disponibilidad es fundamental para la salud pública. Optimizar el suministro de agua, el saneamiento y la gestión de los recursos hídricos puede favorecer el desarrollo económico de las naciones e incluso desempeñar un papel clave en la reducción de la pobreza.

El acceso al agua potable es crucial para lograr un desarrollo sostenible, dado que resulta indispensable para la vida, la salud pública, el avance industrial y el desarrollo económico. (Sojobi, 2016). La falta de acceso a datos confiables sobre la calidad del agua es otro de los principales desafíos, ya que la gestión de los recursos hídricos ha sido un tema clave en la elaboración de políticas a nivel mundial (Toscano Reyes et al., 2019).

2.10 Diagnostico de la calidad de agua.

El hacer los diagnósticos y estudios sobre la calidad del agua en cualquier área persigue diversos objetivos. El principal y más relevante es salvaguardar la salud humana, sin descuidar la conservación del recurso hídrico y la protección del entorno ambiental.

La calidad del agua se refiere a la composición de una muestra, con especial énfasis en sus componentes inorgánicos, tales como cationes, aniones, gases disueltos e incluso sólidos suspendidos. Los principales constituyentes inorgánicos del agua se originan cuando el agua de precipitación disuelve gases atmosféricos como el dióxido de carbono (CO_2) y reacciona con los minerales presentes en la superficie terrestre (meteorización). La fase sólida generada en el suelo y el lixiviado resultante se desplazan como agua superficial o se infiltran, transformándose en agua subterránea. A medida que esta agua se desplaza desde su zona de recarga hasta su punto de descarga, los minerales se disuelven, algunos pueden precipitarse y se producen diversas reacciones químicas (Hounslow, 1995).

No obstante, la interpretación de los datos relacionados con la calidad del agua puede resultar compleja e incluso demandar tiempo. Cabe resaltar que, la información obtenida podría resultar inútil si no se garantiza una adecuada recopilación, conservación y análisis de las muestras. Las muestras de agua suelen ser analizadas en un laboratorio, sin embargo, hay ciertos parámetros deben ser evaluados directamente en el lugar de recolección, ya que sus valores pueden variar con el paso del tiempo y la exposición a la atmósfera. Entre los parámetros que se miden en el campo se incluyen la temperatura, el pH, la conductividad, el oxígeno disuelto, entre otros.

Para evaluar el control de calidad de las aguas, es esencial comprender sus propiedades y medir las concentraciones de contaminantes presentes. En el caso del agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en forma iónica, lo que implica que los iones positivos (cationes) y negativos (aniones) se separen. Este proceso se debe a la naturaleza polar del agua. Algunos de estos iones están siempre presentes en cantidades significativas, y su suma total representa prácticamente todos los iones disueltos en el agua. Estos iones fundamentales son los siguientes:

Tabla 1. Iones fundamentales.

Aniones	Cationes
Cloruro (Cl^-)	Sodio (Na^+)
Sulfato (SO_4^{2-})	Calcio (Ca^{2+})
Bicarbonato (CO_3H^-)	Magnesio (Mg^{2+})

Es común que los iones nitrato (NO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) y el catión potasio (K^+) se incluyan en el grupo de iones fundamentales, a pesar de que generalmente su concentración es baja.

Los iones menores, o minoritarios, son aquellas sustancias disueltas presentes en concentraciones considerablemente más bajas, representando menos del 1% del contenido iónico total. Entre los iones menores más relevantes se encuentran: nitrato

(NO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), potasio (K^+), hierro (Fe^{2+}), nitrito (NO_2^-), flúor (F^-), amonio (NH_4^+) y estroncio (Sr^{2+}). Estas sustancias suelen encontrarse en concentraciones que varían entre 0.01 y 10 ppm (Custodio & Llamas, 2001).

Tabla 2. Clasificación de agua por contenido de sólidos disueltos totales.

Tipo de agua	Sustancias disueltas
Aguas dulces	Máximo 1,000 o 2,000 ppm
Aguas salobres	Hasta 5,000 ppm
Aguas saladas	Hasta 40,000 ppm
Salmueras	Superan los 40,000 ppm hasta 300,000 ppm

2.11 Hidrogeoquímica y calidad del agua en el acuífero de Zamora.

La información presentada a continuación ha sido obtenida a partir del estudio realizado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), específicamente provienen de los libros que contienen la Disponibilidad Media Anual de Agua del acuífero, (CONAGUA, 2020a).

Con el propósito de categorizar el agua según su composición química, se determinaron los porcentajes de miliequivalentes por litro correspondientes a cada anión en relación con el total de aniones, así como a cada catión en relación con su total. A partir de este análisis, se puede categorizar el agua dentro de las siguientes familias:

Tabla 3. Composición química del agua en el acuífero de Zamora (CONAGUA, 2020).

Familia	% de muestras
Sódica bicarbonatada	61
Magnésica bicarbonatada	27
Mixta bicarbonatada	12

En la mayoría de la zona de este acuífero, el agua se clasifica dentro del grupo sódico bicarbonatado; no obstante, en los pozos situados al norte de la ciudad de Zamora se identificó una familia más de agua, que fue la cálcica-bicarbonatada. Esto es causada por la recirculación del agua y la acumulación de sales, donde la presencia de calcio es más predominante que la de sodio.

El área de estudio se ubica dentro de una provincia geotérmica, que abarca una sección del eje neovolcánico, en la cual se observan diversas manifestaciones termales, tanto en forma de manantiales como de géiseres. El origen del termalismo en esta área ha sido ampliamente investigado, y la mayoría de los estudios lo relacionan con la presencia de cámaras magmáticas poco profundas que liberan calor, elevando la temperatura del agua circundante.

En este acuífero, el agua destinada para el consumo humano, al ser comparada con los análisis químicos y las normas de calidad o límites máximos permisibles establecidos, *demuestra ser de buena calidad química y apta para el uso doméstico*, ya que cumple con los parámetros exigidos.

2.12 Hidrogeoquímica y calidad del agua en el acuífero de Cotija.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020) llevó a cabo un estudio de hidrogeoquímica y calidad del agua en el acuífero de Cotija, con el objetivo de evaluar sus características fisicoquímicas y determinar su aptitud para diversos usos. Los resultados de este análisis se presentan a continuación, proporcionando información detallada sobre la composición química del agua subterránea de este acuífero, la presencia de elementos relevantes y su cumplimiento con normativas de calidad vigentes. Este estudio permite comprender mejor la dinámica del acuífero y contribuye a la gestión sustentable de los recursos hídricos en la región.

En el estudio de (CONAGUA, 2020b) se especifica que las concentraciones más bajas de sólidos disueltos, del orden de 150 mg/L, son comunes en esta región y se deben a que las elevaciones topográficas actúan como zonas de recarga, permitiendo la infiltración de una parte del agua de lluvia hacia el subsuelo. Estas elevaciones están compuestas principalmente por derrames lávicos y depósitos piroclásticos de origen basáltico, caracterizados por su alta permeabilidad, lo que facilita el flujo del agua a gran velocidad. Debido a la elevada resistencia de los materiales basálticos a la disolución, las concentraciones de sólidos disueltos en el agua que circula a través de ellos suelen ser bajas.

Las menores concentraciones de sólidos totales disueltos en el agua, con valores por debajo de 200 mg/L, se localizan en la zona al pie del cerro Magdalena, al noreste del poblado de Tingüindín, así como en las áreas cercanas a los cerros Los Cuates y La Chuparrosa, ubicados en la parte noroccidental de la región.

Al norte de Cotija de la Paz, se registraron concentraciones de sales ligeramente inferiores a 200 mg/L, lo que indica que esta zona está próxima al área de recarga de las aguas subterráneas.

En las elevaciones topográficas situadas al este de Cotija de la Paz, se llevaron a cabo los muestreos y análisis de diversos aprovechamientos, los cuales presentan concentraciones salinas que oscilan entre 167 y 425 mg/L. Las concentraciones más bajas corresponden a agua de lluvia recientemente infiltrada en las zonas altas de recarga, mientras que el valor más elevado, de 425 mg/L, se registra en los materiales clásticos que conforman la planicie, donde el agua tiene una mayor capacidad para disolver sales y, en consecuencia, aumentar su contenido salino.

En los pozos situados entre Los Reyes de Salgado y Peribán, el agua muestra concentraciones salinas bajas, resultado de su paso por materiales volcánicos o sus derivados erosionados, los cuales carecen de sales fácilmente solubles, lo que impide un aumento significativo en la salinidad del agua subterránea. Además, se observa que las concentraciones más bajas se encuentran en las proximidades de Peribán, con un ligero incremento hacia el este. Esto sugiere que la recarga del agua ocurre en las elevaciones topográficas de la porción nororiental, desplazándose posteriormente en dirección oeste.

Se ha identificado que, en la mayoría de las zonas de aprovechamiento, el agua pertenece a la familia magnesiana-bicarbonatada, se debe a que circula por formaciones basálticas y andesíticas, junto con sus productos de erosión. Los minerales presentes en estas rocas contienen magnesio, que es disuelto y absorbido por el agua.

El bicarbonato predomina en el agua de lluvia, ya que su principal proceso químico es la absorción de dióxido de carbono. Mientras la concentración de sales disueltas no se incrementa significativamente, el bicarbonato seguirá siendo el componente dominante.

Para que el agua sea adecuada para uso doméstico, debe contener niveles bajos de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos. Los análisis realizados indican que *el agua evaluada posee una calidad adecuada para el uso doméstico*, debido a su baja concentración de elementos disueltos.

2.13 Contaminación del agua.

La contaminación del agua es una alteración, generalmente originada por actividades humanas como la agricultura, la pesca, las actividades recreativas, la industria o incluso la contaminación es provocada por la misma naturaleza, que hace que la calidad del agua se vuelva inapropiada o peligrosa para el consumo humano.

En el libro de Sawyer, 2003 menciona que existen diversos motivos por los que se contaminan los cuerpos de agua:

- **Contaminantes naturales:** Durante su ciclo natural, el agua puede interactuar con diferentes elementos presentes en las aguas, la atmósfera y la corteza terrestre. Estos elementos comprenden sustancias minerales y orgánicas, que pueden encontrarse disueltas o en suspensión, como ocurre con el arsénico. Además, puede incorporar gases provenientes de la atmósfera, como los derivados de las precipitaciones.
- **Contaminantes antropogénicos:** El origen de estos contaminantes es atribuible a las actividades humanas, siendo Materiales de desecho, ya sean líquidos o sólidos, vertidos en los cuerpos acuáticos. Ejemplos de estos incluyen sustancias derivadas

de residuos sanitarios, industriales, así como el uso de plaguicidas, fertilizantes e insecticidas.

2.13.1 Contaminación del agua subterránea

La contaminación de aguas subterráneas ocurre cuando sustancias dañinas ingresan a los acuíferos, alterando su calidad y provocando que el agua no sea adecuada para el consumo humano, agrícola o industrial. Esta contaminación tiene su origen en diferentes fuentes, tanto naturales como antropogénicas.

La contaminación de las aguas subterráneas, puede originarse a partir de diversas fuentes, tanto extensas como puntuales. Entre las fuentes más amplias se encuentran la percolación de aguas provenientes de campos agrícolas debido al uso de fertilizantes y plaguicidas, mientras que las fuentes puntuales incluyen sitios de disposición de residuos. Además, varios factores como la naturaleza de la recarga, el gradiente hidráulico, el tiempo que el agua subterránea permanece en el acuífero, las relaciones entre las masas de agua y rocas bajo la superficie también influyen en la calidad del agua subterránea (Kumar et al., 2009).

La calidad del agua subterránea es afectada tanto por procesos naturales como por actividades humanas. Su evaluación es fundamental para determinar su aptitud para sus diversos usos, por lo que establecer la composición química del agua subterránea resulta fundamental para una gestión eficiente y una protección adecuada de los recursos hídricos (Ayuba et al., 2013). Las aguas subterráneas en México son un recurso esencial para el abastecimiento, siendo utilizadas principalmente para el riego agrícola, el consumo poblacional y las actividades industriales (CONAGUA, 2019).

2.14 Clasificación de las aguas subterráneas según su origen y tiempo de contacto en el acuífero.

- **Aguas meteóricas (vadosas o recientes).**

Son las aguas que forman parte del ciclo del agua entre la hidrosfera, la litosfera y la atmósfera. Se caracterizan por tener una composición isotópica comparable a la del agua proveniente de la lluvia. Si bien la mayor parte del agua en la Tierra tiene origen meteórico, solo se clasifica como tal aquella que está activamente involucrada en el ciclo hidrológico, excluyendo la que ha sido separada accidentalmente de él. Su composición está principalmente influenciada por el agua de infiltración y por el material presente en el acuífero (Custodio & Llamas, 2001).

- **Aguas marinas.**

Son las aguas de mar que han invadido recientemente sedimentos costeros.

- **Aguas fósiles.**

Son aguas que permanecen almacenadas en el subsuelo durante miles de años. No es indispensable que permanezcan en un mismo lugar; es suficiente con que su desplazamiento sea lento y abarquen largas distancias. Por lo general, estas aguas son altamente salinas debido a su prolongado contacto con el terreno. Las aguas fósiles son generalmente una mezcla de aguas meteóricas y fósiles (Custodio & Llamas, 2001).

- **Aguas congénitas.**

Las aguas congénitas son aquellas que quedaron atrapadas durante la formación de los sedimentos. Posteriormente, esta agua es expulsada tras la consolidación del sedimento, pero si la roca resultante aún conserva porosidad, una parte del agua puede quedar retenida en ella. Estas aguas a menudo se desplazan y se retienen en diversos materiales, donde pueden integrarse en mayor o menor medida con aguas meteóricas. Las aguas congénitas y fósiles suelen tener una alta concentración de cloruros, predomina el anión Cl^- y los cationes Na^+ , Ca^{2+} o Mg^{2+} (Custodio & Llamas, 2001).

- **Aguas juveniles, metamórficas, magmáticas y volcánicas.**

Las aguas juveniles se originan en el interior terrestre sin haber pasado previamente por la superficie, y su relevancia es limitada, debido a que gran parte de ellas tienen un origen meteórico. Las aguas metamórficas se originan de sedimentos con altos niveles de dióxido de carbono (CO_2), bicarbonato (CO_3H^-) y boro (B), y menores concentraciones de cloruros en comparación con el agua de mar. Las aguas magmáticas y volcánicas se generan a partir de emisiones de lava y gases volcánicos, siendo típicamente cloruradas sódicas y con elevados contenidos de litio (Li^+), flúor (F^-), dióxido de silicio (SiO_2), boro (B), azufre (S_2^-) y dióxido de oxígeno (CO_2), pero bajos en yoduro (I^-), bromo (Br^-), calcio (Ca^{2+}) y nitrato (NH_3^-) (Custodio & Llamas, 2001). Aunque la distinción entre estos tipos de aguas puede ser difícil, su relevancia es generalmente limitada, salvo en áreas geotérmicas significativas.

- **Aguas minerales.**

Estas aguas presentan una composición química altamente diversa, pero se distinguen por contener elementos disueltos en concentraciones notables o elevadas. Su origen generalmente está vinculado a fenómenos volcánicos y orogénicos, aunque en otros casos, su formación se debe al paso del agua a través de terrenos que liberan grandes cantidades de sales solubles.

- **Aguas saladas y salmueras naturales.**

En la naturaleza, es común encontrar formaciones que contienen agua salada y salmueras. Se reconoce generalmente el origen marino de muchas de estas aguas, pero

es importante considerar que, durante su larga permanencia en el subsuelo, han experimentado procesos modificatorios que podrían haber alterado su facies original (Custodio & Llamas, 2001). Este tipo de agua puede permanecer en el lugar donde se formó o, debido a la evolución geológica, desplazarse hacia otras formaciones. La larga permanencia en el subsuelo, combinada con las altas presiones y temperaturas presentes en zonas profundas, constituye un factor significativo, aunque difícil de evaluar con los conocimientos actuales.

2.15 Características del agua.

2.15.1 Anhídrido carbónico (CO₂).

Es un gas relativamente soluble, tiene un papel muy importante en las aguas subterráneas, ya que determina el comportamiento químico de un agua frente a muchos minerales, tales como la calcita, dolomita, feldespatos, etc. (Custodio & Llamas, 2001).

El CO₂ desempeña un papel fundamental en la interacción agua-roca, ya que facilita la formación de iones bicarbonato y calcio. Este proceso es crucial en la generación de aguas subterráneas ricas en bicarbonatos y en la creación de entornos kársticos, como cuevas y sumideros.

Cuando el CO₂ atmosférico o el producido por la descomposición orgánica del suelo entra en contacto con el agua, este se disuelve y forma el ácido carbónico (H₂CO₃), este ácido es débil, pero suficiente para acidificar el agua subterránea, bajando su pH y promoviendo reacciones químicas con los minerales del subsuelo, el CO₂ controla el equilibrio entre las diferentes formas del carbono disuelto en el agua subterránea:

Tabla 4. Equilibrio entre las distintas formas de carbono disuelto en el agua subterránea.

pH	Equilibrio de carbono
pH bajo (ácido)	Predomina el ácido carbónico (H ₂ CO ₃)
pH moderado	Predomina el bicarbonato (HCO ₃ ⁻)
pH alto (básico)	Predomina el carbonato (CO ₃ ²⁻)

2.15.2 Parámetros fisicoquímicos del agua subterránea.

Estas características proporcionan una visión detallada sobre la naturaleza de las especies químicas disueltas en el agua y sus cualidades físicas, aunque no ofrecen información sobre su impacto en la vida acuática. Los parámetros clave a considerar para evaluar la calidad del agua subterránea son los siguientes:

- **Temperatura.**

Las aguas subterráneas presentan una temperatura bastante constante. Este parámetro debe ser registrado en el momento de la surgencia, antes de que se vea influenciado por la temperatura ambiente. Se mide en grados Celsius (°C) (S. R. F. J. Sánchez, 2022). La

temperatura del agua subterránea se ve afectada por el tipo de terreno que atraviesa, las propiedades de las formaciones rocosas, la profundidad a la que emerge y la posible presencia de actividad magmática. En este contexto, se considera agua termal aquella cuya temperatura de surgencia supera en más de 4°C la temperatura media anual de la zona en la que emerge (Toscano Reyes et al., 2019).

▪ Conductividad.

La conductividad eléctrica del agua corresponde a su habilidad para transmitir electricidad, la cual aumenta con la temperatura y la concentración de iones disueltos (Custodio & Llamas, 2001). La conductividad eléctrica se incrementa proporcionalmente a la salinidad y se expresa en microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Mientras que el agua destilada actúa prácticamente como un aislante, la presencia de iones disueltos favorece el aumento de su conductividad (como ya se ha mencionado), en su libro, (S. R. F. J. Sánchez, 2022) representa los rangos de valores de la conductividad como en la siguiente tabla:

Tabla 5. Rangos de valores de la conductividad según (Sánchez, 2022).

Tipo de agua	C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Pura	0,05
Destilada	0,5 – 5
Lluvia	5 – 30
Subterránea / Potable	30 – 1000
Mar	50, 000

▪ pH.

El pH es una medida de la concentración de iones de hidrogeno $[\text{H}^+]$, Se define como un parámetro que indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución acuosa. En el caso de las aguas naturales, su valor generalmente varía entre 5.5 y 8.5, mientras que en las aguas del subsuelo se encuentra en un rango de 6.5 a 8.5. Por otro lado, el agua de mar presenta un pH aproximado de 8 (S. R. F. J. Sánchez, 2022). Por lo general, el pH del agua se encuentra en un rango de 6.5 a 8, aunque en algunos casos puede oscilar entre 5.5 y 8.5, cuando el pH es inferior a 7, el agua tiende a presentar propiedades corrosivas, mientras que valores superiores a 7 pueden favorecer la formación de incrustaciones (Custodio & Llamas, 2001).

▪ Solidos Disueltos Totales.

Corresponde a la totalidad de minerales, metales y sales que se encuentran disueltos en el agua. Cuando la concentración de SDT es alta, el agua puede presentar una apariencia turbia (Toscano Reyes et al., 2019). El contenido de SDT se expresa generalmente en miligramos por litro (mg/L) o también en partes por millón (ppm), este, es un parámetro

clave en la evaluación de la calidad del agua, ya que influye en su potabilidad, su uso para riego y en procesos industriales. Un nivel elevado de SDT puede afectar el sabor del agua, su dureza y su compatibilidad con ciertos equipos y tuberías.

- **Dureza.**

Se define como la cantidad de sales disueltas de cationes metálicos multivalentes, principalmente calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). Su concentración suele expresarse en miligramos por litro (mg/L) de carbonato de calcio (CaCO_3) (Custodio & Llamas, 2001).

La dureza total es igual al contenido total en $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. La dureza puede ser temporal, esta se debe a la presencia de bicarbonatos de calcio y magnesio, y puede eliminarse mediante ebullición, o, puede ser también dureza permanente esta es provocada por sulfatos y cloruros de calcio y magnesio, no se elimina con la ebullición y requiere tratamientos químicos. La clasificación del agua según su dureza se basa en la concentración de carbonato de calcio (CaCO_3).

Se considera "*blanda*" si contiene menos de 50 mg/L, "*ligeramente dura*" cuando alcanza hasta 100 mg/L, "*moderadamente dura*" si presenta hasta 200 mg/L y "*muy dura*" cuando supera este último valor. Las aguas con alta dureza (aguas duras) tienden a formar incrustaciones, mientras que las de baja dureza (aguas blandas) pueden resultar corrosivas y no siempre son aptas para el consumo humano.

Tabla 6. Límites máximos permisibles por la NOM-127-SSA1-1994

Componentes	Límite Permissible (mg/L)
Dureza	500.00
SDT	1000.00
pH	6.5 – 8.5

2.16 Composición química del agua subterránea.

En las aguas subterráneas naturales, la mayoría de las sustancias presentes existen en forma iónica (iones mayoritarios y minoritarios). Estos iones son fundamentales para comprender la mayoría de los aspectos químicos e hidrogeoquímicos del agua.

2.16.1 Iones mayoritarios.

La medición de la presencia y proporción de iones mayoritarios en el agua constituye un elemento fundamental para determinar su procedencia, así como para evaluar la composición química del agua, repercusión de la interacción agua roca.

Los iones mayoritarios son:

Tabla 7. Iones mayoritarios.

Cationes	Aniones
Sodio (Na^+)	Cloruros (Cl^-)
Potasio (K^+)	Sulfatos (SO_4^{2-})
Calcio (Ca^{2+})	Bicarbonatos (HCO_3^-)
Magnesio (Mg^{2+})	Carbonatos (CO_3^{2-})

▪ **Sodio (Na^+).**

El ion Na^+ generalmente se asocia con el ion Cl^- . Las aguas naturales que presentan altos niveles de Na^+ suelen mostrar también concentraciones elevadas de F^- . Este ion tiene una solubilidad considerablemente alta y es difícil de precipitar. Las concentraciones de Na^+ en el agua suelen variar entre 1 y 150 mg/L, aunque no es infrecuente encontrar niveles superiores (Custodio & Llamas, 2001). Las concentraciones elevadas de sodio en el agua afectan negativamente a la vegetación, ya que disminuyen la permeabilidad del suelo. Su impacto es nocivo cuando las concentraciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} son bajas. El sodio es altamente soluble y constituye el catión más prevalente en el agua de mar.

▪ **Potasio (K^+).**

En las aguas naturales, aunque existe una mayor cantidad de K^+ , el potasio (K^+) se encuentra en concentraciones mucho menores que el sodio (Na^+). El potasio es un ion con alta solubilidad y es difícil de precipitar, generalmente, se encuentra en concentraciones que oscilan entre 0.1 y 10 mg/L en aguas dulces, sin presentar efectos tóxicos a las concentraciones típicas (Custodio & Llamas, 2001). El potasio se procede principalmente de la descomposición de minerales como la ortosa y otros silicatos, como las micas y arcillas. En algunos casos, su presencia en el agua se debe a la contaminación causada por actividades industriales, mineras y agrícolas.

▪ **Calcio (Ca^{2+}).**

El calcio es un ion que se precipita fácilmente como carbonato de calcio (CaCO_3). Sus sales varían entre moderadamente solubles y muy solubles. En aguas superficiales y subterráneas, la química del calcio está asociada principalmente con el bicarbonato y el carbonato, debido a la disolución de minerales como la calcita (CaCO_3) o la dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Este ion se encuentra en concentraciones que oscilan entre 10 y 25 mg/L en aguas dulces, aunque en aguas selenitosas puede alcanzar hasta 600 mg/L (Custodio & Llamas, 2001). Las aguas selenitosas se refieren a aguas que contienen una concentración significativa de selenio (Se), el selenio puede estar presente de manera natural en algunas formaciones geológicas o puede ingresar al agua por actividades humanas como la minería o la aplicación de pesticidas.

Las concentraciones de Ca^{2+} en aguas varían ya que se asocian al nivel de mineralización, las aguas subterráneas presentan más altos contenidos de calcio que las superficiales (Toscano Reyes et al., 2019).

- **Magnesio (Mg^{2+}).**

Este ion comparte características similares con el calcio (Ca^{2+}), ya que el magnesio también puede formar compuestos con carbonatos y bicarbonatos. Sin embargo, el magnesio es un ion más soluble y presenta mayor dificultad para precipitarse. Las concentraciones de magnesio en aguas dulces pueden variar entre 1 y 100 mg/L (Custodio & Llamas, 2001) también es importante recalcar que el magnesio en conjunto con el calcio contribuye a la dureza permanente del agua.

El magnesio proviene de la disolución de dolomías y calizas dolomíticas. Localmente, también puede originarse del lavado de rocas evaporitas. Aunque su disolución es más lenta que la del calcio (Ca^{2+}), el magnesio es más soluble y tiende a permanecer en solución cuando el calcio se precipita.

- **Cloruro (Cl^-).**

El cloruro, especialmente en aguas de alta salinidad, es altamente estable en disolución y tiene una baja tendencia a precipitarse. Generalmente, se trata de sales muy solubles. Su concentración en aguas dulces oscila entre 10 y 250 mg/L. Los niveles elevados de este ion pueden resultar perjudiciales para muchas plantas y conferir corrosividad al agua. Cuando su concentración supera los 300 mg/L, el agua adquiere un sabor salado, pero no presenta riesgos para la salud; por el contrario, el cloruro es esencial para la vida.

Este ion es el más prevalente en el agua de mar, aunque en aguas continentales puede ser uno de los menos significativos entre los elementos fundamentales. Rara vez alcanza niveles de saturación y es sumamente resistente a ser modificado mediante intercambio iónico u otros procesos similares (Custodio & Llamas, 2001).

- **Sulfato (SO_4^{2-}).**

Los sulfatos son sales que varían de moderadamente solubles a altamente solubles, con excepción de los sulfatos de estroncio (Sr) y bario (Ba), cuyos límites de solubilidad son de 60 mg/L y 20 mg/L, respectivamente. Este ion es difícil de precipitar, y en aguas dulces, sus concentraciones oscilan entre 2 y 150 mg/L, pudiendo alcanzar hasta 5,000 mg/L en aguas salinas (Custodio & Llamas, 2001). El agua con alto contenido de sulfato se denomina agua selenitosa, la cual tiene un sabor amargo y desagradable. En concentraciones elevadas, este ion puede ser perjudicial para las plantas. Los sulfatos se encuentran de manera natural, se encuentran en diversos minerales y su concentración en aguas naturales varía, contribuyendo a la dureza no carbonatada.

- **Bicarbonato (CO_3H^-) y Carbonato (CO_3^{2-}).**

Estos iones son responsables de la alcalinidad en el agua, no sufren procesos de oxidación ni reducción en condiciones naturales y se precipitan fácilmente como carbonato de calcio (CaCO_3). Existe una estrecha relación entre estos iones, el dióxido de carbono gaseoso (CO_2), el dióxido de carbono disuelto (CO_2) y el pH. El bicarbonato generalmente se encuentra en concentraciones que oscilan entre 50 y 350 mg/L en aguas dulces, pudiendo alcanzar hasta 800 mg/L en algunos casos. En contraste, el carbonato está presente en concentraciones considerablemente menores que el bicarbonato (CO_3H^-), y en aguas alcalinas con un pH superior a 8.3, se pueden encontrar niveles significativos, llegando hasta 50 mg/L. Tanto los iones (CO_3H^-) como (CO_3^{2-}) no presentan efectos tóxicos (Custodio & Llamas, 2001).

Tabla 8. Límites máximos permisibles de iones mayoritarios por la NOM-127-SSA1-1994.

Componentes Mayores	Limite Permisible (mg/L)
Cloruros (Cl^-)	250.00
Sodio (Na^+)	200.00
Sulfatos (SO_4^{2-})	400.00

2.16.2 Iones minoritarios.

Los demás iones y sustancias disueltas suelen encontrarse en concentraciones considerablemente más bajas y se denominan iones minoritarios. Por lo general, constituyen menos del 1% del contenido iónico total, siendo los más relevantes los siguientes:

Tabla 9. Iones minoritarios.

Aniones	Cationes
Fluoruros (F^-)	
Sulfuro y Gas sulfhídrico (S^{2-} y SH_2)	Amonio
Fosfatos (PO_4^{3-})	y
Nitrito (NO_2^-)	Amoniaco (NH_4^+ y NH_3)
Nitrato (NO_3^-)	

- **Fluoruros (F^-).**

El fluoruro se encuentra habitualmente en aguas naturales, así como en alimentos, en el suelo y en diversos minerales como la fluorita y la fluorapatita. (Osicka et al., 2000), se encuentran frecuentemente en concentraciones entre 0.1 y 1 mg/L llegando a veces hasta 10 mg/L (Custodio & Llamas, 2001). En el caso del agua subterránea, la presencia

de fluoruro se debe a la interacción del agua con rocas que contienen minerales ricos en flúor (Gómez, 2020). El flúor es reconocido como un elemento esencial para la nutrición humana, aunque su toxicidad continúa siendo un aspecto crucial a considerar. La clave está en la cantidad ingerida, ya que en dosis adecuadas puede ser beneficioso, mientras que en exceso se vuelve nocivo. Se considera que la concentración óptima para la salud es de aproximadamente 1 mg/L. En términos generales, su solubilidad en agua es limitada y ejerce una influencia leve en la alcalinidad. Es frecuente hallar áreas amplias donde las aguas subterráneas presentan concentraciones elevadas de flúor (Piñeda et al., 1998).

- **Sulfuro (S_2^-) y gas sulfhídrico (S_2H).**

El sulfuro se encuentra comúnmente en manantiales termales, y el gas sulfhídrico se presenta de manera natural, siendo una de las emisiones de los volcanes, manantiales sulfurosos, entre otros fenómenos geotérmicos (Custodio & Llamas, 2001). Se encuentran generalmente en concentraciones por debajo de 1 mg/L, aunque en medios muy reductores con reducción de sulfato (SO_4^{2-}), se puede llegar a veces hasta 100 mg/L. Los sulfatos pueden originarse de forma natural o como resultado de vertidos industriales y el uso de fertilizantes agrícolas. Cuando se encuentran de manera natural, su origen puede ser atribuido a depósitos minerales naturales o a la deposición atmosférica (Castro et al., 2009).

- **Fosfatos (PO_4^{-3}).**

Aunque este compuesto contiene sales solubles, la mayoría de ellas lo son en baja medida, y generalmente se precipita como fosfato de calcio $(PO_4)_2Ca_3$. Se hidroliza con facilidad, lo que contribuye a la alcalinidad del agua. Además, es relevante destacar que la presencia de calcio limita su concentración, mientras que el dióxido de carbono disuelto favorece su formación (Custodio & Llamas, 2001). Por lo general, el fosfato se encuentra en concentraciones que oscilan entre 0.1 y 1 mg/L, pudiendo alcanzar hasta 10 mg/L y excepcionalmente a 50 mg/L. Este ion es esencial para los organismos vivos, se obtiene a través de diversos procesos y, en concentraciones habituales, no causa inconvenientes.

- **Nitritos (NO_2^-).**

Es un compuesto químicamente inestable o de baja estabilidad, y su presencia en el agua generalmente indica contaminación fecal reciente. Los nitritos representan una fase intermedia en el ciclo del nitrógeno y suelen encontrarse en bajas concentraciones en aguas subterráneas debido a su inestabilidad. En presencia de oxígeno, se oxidan rápidamente a nitratos (NO_3^-). Por esta razón, su presencia es más común en aguas con bajo contenido de oxígeno o en ambientes con condiciones reductoras (Gómez, 2020).

- **Nitratos (NO_3^-)**

Se trata de sales altamente solubles que tienden a mantenerse estables. Sin embargo, en ambientes reductores pueden transformarse en nitrógeno (N_2) o amonio (NH_4^+), y en casos excepcionales, en nitrito (NO_2^-). El suelo tiene la capacidad de retener nitratos (NO_3^-), especialmente en suelos con alto contenido de materia orgánica. En las aguas dulces, la concentración de nitratos (NO_3^-) suele oscilar entre 0.1 y 10 mg/Lm (Custodio & Llamas, 2001). Niveles excesivamente altos de este ion en el agua potable pueden provocar cianosis en lactantes, además de contribuir a la corrosividad del agua, favoreciendo procesos de oxidación.

El nitrato (NO_3^-) se origina a partir de procesos naturales de nitrificación llevados a cabo por bacterias nitrificantes, así como de la descomposición de materia orgánica y fuentes de contaminación de origen urbano, industrial o ganadero. También puede provenir del uso de fertilizantes agrícolas y, en algunos casos específicos, del desarrollo de pozos mediante el uso de explosivos (Correa González et al., 2015). Aunque su origen no siempre es evidente, el nitrato es un compuesto relativamente estable, aunque en ciertas condiciones puede ser fijado por el suelo o reducido a nitrógeno molecular (N_2) o amonio (NH_4^+).

El nitrato suele utilizarse como un indicador de contaminación, ya que tiende a distribuirse de manera estratificada, predominando en la parte superior de los acuíferos libres. Se considera que su concentración es baja cuando es inferior a 10 mg/L, sin embargo, en aguas subterráneas no contaminadas, es poco común que sus niveles superen unos pocos mg/L.

- **Amonio (NH_4^+) y Amoniaco (NH_3)**

Estos iones experimentan transformaciones con facilidad, convirtiéndose en nitrógeno gaseoso (N_2), nitritos (NO_2^-) o nitratos (NO_3^-) a través de procesos de oxidación. Asimismo, el suelo puede adsorberlos eficientemente mediante el intercambio de bases. Su concentración en el agua generalmente es inferior a 0.1 mg/L, aunque en condiciones excepcionales puede alcanzar hasta 400 mg/L (Gómez, 2020). El nitrógeno amoniacal se refiere a la cantidad de nitrógeno presente en el agua en forma de amoníaco (NH_3) e ion amonio (NH_4^+). Su presencia en aguas subterráneas y superficiales puede originarse tanto por procesos naturales como por fuentes de contaminación.

La descarga de aguas residuales y domésticas eleva la concentración de nitrógeno amoniacal en ríos, lagos y acuíferos subterráneos, lo que impacta negativamente su calidad. En condiciones naturales, la principal causa del nitrógeno amoniacal en aguas superficiales es la descomposición de la materia orgánica ambiental.

Como parte del ciclo del nitrógeno, este compuesto tiene una presencia transitoria en el agua, y su dinámica está regulada por la actividad biológica (Toscano Reyes et al., 2019).

En ambos casos, el nitrógeno amoniacal se origina a partir de la descomposición del nitrógeno orgánico. Mediante la acción de bacterias, este compuesto sufre un proceso de oxidación gradual, transformándose inicialmente en nitritos y posteriormente en nitratos. Las aguas subterráneas pueden verse impactadas por un exceso de nitrógeno amoniacal, lo que lleva a un aumento de los nitratos. Cuando las plantas no son capaces de absorber este exceso y los suelos no logran retenerlo adecuadamente, los nitratos pueden filtrarse y contaminar los acuíferos.

Otras fuentes de nitrógeno amoniacal en las aguas subterráneas provienen de los fertilizantes agrícolas, dado que tanto el amoníaco como la urea pueden infiltrarse en los acuíferos. Asimismo, la actividad ganadera contribuye, ya que los excrementos de los animales son ricos en compuestos nitrogenados (Correa González et al., 2015). Las concentraciones típicas de amoníaco de las aguas naturales, en términos de nitrógeno, son menores de 0.1 mg/L, valores más altos a este pueden señalar la presencia de contaminación.

2.16.3 Elementos traza

Los elementos trazan también conocida con la definición de metales pesados, proceden de la geosfera, y están presentes en el ambiente en concentraciones muy bajas, a pesar de su baja cantidad, desempeñan un papel crucial en procesos biológicos, geológicos y químicos. La liberación de un elemento químico desde un mineral depende en gran medida de la intensidad de los procesos de meteorización química. Estos procesos, a su vez, están fuertemente influenciados por el clima, en particular por dos factores clave: la temperatura y la cantidad de precipitaciones (Gómez, 2020).

Existe un grupo de elementos químicos llamados elementos traza, que son esenciales para los seres vivos y desempeñan funciones importantes en su metabolismo. Sin embargo, cuando su concentración en suelos, sedimentos o agua supera ciertos niveles, pueden representar un riesgo ambiental y volverse tóxicos, afectando la salud humana.

En la agricultura, el uso de pesticidas y fertilizantes introduce una cantidad significativa de metales pesados en el suelo, como cobre, cadmio, mercurio, cromo y arsénico. Además, diversas industrias, como la producción de plásticos, recubrimientos anticorrosivos, alimentos, plaguicidas, baterías y curtiembres, también contribuyen a la liberación de estos elementos al medio ambiente (Mancilla-Villa et al., 2012).

Los elementos trazan son contaminantes relevantes en las aguas subterráneas. Se trata de sustancias químicas presentes en concentraciones muy bajas, generalmente en el

rango de partes por millón (ppm). Entre estos elementos se encuentran arsénico (As), boro (B), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), flúor (F), hierro (Fe), manganeso (Mn), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn) (Toscano Reyes et al., 2019).

- **Arsénico (As).**

Uno de los elementos traza más investigados es el arsénico es un metaloide presente de manera natural en varios minerales, siendo los sulfuros los más comunes. El arsénico es un elemento que se encuentra con frecuencia en las aguas subterráneas, y su presencia está relacionada con la influencia de sistemas geotermiales o con acuíferos formados por depósitos de origen volcánico y sedimentario.

Los efectos más significativos del arsénico en la salud humana ocurren al consumir agua contaminada con este elemento. El arsénico suele ser expulsado del cuerpo a través de los riñones, el intestino y la saliva. Sin embargo, cuando se ingiere en cantidades excesivas, puede acumularse en órganos como el hígado, los riñones, los huesos, el cabello y la piel. Esta acumulación aumenta el riesgo de desarrollar cáncer en la piel, los pulmones, los riñones y la vejiga. Además, el consumo prolongado de agua contaminada con arsénico puede causar daños en la piel, como lesiones y queratosis, caracterizadas por el endurecimiento y descamación cutánea (Toscano Reyes et al., 2019).

Para que se presenten concentraciones de arsénico en el agua, se deben cumplir tres condiciones:

- **Fuente de arsénico:** Debe existir una fuente de arsénico, que generalmente proviene de fuentes geológicas, ya que muchos minerales contienen diversas formas de este elemento.
- **Movilización:** El arsénico se libera principalmente de sulfuros como la pirita, en áreas con condiciones reductoras intensas.
- **Transporte:** El movimiento del arsénico en el agua está asociado a los mecanismos de adsorción y desorción, que afectan cómo se transporta a través del medio.

Tabla 10. Límites permisibles por la NOM-127-SSA1-1994.

Parámetros	Límite Permissible (mg/L)
Fluoruros (F^-)	1.50
Nitrógeno amoniacal ($N-NH_3$)	0.50
Nitratos ($N-NO_3^-$)	11
Nitritos ($N-NO_2^-$)	0.90
Arsénico	0.025

3. Antecedentes

Proteger las aguas subterráneas y prevenir la contaminación de los mantos acuíferos es una necesidad, dado que estos constituyen parte del reducido 2.5 % de agua dulce disponible en el planeta. Además, las actividades humanas están impactando negativamente los sistemas interconectados entre acuíferos, comprometiendo su integridad y disponibilidad a largo plazo. Debido a las demandas actuales del recurso hídrico en el país, se ha requerido conocer los suministros de agua con los que se cuentan y en qué estado se encuentran. Con ello, nace la necesidad de conocer el funcionamiento de una de las fuentes de abastecimiento más importantes, el agua subterránea.

Las ciudades que dependen del agua subterránea enfrentan desafíos crecientes debido al incremento poblacional y a las transformaciones en el uso del suelo urbano, lo que compromete la sostenibilidad a largo plazo de los acuíferos al incrementar la demanda de extracción y alterar las tasas naturales de recarga. En este contexto, la gestión de acuíferos requiere la implementación de un conjunto de estrategias orientadas a mantener el equilibrio entre diversas fuentes de abastecimiento, incluyendo nuevas alternativas de recarga que complementen los recursos subterráneos y superficiales tradicionales (Mautner et al., 2020).

La utilización combinada de agua superficial y subterránea representa una estrategia eficaz para optimizar el uso del recurso hídrico y mitigar los riesgos asociados a la variabilidad del suministro de agua superficial (Paydar & Qureshi, 2012). Hasta la década de 1960, los investigadores abordaban ambos recursos de forma independiente (Singh, 2014). No obstante, fue Burt en 1964 quien introdujo por primera vez el concepto de “uso conjuntivo del agua”, planteando que las aguas superficiales y subterráneas deben considerarse componentes de un sistema hídrico integrado, en lugar de tratarse como entidades separadas.

El uso de modelos matemáticos en estudios hidrogeológicos ha permitido obtener información no disponible directamente en el área de estudio. Estos modelos se han aplicado con distintos fines, como evaluar el comportamiento hidrológico de la interacción entre aguas superficiales y subterráneas, así como analizar la presencia y dispersión de contaminantes. A continuación, se presentan diversos trabajos en los que se han integrado diferentes modelos matemáticos para dichos propósitos (Lucas Urbina et al., 2018).

La herramienta de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP, por sus siglas en inglés) fue desarrollada en 1988 por el Instituto Internacional del Agua de Estocolmo, con el propósito de apoyar la planificación integrada de los recursos hídricos. Este sistema de modelación se emplea tanto para la planificación como para el análisis de políticas y la

evaluación de soluciones bajo escenarios de largo plazo. Aunque sus capacidades de modelado de aguas superficiales son limitadas de forma independiente, Weap puede vincularse con Modflow, permitiendo así la simulación de sistemas hídricos complejos mediante un enfoque acoplado (Yates et al., 2005).

El primer modelo matemático integrado de aguas superficiales y subterráneas (SW-GW) fue desarrollado y aplicado en la llanura de riego de Miyandoab, situada en la cuenca de Urmia, al noroeste de Irán. Esta modelación se llevó a cabo mediante un acoplamiento dinámico entre los sistemas Modflow y Weap, y se basa en balances hídricos mensuales con distribución espacial que abarcan el acuífero, la zona radicular, los ríos, los canales y los embalses (Dehghanipour et al., 2019).

Un estudio realizado por (Droubi et al., 2012) se llevó a cabo un análisis conjunto de aguas superficiales y subterráneas mediante la integración dinámica de los modelos Weap y Modflow. Esta vinculación permitió que, en cada intervalo de tiempo, los resultados generados por uno de los modelos sirvieran como insumo para el otro. Weap fue utilizado para estimar la recarga al acuífero, el caudal superficial, la demanda de riego y otros componentes del balance hídrico, mientras que Modflow se encargó del cálculo de los niveles piezométricos, el almacenamiento y el flujo subterráneo. Los resultados obtenidos fueron presentados mediante gráficos, mapas y tablas para facilitar su análisis e interpretación.

En 2014, (Flores & Sanvicente, 2014) llevaron a cabo un estudio enfocado en la cuenca hidrológica del río Papayango, en el estado de Guerrero, integrando los componentes de agua superficial y subterránea. El objetivo principal de la investigación fue evaluar la disponibilidad hídrica mediante la elaboración de un balance hídrico, considerando distintos escenarios temporales y de cambio climático. Para ello, se aplicó la modelación a través del sistema Water Evaluation and Planning (Weap).

El sistema de apoyo a la toma de decisiones implementado en la llanura de Haouz-Mejjate, en Marruecos, tiene como finalidad realizar comparaciones espaciales y temporales de las demandas sectoriales de agua en relación con la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos. Dado que el sector agrícola representa aproximadamente el 80 % de la demanda total de agua, y considerando la dificultad de cuantificar directamente la extracción subterránea en algunas zonas, el estudio se desarrolló mediante la integración del modelo Weap y el modelo de aguas subterráneas Modflow, ambos complementados con el uso de un Sistema de Información Geográfica (Le Page et al., 2012).

Konya, una ciudad situada en el centro de Turquía, fue el área de estudio de una investigación cuyo objetivo principal fue evaluar la calidad actual del agua subterránea, analizar la distribución espacial de sus parámetros y elaborar mapas de calidad utilizando

herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para llevar a cabo este análisis, se recopilaron datos de 177 pozos. Los resultados obtenidos permitieron concluir que, en general, la calidad del agua subterránea en la zona es óptima según el mapa generado (Nas & Berktay, 2010).

En 2012 se realizaron estudios sobre la calidad del agua subterránea en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, la tercera ciudad más grande de México. El análisis se centró en determinar la concentración de elementos presentes en el agua, así como en establecer sus principales características hidroquímicas, con el fin de evaluar posibles riesgos para la salud pública. Los resultados indicaron que, a pesar del alto grado de industrialización en la zona, el agua subterránea es apta para el consumo humano, uso doméstico e industrial (Mora et al., 2017).

En 2006 (Herrera Carbajal et al., 2007) llevaron a cabo una investigación sobre el acuífero transfronterizo del Río San Pedro, ubicado en Sonora, México. En dicho estudio se desarrolló una modelación hidrogeológica utilizando el software Modflow, con el objetivo de establecer las bases para comprender el funcionamiento del acuífero y, a partir de ello, generar criterios adecuados para su manejo sustentable. Los resultados obtenidos indicaron que, a pesar de encontrarse sobreexplotado, el acuífero presenta un estado cercano al equilibrio, aunque con una ligera tendencia al descenso de los niveles piezométricos.

En el artículo de (Estrada-Restrepo, 2010), propuso una metodología de modelación integrada que considera tanto las aguas superficiales como las subterráneas, con el propósito de avanzar hacia una gestión conjunta y más eficiente del recurso hídrico. Esta metodología contempló la estimación de la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos, con el fin de obtener una aproximación cuantitativa de la interacción entre el río y el acuífero. Los resultados de este enfoque buscan servir como una herramienta técnica de apoyo en la toma de decisiones relacionadas con la planificación y gestión del agua.

En un estudio aplicado al Área Metropolitana de la Ciudad de México (AMCM) se empleó un enfoque de análisis multiobjetivo para evaluar distintas alternativas de gestión del acuífero, considerando una creciente presión urbana. Utilizando un modelo de aguas subterráneas con el software Modflow basado en principios físicos, se analizaron estrategias como la rehabilitación de la red de distribución, el incremento en el tratamiento e infiltración de aguas residuales y el aumento en la infiltración de aguas importadas (Mautner et al., 2020).

En el 2021, (P. C. L. García et al., 2021) hizo un estudio sobre una modelación numérica del acuífero utilizando el software Modflow. Esta modelación se basó en una caracterización previa del acuífero Ciénega Prieta - Moroleón e incluyó la integración de

los distintos paquetes y sub paquetes del modelo. El resultado fue la obtención de niveles estáticos simulados, los cuales fueron posteriormente comparados con los niveles estáticos medidos directamente en campo, con el fin de evaluar la precisión y validez del modelo.

En 2010, se llevó a cabo un estudio en el que modeló y simuló el sistema acuífero de Zamora, ubicado en la cuenca del río Duero, al noroeste del estado de Michoacán. El autor destacó la importancia hidrogeológica del sitio debido a sus características geomorfológicas y geológicas, así como su relevancia económica por ser una de las principales zonas productoras de alimentos agrícolas y pecuarios del estado (Armas Vargas et al., 2010).

En 1977, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) encargó a la empresa consultora Servicios Geológicos la realización del estudio titulado “Estudio geohidrológico de evaluación y censo del estado de Michoacán”. Esta investigación tuvo como objetivo principal estimar el volumen de recarga del acuífero, identificar los mecanismos de recarga y descarga, analizar las condiciones de explotación y evaluar la interrelación entre las aguas subterráneas y superficiales en la entidad.

El 29 de junio de 2017, la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas publicó un estudio sobre la valoración del agua de riego agrícola en el valle de Zamora, Michoacán. En dicho trabajo se concluyó que tanto la cantidad como la calidad del agua de riego disponible en la región reflejan su relevancia económica, ya que este recurso representa aproximadamente el 83 % del ingreso neto de los productores. Asimismo, se subraya que, aunque el acceso al agua es un derecho humano fundamental, ello no implica su gratuidad; por el contrario, debe garantizarse un nivel mínimo de provisión, a partir del cual los usuarios están obligados a utilizarla de manera responsable (Flores Lázaro et al., 2017).

En 2011 se llevó a cabo un estudio sobre el origen y la calidad del agua en la cuenca oriental de México, en el cual se analizó el impacto del incremento en la extracción de aguas subterráneas debido a la expansión de nuevas áreas agrícolas. Se identificó que dicha extracción estaba condicionada por las características y propiedades del suelo, así como por la calidad del agua disponible en la región. Los resultados del estudio indicaron que las aguas subterráneas del estrato superior presentan una alta concentración iónica, la cual está influenciada por la composición de los materiales de origen volcánico con los que el agua mantiene contacto. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender la interacción entre la geología del área y la calidad del agua subterránea, especialmente en regiones donde la actividad agrícola depende directamente de este recurso (Álvaro Can-Chulim et al., 2011).

La evaluación de la química de las aguas subterráneas es fundamental para comprender su evolución y determinar los procesos que controlan su composición, y en Eubea, Grecia es una prioridad. En este contexto, el estudio realizado en 2015, analizó la influencia de distintos factores en la calidad del agua subterránea. Los resultados obtenidos demostraron que la aplicación de fertilizantes químicos modifica significativamente la composición química del agua, lo que resalta la importancia de monitorear y gestionar el uso de estos insumos en actividades agrícolas para mitigar su impacto en los recursos hídricos (Voutsis et al., 2015).

En Nigeria, en el año 2013, se llevó a cabo un estudio para evaluar las características hidroquímicas y la calidad de las aguas subterráneas, utilizando diferentes índices con el objetivo de determinar su idoneidad para el riego. Los resultados de la investigación revelaron que las aguas subterráneas de la zona no son aptas para consumo humano ni para uso doméstico, y tampoco cumplen con los estándares de calidad necesarios para su aprovechamiento en actividades agrícolas. Se determinó que la composición química de estas aguas está influenciada principalmente por la meteorización de las rocas del basamento y por la contaminación generada por desechos domésticos (Ayuba et al., 2013).

José Alberto Sánchez realizó un estudio sobre la calidad del agua subterránea en el acuífero sur de Quintana Roo, con el propósito de identificar las zonas con mayor potencial para su uso en consumo humano. Para ello, aplicó los índices de calidad del agua, permitiendo una evaluación integral de las características hidroquímicas del acuífero (J. A. Sánchez et al., 2016).

Se realizó un estudio con el objetivo de identificar el patrón de distribución de la calidad química del agua subterránea y su vínculo con el incremento de la salinización del suelo en la región de la Ciénega de Chapala. Los resultados mostraron que la explotación recurrente de agua subterránea de mala calidad, sin programas de control adecuados, ha impactado directamente en la calidad del suelo, originando un proceso progresivo de salinidad y sodicidad, con intervalos que van desde ligeramente salinos hasta fuertemente salinos (Silva et al., 2005).

Se realizó un análisis hidrogeoquímico del agua subterránea en la cuenca del río Duero, evaluando 97 fuentes de aprovechamiento, de las cuales 20 eran manantiales y 76 pozos, durante el periodo de estiaje. En este estudio se utilizó el Índice de Calidad del Agua. Los resultados mostraron que, en términos generales, la calidad del agua subterránea es buena y está vinculada al tipo de rocas y a la geología de la cuenca (Teodoro et al., 2013).

En un estudio realizado en 2014, se abordó por primera vez el funcionamiento hidrogeológico del Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido a partir de la composición química del agua subterránea. Este parque, ubicado en el mayor macizo

montañoso calcáreo de Europa Occidental, alberga el karst de mayor altitud de toda Europa, lo que lo convierte en un área de particular interés para el análisis hidrogeológico (Lambán & Jódar, 2014).

En una investigación desarrollada en la ciudad de Zimapán, Hidalgo, México, se realizó la caracterización de las aguas subterráneas que suministran el agua al distribuidor general y al distribuidor local. Para este propósito, se escogieron 11 puntos de muestreo donde se analizaron 28 parámetros fisicoquímicos en muestras recolectadas durante un año. Los resultados indicaron que las aguas presentan características fisicoquímicas normales, clasificándose como bicarbonatadas-cálcicas y bicarbonatadas-mixtas, con bajas concentraciones de sulfatos, cloruros, sodio y potasio (Pérez et al., 2013).

La administración sostenible de los recursos hídricos en áreas costeras implica evaluar tanto el volumen como la calidad del agua subterránea. En la costa occidental de Maharashtra, India, se investigó la movilidad geoquímica de los iones presentes en el agua subterránea y su distribución espacial. Se recolectaron 65 muestras de pozos y manantiales, analizándose sus parámetros fisicoquímicos mediante métodos estándar de APHA, donde los diagramas de Gibbs sugieren que la química del agua está controlada por la interacción agua-roca y la precipitación (Gaikwad et al., 2020).

El abastecimiento de agua depende casi exclusivamente de los recursos subterráneos, lo que ha generado una intensa explotación y una consecuente degradación en la calidad del agua. En este contexto, se ha llevado a cabo un estudio para analizar los cambios hidrogeoquímicos en las aguas subterráneas, con especial énfasis en las modificaciones químicas derivadas del afloramiento de aguas mineralizadas. Estas concentraciones pueden representar un riesgo potencial para la salud de la población, lo que resalta la importancia de su monitoreo y gestión adecuada (Salcedo Sánchez et al., 2017).

4. Metodología

La metodología empleada en este estudio se presenta en los siguientes esquemas, básicamente se divide en 3 bloques: 1) Modelación superficial, b) Simulación subterránea, 3) Calidad del agua.

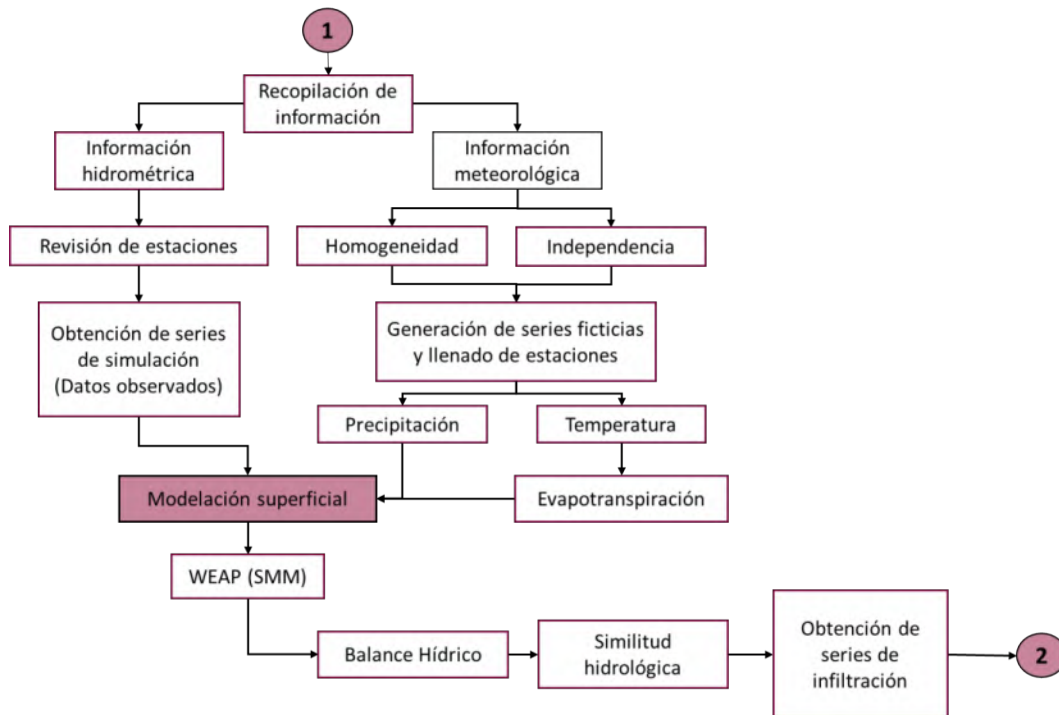


Figura 1. Esquema metodológico de la gestión de datos y la modelación superficial.

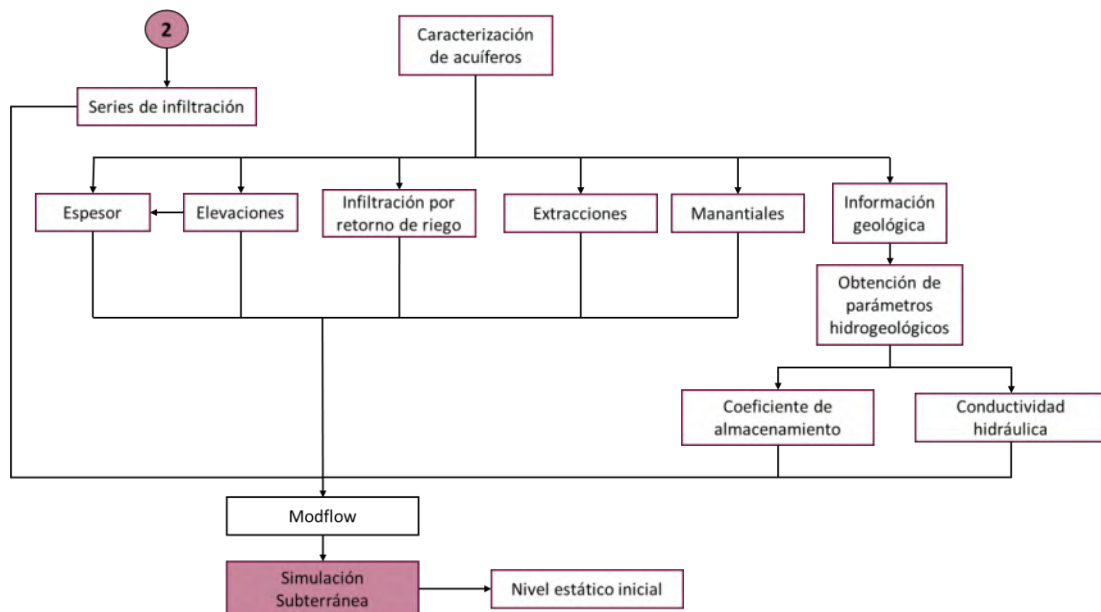


Figura 2. Esquema metodológico de la simulación subterránea.

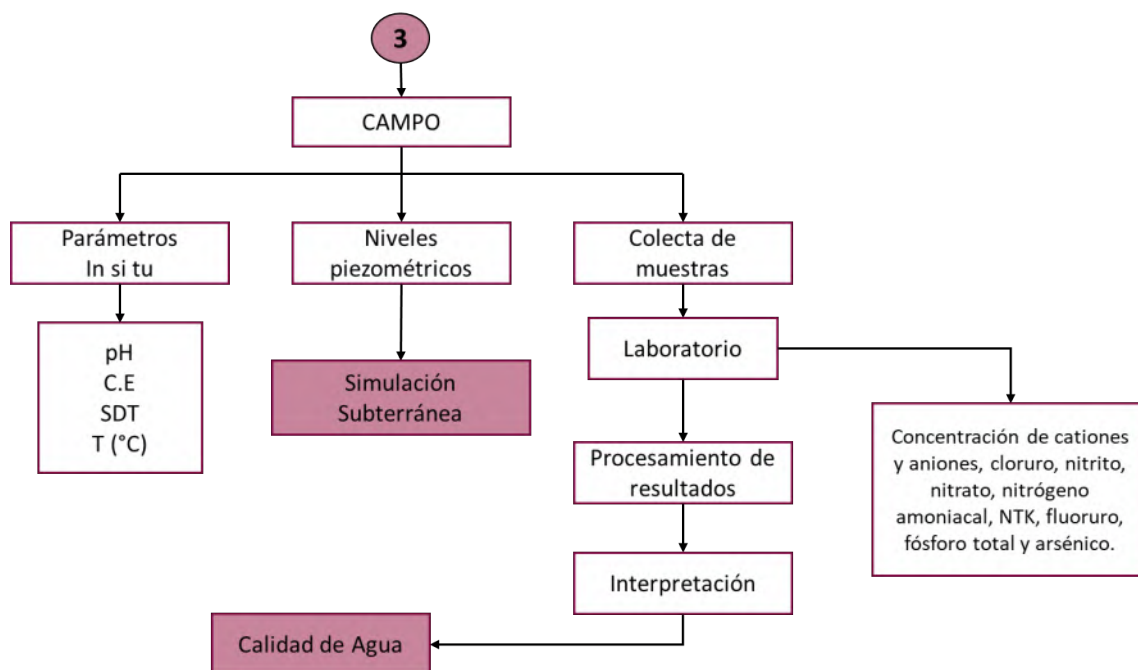


Figura 3. Esquema metodológico de la determinación de la Calidad del agua.

4.1 Recopilación de información.

La zona de estudio carece de información meteorológica, hidrométrica y geológica suficiente. Por ello, el primer paso implica realizar una búsqueda minuciosa de datos para reunir la mayor cantidad posible de información disponible.

4.1.1 INEGI.

El INEGI corresponde a un organismo público encargado de regular y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. Su función principal es recopilar y difundir datos sobre el territorio, los recursos, la población y la economía de México, con el propósito de proporcionar información detallada sobre el país y apoyar la toma de decisiones (INEGI, 2024).

En la base de datos de INEGI se encuentra una amplia variedad de información, que abarca desde la tasa de población a nivel nacional hasta los detalles sobre las actividades económicas de cada estado, municipio o localidad. Además, se incluyen distintos tipos de mapas, como los de topografía, recursos naturales y relieve continental, entre otros (García Contreras et al., 2021). Para esta investigación, se requiere descargar datos en formatos vectorial y ráster, como es el Modelo Digital de Elevación (MDE), este, se encuentra disponible en diversas resoluciones. En este caso, se ha seleccionado la resolución 1:50,000, esencial para la delineación de las cuencas hidrográficas.

Un Modelo Digital de Elevación (MDE) se describe como un modelo numérico que refleja la variación espacial de la elevación del terreno, (Navarro Farfán et al., 2019) en este contexto, el término "elevación" subraya el concepto de medición de la altura en relación con un datum, y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura. Este término se emplea con frecuencia en los Estados Unidos para describir una disposición rectangular o hexagonal de puntos, cuyos valores de elevación se obtienen mediante métodos fotogramétricos o cartográficos.

4.1.2 CONABIO.

Es la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, tiene la misión de fomentar, coordinar, respaldar y realizar actividades dirigidas a comprender la diversidad biológica, así como a promover su conservación y uso sostenible, en favor de la sociedad, se trata de una institución dedicada a generar conocimiento sobre el capital natural, actuando como enlace entre la academia, el gobierno y la sociedad. Además, impulsa que la conservación y gestión de la biodiversidad se fundamenten en acciones llevadas a cabo por las comunidades locales, reconociéndolas como actores clave en este proceso (CONABIO, 2023).

La representación de la información de la zona de estudio se realiza mediante archivos vectoriales obtenidos de esta plataforma, lo que permite identificar la cobertura y la distribución de los distintos usos del suelo. Asimismo, se incorpora información edafológica que proporciona una descripción detallada del suelo, destacando sus características morfológicas, así como sus propiedades físicas y químicas (Navarro Farfán et al., 2019). La recopilación y análisis de estos datos resultan fundamentales para llevar a cabo modelaciones superficiales y subterráneas de manera más clara y precisa.

Para determinar las características geomorfológicas de la zona de estudio, se utilizan diversos archivos que contienen información clave, como el tipo y el uso de suelo, la ubicación de cuerpos de agua, la delimitación de cuencas y subcuencas hidrológicas, así como la localización de acuíferos, regiones y subregiones hidrológicas. Estos archivos están accesibles de forma gratuita en la página web de CONABIO.

4.1.3 Información Meteorológica.

La información meteorológica (precipitación y temperatura) se obtiene de la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (SMN, 2023). Esta información hace referencia a la información y registros obtenidos a partir de la observación y medición de las condiciones atmosféricas en un determinado lugar y momento. Estos datos son recopilados mediante diversos instrumentos y sistemas de monitoreo ubicados en estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de la República Mexicana. Esta información, abarca diversas variables climáticas, entre las que se encuentran la temperatura ambiental, la humedad relativa, la presión del aire, la velocidad y dirección

del viento, así también como la cantidad y el tipo de precipitación (como lluvia o nieve), la radiación solar, entre otros parámetros atmosféricos de interés.

Las observaciones en las estaciones se realizan diariamente y reflejan los datos recolectados durante las 24 horas previas, con corte a las 08:00 AM. Cada estación del país cuenta con distintos períodos de registro de información, esta base de datos (SMN) facilita la selección preliminar de las estaciones meteorológicas que se emplearán en el estudio, además de permitir la descarga de información climática, como los registros de precipitación y temperatura. Esto posibilita el análisis y la manipulación de los datos con el fin de identificar las estaciones más adecuadas para los objetivos específicos de la investigación (Navarro Farfán et al., 2019). Del SMN se obtuvo la información de precipitación y temperatura de las diferentes estaciones meteorológicas seleccionadas.

4.1.4 Información hidrométrica.

Como lo menciona en su investigación (Navarro Farfán et al., 2019) la gestión digital de la información hidrométrica es fundamental para el adecuado manejo de los recursos hídricos en el país, así también como para la adecuada planificación y administración de los sistemas acuáticos. Estos datos hidrométricos son esenciales en la elaboración de modelos hidrológicos, la toma de decisiones sobre el uso y distribución del agua, el control de fenómenos como inundaciones y sequías, y la implementación de medidas preventivas ante desastres naturales relacionados con el agua. Por esta razón, CONAGUA, a través del IMTA, ha trabajado en la actualización del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), el cual consolida la información de la red hidrométrica nacional. Esta red recopila información acerca del nivel del agua, denominado escalas, y del volumen de flujo en un instante determinado, conocido como aforos, en los principales ríos de México (IMTA, 2017).

La información hidrométrica corresponde a los registros y mediciones que describen el comportamiento de distintos cuerpos de agua, como ríos, arroyos, lagos y embalses. Estos datos se obtienen mediante estaciones hidrométricas instaladas en puntos estratégicos a lo largo de los cursos de agua, las cuales se encargan de monitorear y registrar diversas variables hidrológicas.

BANDAS dispone de información de 2070 estaciones hidrométricas, resultante de una depuración del catálogo BANDAS elaborado en 2008 por la CONAGUA y el IMTA. De dichas estaciones, cerca de 480 fueron actualizadas en 2006 y se encuentran registradas cerca de 180 presas (IMTA, 2017).

Los datos necesarios se pueden obtener de las estaciones hidrométricas proporcionadas por BANDAS y son los siguientes (Navarro Farfán et al., 2024):

- **Valores diarios:** Gasto medio diario (m³/s)

- **Valores mensuales:** Se registran la fecha y hora del caudal máximo y mínimo (m^3/s), así como las lecturas del volumen máximo y promedio de escurrimientos (en miles de m^3).
- **Valores anuales:** Se indica el mes, día y hora en que se registran el caudal máximo y mínimo (m^3/s), junto con la lectura de escala correspondiente a estos caudales (m). Además, se incluyen el volumen anual de escurrimientos (en miles de m^3), el caudal medio anual (m^3/s) y el volumen anual de sedimentos (en miles de m^3).

4.1.5 Información subterránea.

La CONAGUA gestiona un sistema de concesiones y asignaciones de agua superficial y subterránea, basado en la Ley de Aguas Nacionales (LAN). Este proceso incluye la creación de títulos y la solicitud de su inscripción en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), con el fin de garantizar seguridad jurídica a los titulares mediante la correcta y confiable inscripción de las concesiones. Además, este sistema facilita la emisión de información estadística y permite la consulta pública (Navarro Farfán et al., 2019). También contribuye a prevenir o reducir la sobreexplotación de los acuíferos, mitigar la contaminación causada por vertidos de aguas residuales a cuerpos de agua federales, proteger las zonas federales y regular la extracción de materiales pétreos (IMTA, 2017).

La información hidrológica subterránea hace referencia a los datos y mediciones vinculados al comportamiento del agua almacenada y en movimiento dentro de acuíferos y formaciones subterráneas. Este tipo de información es esencial para entender y administrar los recursos hídricos subterráneos, los cuales representan una parte crucial del ciclo hidrológico.

A partir de la base de datos del REPDa, se obtiene información sobre el número de pozos de extracción presentes en la zona de estudio, lo que permite conocer el volumen total concesionado (en m^3) y el tipo de uso asignado a cada pozo, ya sea agrícola, acuícola, doméstico, industrial, pecuario o público urbano. Descargar esta información es fundamental para determinar la cantidad de pozos de extracción en la zona de estudio y, de esta manera, calcular el volumen de agua extraído de los acuíferos subterráneos.

4.2 Análisis y gestión de datos.

En términos generales, la modelación resulta ser un proceso complejo cuando se lleva a cabo en áreas con información limitada. Por esta razón, es crucial prestar especial atención al análisis y la validación de los datos obtenidos de las bases de datos previamente ya mencionadas (Navarro Farfán et al., 2024).

Parte importante de la metodología consiste en el análisis y la validación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas, las cuales serán sometidas a un proceso de selección para determinar su viabilidad y adecuación para su aplicación en el estudio.

Para seleccionar las estaciones meteorológicas e hidrométricas, se recopilan características espaciales tales como la longitud, latitud y elevación, así como el período de estudio, los años de operación de las estaciones y su efectividad. Además, se evalúa el porcentaje de datos faltantes en la serie, siendo recomendable que este porcentaje sea bajo, a fin de garantizar que el proceso de completar las estaciones sea sencillo y que no se vea afectada la integridad de la serie de datos analizada, también, se estableció un radio de influencia que abarca hasta un 60% adicional del radio máximo de la cuenca, con el objetivo de asegurar que las estaciones cubran completamente el área de estudio. Esta condición se verifica mediante la delimitación de los polígonos de Thiessen (Sánchez-Quispe et al., 2021).

En la selección de estaciones dentro del radio de influencia, se aplicaron criterios específicos: primero, se verificó que estuvieran activas y contaran con al menos 25 años de datos. Luego, se evaluó el porcentaje de datos faltantes, siendo aceptable un valor inferior al 20% para minimizar la incertidumbre. Además, se consideró que el periodo de estudio coincidiera con la información hidrométrica y, finalmente, se analizó la proximidad de la estación al centro de gravedad de la cuenca mediante la distancia euclidiana. Con los criterios mencionados, las estaciones se califican, la mayor calificación será a las estaciones que cumplen con el mayor número de criterios.

Tras la evaluación, se seleccionan las estaciones más adecuadas y se descartan las no aptas. Una vez seleccionadas las estaciones, se deben dibujar los polígonos de Thiessen de la cuenca, éstos deben cubrir al menos el 90% de la zona de interés. De lo contrario se deben seleccionar estaciones adicionales para cubrir el porcentaje indicado de la zona de estudio. Las series temporales se generan mediante el análisis y validación de datos diarios, que luego se agregan a escala mensual. Para este proceso, es necesario contar con al menos 21 días de registros por mes; de no cumplirse este criterio, el mes se considera nulo (vacío) por falta de información suficiente.

A partir de las series mensuales se elaboraron las series anuales, calculando inicialmente los promedios mensuales y el promedio anual. Con el fin de identificar los meses húmedos y secos, se consideró el número de meses con datos faltantes y su relevancia en el aporte total de precipitación. Estas series anuales son fundamentales para la realización de las pruebas de consistencia (Navarro Farfán et al., 2024).

4.2.1 Pruebas en las estaciones.

Se llevaron a cabo pruebas de consistencia en las series de precipitación y escurrimiento con el propósito de verificar que cumplieran con los criterios de aleatoriedad,

homogeneidad, independencia (o persistencia en el caso de las series hidrométricas) y estacionalidad (Merlos Villegas et al., 2014).

El propósito de estas pruebas es garantizar que los datos analizados sean fiables y representen adecuadamente las condiciones hidrológicas de la zona de estudio. La verificación de la aleatoriedad permite identificar la ausencia de patrones predecibles en las series de datos, mientras que evaluar la homogeneidad busca detectar posibles alteraciones en el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo. La falta de homogeneidad es frecuente en las series hidrológicas y puede deberse a intervenciones humanas o a factores naturales significativos, ya sean evolutivos o repentinos, como, por ejemplo, los desastres naturales. El análisis de la independencia, o persistencia en las series hidrométricas, tiene como finalidad determinar si los valores actuales guardan relación con los valores previos o si, por el contrario, son independientes entre sí. Este aspecto resulta crucial para la adecuada modelación de los procesos hidrológicos. Por otro lado, la evaluación de la estacionalidad busca confirmar que los datos reflejen las variaciones propias de cada estación del año, lo que facilita la identificación de patrones y tendencias vinculadas a distintos periodos anuales. En conjunto, estas pruebas de consistencia aseguran que los datos utilizados en el análisis hidrológico sean confiables y adecuados para tomar decisiones informadas en la gestión y planificación de los recursos hídricos.

En el análisis de las series de precipitación y escurrimiento, es fundamental evaluar la homogeneidad de los datos correspondientes a cada estación. Para ello, se aplican herramientas estadísticas como la prueba de Secuencias y el Test de Helmert, las cuales permiten identificar la uniformidad en el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo. Se considera que la condición de homogeneidad se cumple cuando, estadísticamente, todos los valores de la muestra proceden de una misma población. La prueba de Secuencias y el Test de Helmert son métodos empleados para identificar posibles cambios en los datos a lo largo del tiempo. La consistencia de los valores dentro de una misma población indica estabilidad en las condiciones hidrológicas de la estación, lo que garantiza una interpretación más precisa de la información.

La independencia se analiza a través de los Límites de Anderson, una herramienta que permite determinar la probabilidad de que un valor específico ocurra de manera autónoma, sin estar condicionado por la presencia de valores previos en el tiempo o en el espacio. Entonces, la independencia de los datos implica que cada valor es aleatorio y no está condicionado por los anteriores o posteriores en la serie temporal o espacial. Esta condición es fundamental para garantizar la precisión en los análisis y modelos hidrológicos, al permitir que cada dato represente una muestra única y autónoma.

Como menciona en su estudio (Navarro Farfán et al., 2019), las características de las series temporales, como la media, la desviación estándar y las correlaciones seriales, pueden alterarse cuando existen tendencias o saltos (positivos o negativos) en las series hidrológicas debido a la falta de homogeneidad e inconsistencia. Es relevante tener en cuenta que, a medida que una serie temporal se extiende, aumenta la probabilidad de que surjan inconsistencias en los datos, ya sea por intervenciones humanas, interrupciones naturales o errores sistemáticos.

- **Prueba de secuencias.**

Esta prueba consiste en examinar el signo de las desviaciones respecto a la mediana de la muestra para cada dato, y luego comparar el número de cambios permitidos (u) con el tamaño de la muestra (n). Si el número de cambios observados se encuentra dentro de los valores especificados en una tabla de referencia, las series se consideran homogéneas.

Tabla 11. Rangos de cambios permitidos para la prueba de secuencias, según el número de datos.

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5-8	22	9-14	32	13-20	50	22-30
14	5-10	24	9-16	34	14-21	60	26-36
16	6-11	26	10-17	36	15-22	70	31-41
18	7-12	28	11-18	38	16-23	80	35-47
20	8-13	30	12-19	40	16-25	100	45-57

- **Test de Helmert.**

Esta prueba es un procedimiento simple que consiste en ordenar la serie de datos en función del tiempo y analizar el signo de las desviaciones con respecto a la media aritmética de la serie. Cuando una desviación de un signo determinado es seguida por otra con el mismo signo, se interpreta que se ha formado una secuencia "S". En cambio, si se presenta el signo opuesto, se considera un cambio "C". Para determinar si la serie es homogénea, se aplica un criterio específico basado en el número total de datos (n).

$$-\sqrt{n-1} \leq s - c \leq \sqrt{n-1}$$

Ecuación 1

- **Límites de Anderson.**

Los límites de Anderson se emplean para realizar pruebas de independencia en las series de datos, lo que implica que cada valor es independiente de los demás, es decir, no existe relación ni dependencia entre ellos. Cada dato es considerado como un evento aislado, sin influencia de los valores previos o posteriores.

Cuando se aplican los límites de Anderson, se establece un nivel de confianza del 95%. La serie se considera independiente únicamente si menos del 10% de los valores de autocorrelación calculados exceden los límites superior e inferior establecidos (Ecuación 2).

Formula de los limites superior e inferior:

$$r(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96\sqrt{n-k-1}}{n-k}$$

Ecuación 2

Para una serie independiente, la población del correlograma es igual a 0 para K que es diferente a 0:

$$k = \frac{n}{3}$$

Ecuación 3

Donde:

k= Número de desfases.

n= Número de datos de precipitación anual.

Para obtener el número de desfases se tendrá que dividir el número de datos de precipitación anual entre 3.

En el estudio de (Navarro Farfán et al., 2019), explica que para calcular el correlograma (ρ), es necesario generar una serie modificada (Y) a partir de la serie original (X), teniendo en cuenta el desfase (k) que se aplica. De esta manera, para cada valor de k, se obtiene una serie X y su correspondiente serie Y. De acuerdo con la cantidad de desfases aplicados, se obtendrá el número de valores en el correlograma (ρ), los cuales se representan en las ecuaciones [4] y [6]. En estas ecuaciones, σ_x y σ_y corresponden a las desviaciones estándar de las series X y Y, respectivamente, mientras que n denota el número de datos en la serie.

$$\rho = \beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$$

Ecuación 4

Donde:

ρ = Correlograma.

σ_x/σ_y = Desviación de x, y [Ecuación 5].

β = [Ecuación 6].

$$\sigma_{x,y} = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 5

Donde:

$\sigma_{x,y}$ = Desviación de x, y.

x= Serie de datos [x] que depende del desfase [k].

n= Numero de datos de precipitación anual.

En el caso de la serie X, se deben eliminar los datos correspondientes al final de la serie de precipitación anual, de acuerdo con el desfase en el que se esté trabajando. De manera similar, para la serie Y, se procederá a eliminar los valores ubicados al inicio de la serie de precipitación anual, en función del desfase aplicado.

$$\beta = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}$$

Ecuación 6

Para calcular el valor de β , es necesario conocer las sumatorias de las series (X) y (Y) correspondientes a cada desfase, tal como se mencionó previamente. El valor de β depende del número de datos n , el cual variará en función del desfase k .

4.3 Polígonos de Thiessen.

Los polígonos de Thiessen se forman uniendo las estaciones y creando una línea perpendicular al centro recién generado; y al final deben de quedar interceptados por otras estaciones, estos polígonos no presentan mayores complicaciones en su aplicación. A cada estación se le asigna un área de influencia, determinada al representar las estaciones en un plano y conectarlas mediante líneas rectas. Luego, se trazan las mediatrices de estas líneas hasta que se cruzan entre sí. Los límites del área de estudio junto con las mediatrices definen la superficie de influencia correspondiente a cada estación, entonces, estos polígonos permiten visualizar la influencia de las estaciones dentro del área de estudio. Es fundamental asegurar una distribución adecuada de las estaciones a lo largo de la cuenca, de manera que cubran completamente la zona de interés. Para garantizar una cobertura suficiente, los polígonos de Thiessen deben abarcar más del 90% del área en cuestión, considerando que estos polígonos se generan con los datos provenientes de las estaciones meteorológicas.

4.4 Generación de las series.

4.4.1 Llenado de datos faltantes.

Uno de los principales inconvenientes que enfrentan las estaciones meteorológicas es la insuficiencia de información tanto en cantidad como en calidad. Esto se debe, en gran medida, a errores humanos cometidos durante las mediciones diarias, como ya lo hemos

mencionado, lo que ocasiona que, en numerosas ocasiones, las series de datos presenten períodos incompletos que abarcan días, meses e incluso años. Para la realización de una investigación adecuada, es fundamental disponer de una serie de datos de precipitación completa, esto se logra mediante la aplicación de métodos de distribución espacial, los cuales permiten extender la información recopilada en una estación meteorológica a un área más amplia, con el propósito de estimar la precipitación en la superficie bajo estudio.

Puesto que las series de datos necesarias para alimentar los Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) incluyen precipitación, temperatura y evapotranspiración, es fundamental considerar un período temporal uniforme para todas ellas, el cual debe coincidir con el periodo de la serie de datos provenientes de las estaciones hidrométricas (Navarro Farfán et al., 2019).

Para las estaciones meteorológicas empleadas, fue necesario llevar a cabo el proceso conocido “llenado de datos”, aplicando el método Inverso de la distancia euclidiana al cuadrado (IDW) este método se fundamenta en el cálculo de una media ponderada que varía en función de la ubicación geográfica de las estaciones, considerando la distancia euclidiana entre ellas. Debido al factor cuadrático empleado en la ponderación, las estaciones más cercanas ejercen una influencia significativa en la estimación del manto pluvial. El valor de la precipitación obtenido depende tanto de la correlación entre las estaciones analizadas como de la diferencia en la precipitación media anual.

Adicionalmente, se descargaron las series de temperatura, las cuales se utilizaron para calcular la evapotranspiración mediante el método de Thornthwaite. Este cálculo será fundamental para la calibración del Modelo de Superficial por (SMM) a través del parámetro Kc (coeficiente de cultivo). La distancia euclidiana considera la diferencia entre longitud, latitud y elevación.

$$do_1 = \sqrt{(X_0 - X_i)^2 + (Y_0 - Y_i)^2 + (Z_0 - Z_i)^2}$$

Ecuación 7

Donde:

do1=Distancia euclidiana.

X0, Y0, Z0= Coordenadas geográficas en UTM con un dato faltante (o) y un dato existente (i).

La fórmula para obtener el valor faltante es:

$$P_x = \frac{P_1 \frac{1}{d_o^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_{oi}^2}} + \frac{P_2 \frac{1}{d_o^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_{oi}^2}} + \dots \frac{P_m \frac{1}{d_o^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{d_{oi}^2}} +$$

Ecuación 8

Donde:

Px= Precipitación en el mes (x faltante).

Pm= Precipitación media anual.

Como se mencionó ya anteriormente el método (IDW) es el que mejor da resultado y por ende el método más utilizado.

4.4.2 Llenado de estaciones de temperatura.

En el caso de las series de temperatura, es fundamental considerar la cantidad de años empleados en la modelación superficial, dado que estos datos constituyen la base para el cálculo de la evapotranspiración y representan una entrada esencial para las modelaciones.

Se parte del supuesto de que las series de temperatura presentan una periodicidad anual, la cual puede corregirse mediante el llenado con datos provenientes de estaciones cercanas a las de estudio. En este sentido, se elige un método de llenado que no solo conserve dicha periodicidad, sino que también mantenga un valor medio representativo. El propósito es preservar la coherencia anual de las series de temperatura al completar los registros utilizando información de estaciones próximas (Navarro Farfán et al., 2019).

El llenado de estaciones de temperatura se lleva a cabo mediante el método de la media aritmética, el cual consiste en calcular el promedio de los valores de temperatura registrados en estaciones situadas dentro de una determinada área geográfica o, en su defecto, utilizar el valor medio mensual de la estación en estudio (Pizarro et al., 2003).

4.4.3 Obtención de series de evapotranspiración.

La estimación precisa de la evapotranspiración es un proceso complejo que requiere el monitoreo constante de diversos parámetros físicos, meteorológicos y relacionados con la cobertura vegetal. En México, el método de Thornthwaite es el empleado principalmente para el cálculo del uso consuntivo. Este método considera únicamente la temperatura media mensual y proporciona resultados aproximados, adecuados para estudios preliminares o de alcance general (Aparicio, 1992).

La evaporación y la transpiración son procesos que se desarrollan de manera simultánea y no pueden ser fácilmente diferenciados. Por esta razón, el flujo de vapor de agua

proveniente de una cubierta vegetal se denomina, de manera general, evapotranspiración, término que integra ambos fenómenos (Navarro Farfán et al., 2019).

▪ Método de Thornthwaite.

Este método, desarrollado en 1944, determina el uso consuntivo mensual basándose en las temperaturas promedio anuales mediante la siguiente ecuación:

$$U_j = 1.6K_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Ecuación 9

Donde:

ETP= Evapotranspiración en el mes, en cm.

T= Temperatura media en el mes, en °C.

Ka= Constante que depende de la latitud y el mes del año.

a, I= Constantes.

Las constantes de la Ecuación 9 (a, I), correspondientes al índice de eficiencia de la temperatura, se determinan de la siguiente forma:

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 179 \times 10^{-4} I + 0.492$$

Ecuación 10

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j$$

Ecuación 11

Donde:

j= Representa el número de mes, i está dada por la siguiente ecuación:

$$I_j = \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1.514}$$

Ecuación 12

▪ Método de Penman-Monteith.

En 1948, Penman formuló una ecuación para calcular la evaporación de una superficie de agua expuesta, que combina el balance energético con el método de transferencia de masa. Para ello, empleó datos climáticos estándar, tales como las horas de sol, la temperatura, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Con el tiempo, varios investigadores ampliaron este enfoque, conocido como método "combinado",

adaptándolo a superficies cultivadas mediante la incorporación de factores de resistencia. La ecuación de Penman, junto con sus variantes, es ampliamente aplicada en campos como la hidrología, la agricultura y los estudios de recursos hídricos, constituyendo una herramienta fundamental para comprender y cuantificar el ciclo hidrológico en diversos entornos y regiones.

Los parámetros relacionados con la resistencia superficial suelen integrarse en un único valor, conocido como resistencia superficial total, el cual se combina en serie con la resistencia aerodinámica. La resistencia superficial (r_s) indica la dificultad que presenta el vapor para pasar a través de las estomas, la superficie total de las hojas y la superficie del suelo. En contraste, la resistencia aerodinámica (r_a) se refiere a la resistencia que ofrece el aire en la capa justo encima de la vegetación, teniendo en cuenta la fricción que sufre al moverse sobre superficies vegetales (Navarro Farfán et al., 2024).

La ecuación siguiente, combinada de Penman-Monteith:

$$\lambda ET = \frac{\Delta (R_n - G) + P_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + r \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

Ecuación 13

Donde:

R_n = Radiación neta.

G = Flujo del calor en el suelo.

$(e_s - e_a)$ = Representa el déficit de presión de vapor del aire.

p_a = Densidad media del aire a presión constante.

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación.

λ = Constante psicrométrica.

r_s y r_a = Resistencias superficiales.

De acuerdo con lo previamente expuesto, el enfoque de Penman-Monteith incorpora todos los parámetros que regulan el intercambio de energía y el flujo de calor asociado a la evapotranspiración en extensas áreas de vegetación uniforme. La mayoría de estos parámetros pueden medirse directamente o calcularse a partir de datos meteorológicos.

4.5 Estaciones hidrométricas.

Asimismo, es necesario realizar la selección y validación de las estaciones hidrométricas.

Para las estaciones hidrométricas, se delimita un área de influencia alrededor de la zona de estudio con el fin de identificar aquellas estaciones que pueden ser utilizadas en las modelaciones. En este contexto, es fundamental que las cuencas se mantengan en régimen natural para garantizar la adecuada realización de las modelaciones.

La descarga de información hidrométrica se realiza de forma mensual, cuidando la continuidad de las series y el proceso de análisis de estaciones hidrométricas se lleva a cabo en cuatro etapas. En primer lugar, se procede a la descarga de la información y a la validación de la serie de datos. Posteriormente, se analiza la tendencia de la serie mediante representaciones gráficas. En la siguiente etapa, se evalúa la consistencia de los datos, y finalmente, se determinan los parámetros característicos de la cuenca.

La estimación de los datos faltantes en las estaciones hidrométricas requiere la aplicación de métodos complejos, no siendo viable emplear procedimientos simples, por ello, la serie se debe ordenar y seleccionar la serie más larga obteniendo la serie mensual, completa y consecutiva.

Una vez que la zona de estudio esta seleccionada, se genera un buffer que nos permite identificar y delimitar el área que afecta y aporta información a las estaciones hidrométricas que van a ser seleccionadas, esto quiere decir que se requiere que las estaciones hidrométricas que se van a descargar y analizar, se encuentren dentro de la zona de estudio. Este proceso garantiza que los datos empleados en el modelo reflejen de manera representativa las condiciones hidrológicas de la región de interés.

4.5.1 Estaciones a régimen natural.

Las series hidrométricas en régimen natural corresponden al registro histórico de los caudales que habrían tenido lugar en un sitio específico en ausencia de intervención humana en la cuenca. Dichas series reflejan, en esencia, el flujo de agua que habría circulado de manera natural, sin la influencia de actividades antrópicas (Solera & Andréu, 2004), entonces, la condición de que las cuencas se mantengan en régimen natural es fundamental, pues indica que no han experimentado intervenciones significativas como embalses o desvíos de agua, ya que esto asegura que los datos hidrométricos representen de manera precisa el comportamiento natural del flujo de agua en la cuenca, lo que los hace más confiables para su uso en la modelación.

Las acciones antropogénicas comprenden todas las intervenciones humanas que inciden en el caudal natural de un río. Estas incluyen actividades de regulación o explotación del agua, tanto superficial como subterránea. Dichas intervenciones tienen el potencial de modificar la cantidad de agua que fluye por el río, lo que puede afectar de manera significativa las series hidrométricas.

En México, no se dispone de la información suficiente para llevar a cabo una restitución al régimen natural. Por esta razón, se propone trabajar con estaciones hidrométricas no alteradas, con las cuales se definen cuencas altas o de cabecera. Estas cuencas corresponden a áreas cercanas a la divisoria de aguas o parteaguas, ubicadas en la zona de mayor altitud de la cuenca. En esta área se generan los primeros escurrimientos,

después de que el suelo haya retenido o absorbido el agua conforme a su capacidad (Ríos et al., 2013).

Al trabajar con series hidrométricas exentas de acciones antropogénicas, es fundamental verificar que no existan obras significativas en la cuenca, además de analizar el comportamiento de la propia serie hidrométrica.

4.6 Modelación superficial.

- **Modelos precipitación – escorrentía (MPE).**

Los MPE, también denominados modelos de balance de agua, son modelos determinísticos que permiten realizar una evaluación cuantitativa de los recursos hídricos disponibles en una cuenca, basándose en un valor específico de precipitación, fundamentados en la ecuación de continuidad, el balance hídrico en una cuenca determina los valores relativos de los flujos de entrada y salida, así como los cambios en el volumen de agua almacenada en cada área o cuerpo de agua (L. García et al., 2020).

Estos modelos pueden ser aplicados de manera agregada, semi-distribuida o distribuida, según el nivel de discretización de la cuenca, el tipo de información disponible y la estructura de los resultados esperados.

Para simular el proceso de precipitación-escorrimento durante un período específico, es necesario disponer de ciertos elementos del ciclo hidrológico. Estos modelos hidrológicos generan resultados de escorrentía de una cuenca, los cuales pueden expresarse en términos mensuales o anuales. Estos resultados se comparan con los volúmenes de agua registrados en una estación hidrométrica, utilizando el mismo intervalo de tiempo para la comparación.

En este caso se utiliza el software Weap (*Water Evaluation and Planning System*), iniciativa del Stockholm Environment Institute, este software contiene el modelo SMM (*Soil Moisture Method*) para el cálculo de la aportación a partir del proceso lluvia escurrimiento.

4.6.1 Weap.

Weap es una herramienta de modelado creada para la planificación y gestión de la distribución del agua, apta para su uso en diferentes escalas, desde pequeñas áreas de captación hasta extensas cuencas hidrográficas. Este sistema incluye un modelo hidrológico y diversos módulos que permiten integrar el modelo con las aguas subterráneas mediante Modflow. Está destinada a diversos usuarios, incluyendo desde los encargados de la planificación hidrológica hasta los funcionarios públicos responsables de la gestión del recurso hídrico, así como las comunidades locales (SEI, 2009). A diferencia de otros modelos tradicionales relacionados con los recursos hídricos, que se basan en la modelación hidrológica externa, este modelo se caracteriza por ser

forzado por variables climáticas. Además, al igual que los modelos de gestión de recursos hídricos, incluye rutinas diseñadas para distribuir el agua entre diversos tipos de usuarios, considerando tanto las necesidades humanas como las ecosistémicas.

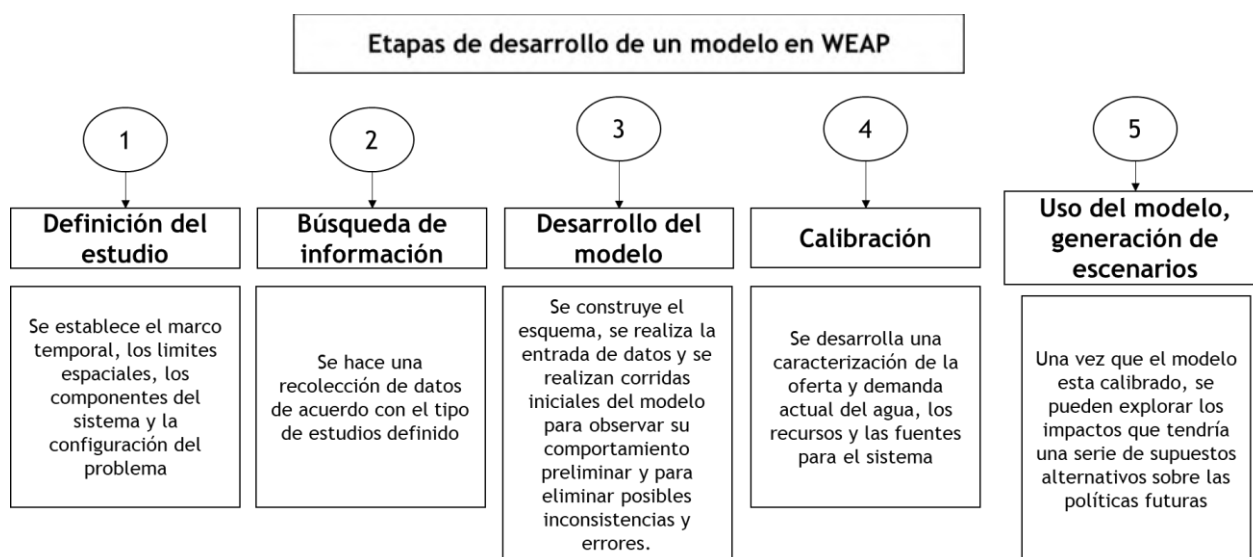


Figura 4. Etapas para el desarrollo de un modelo en WEAP.

4.6.2 Soil Moisture Method (SMM).

El Método de Humedad del Suelo, es el único modelo empleado en el software Weap, una herramienta de modelación orientada a la planificación y gestión de la distribución del agua. Este software puede aplicarse a diversas escalas, incluyendo desde áreas de captación reducidas hasta cuencas de gran extensión (SEI, 2009), este modelo hidrológico presenta una estructura espacialmente continua, en la que el área de estudio se configura como un conjunto de subcuencas continuas que abarcan la totalidad de la cuenca analizada. Además, se emplea un conjunto homogéneo de datos climáticos, que incluye variables como precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento.

el SMM es el método que se considera más complejo, debido a que este enfoque representa la cuenca mediante un modelo compuesto por dos reservorios de suelo (dos tanques). En la capa superior del suelo, el modelo simula procesos como la evapotranspiración, teniendo en cuenta y considerando tanto las precipitaciones como también el riego en áreas agrícolas y no agrícolas. Asimismo, evalúa la escorrentía, el flujo subsuperficial y las variaciones en la humedad del suelo.

- Ecuaciones que definen el SMM.

Una cuenca hidrográfica puede subdividirse en N áreas fraccionales, las cuales representan distintos usos del suelo o tipos de cobertura terrestre. Para cada área fraccional j de N, se calcula un balance hídrico específico. Se asume que las condiciones

climáticas son uniformes en cada subcuena, y el balance de agua, considerado como el almacenamiento efectivo en la zona reticular, se determina mediante la ecuación presentada a continuación (Navarro Farfán et al., 2019):

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z^{RRF}_{1,j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Ecuación 14

Dado que no se cuenta con un módulo de nieve, la escorrentía total, tanto superficial como de Inter flujo (RT), de cada subcuena en el tiempo t se determina mediante la Ecuación [15]. Asimismo, la percolación y la recarga se describen en las Ecuaciones [16] y [17], respectivamente:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j (P_e(t)z_{1,j}^{RRF} + f_j k_{s,j} z_{1,j}^2)$$

Ecuación 15

$$S_{max} \frac{dz_2}{dt} = \left(\sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} z_2^2$$

Ecuación 16

$$R = \sum_{j=1}^N A_j (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Ecuación 17

A continuación, se muestra el listado de términos empleados en las ecuaciones que describen el funcionamiento del Método de Humedad del Suelo (Soil Moisture Method).

Tabla 12. Términos presentes en las ecuaciones del SMM.

R	Recarga.
R_d	Almacenamiento Efectivo.
P_e	Precipitación que Escurre.
PET	Evapotranspiración Potencial.
K_c	Coeficiente de Cultivo.
Z₁	Almacenamiento Relativo en el Tanque 1.
RRF	Factor de Resistencia al Esguerrimiento.
f	Coeficiente de Partición.
k_s	Conductividad Saturada.
P	Precipitación.
A	Área.

$S_{\max}$	Percolación Profunda.
Z_2	Almacenamiento Relativo en el Tanque 2.

Entre los diversos parámetros considerados en la formulación del modelo, se identifican nueve que inciden de manera específica en cada uno de los procesos que conforman el ciclo hidrológico.

- K_c : [Coeficiente de cultivo].
- Sw : [Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces].
- Dw : [Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda].
- RRF : [Factor de resistencia a la escorrentía].
- K_s : [Conductividad en zona de raíces].
- K_d : [Conductividad a zona profunda].
- f : [Dirección preferencial de flujo].
- z_1 : [Nivel inicial de humedad en la zona de raíces].
- z_2 : [Nivel inicial de humedad en la zona profunda].

El método de humedad del suelo permite modelar la interacción entre la precipitación, la infiltración en el terreno, la evaporación y la escorrentía superficial, considerando las variaciones en el contenido de humedad del suelo a lo largo del tiempo, este método consiste en un balance hídrico que considera las entradas, y las salidas del sistema. La diferencia entre dichas entradas y salidas, en cada uno de los dos reservorios que conforman el modelo, refleja las variaciones en el contenido de humedad tanto en el tanque 1, correspondiente a la zona de raíces, como en el tanque 2, asociado a la zona profunda, hay tres salidas del tanque 1:

- **Escorrentía Superficial:** Este flujo superficial está controlado por el parámetro denominado Factor de Resistencia a la Escorrentía (RRF).
- **Escorrentía Directa:** Este tipo de escorrentía se genera únicamente cuando el tanque 1 alcanza su saturación total, lo que implica que no se produce infiltración hacia la primera capa del suelo. Esta condición está determinada por la capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces, denominada Sw .
- **Flujos Intermedios:** Estos flujos se producen como resultado de la capacidad de almacenamiento de agua en el tanque 1 y de la conductividad hidráulica en la zona de raíces, identificada como K_s . Asimismo, la magnitud y distribución de estos flujos intermedios están condicionadas por la dirección del flujo (f), parámetro que determina la proporción de agua destinada al flujo intermedio y a la percolación hacia capas más profundas.

El tanque 2 posee igualmente una capacidad de almacenamiento en la zona profunda, denominada D_w . Adicionalmente, cuenta con una conductividad hidráulica propia de dicha zona, identificada como K_d , la cual regula el flujo base.

El coeficiente de cultivo (K_c) se utiliza para transformar la evapotranspiración de referencia en la evapotranspiración específica del cultivo en condiciones normales. La estimación de la evapotranspiración potencial (PET) se lleva a cabo mediante la ecuación de Penman-Monteith (Navarro Farfán et al., 2019).

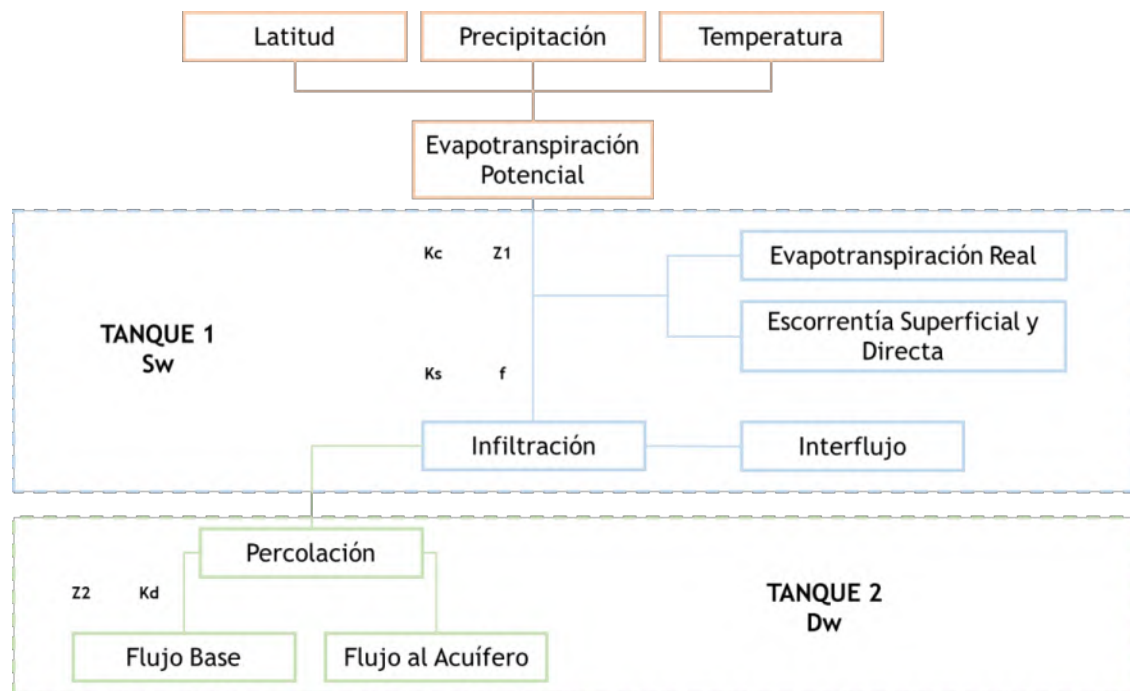


Figura 5. Representación del SMM de WEAP ((Navarro Farfán et al., 2019).

4.7 Calibración del modelo.

La fiabilidad de los resultados del modelo depende directamente de la validez de las suposiciones adoptadas, la calidad de los datos de entrada y la adecuada estimación de los parámetros. Uno de los principales desafíos radica en seleccionar un modelo que reproduzca de manera precisa las condiciones del caso de estudio, así como en contar con parámetros coherentes que reflejen fielmente el comportamiento hidrológico real de la cuenca. La calibración se lleva a cabo mediante la variación de 4 de los 9 parámetros involucrados en el SMM. Esta variación está estrechamente vinculada con las características específicas del sitio de aplicación (Farfán, 2019). En cada modelización, es necesario realizar un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de los parámetros sobre los resultados que se generarán a partir del modelo. Los parámetros que se calibran son los siguientes:

- **Crop Coefficient [Kc]:** Que regula el volumen de agua perdido por evapotranspiración y está determinado por el tipo de uso del suelo.
- **Runoff Resistance Factor [RRF]:** Define la proporción de agua que puede escurrir en función de las restricciones naturales del terreno.
- **Soil Water Capacity [Sw]:** Tiene en cuenta la capacidad del suelo subsuperficial para retener humedad.
- **Root Zone Conductivity [Ks]:** Se refiere a la conductividad hidráulica en la zona radicular evalúa qué tan fácilmente se desplaza el agua de forma vertical a través del suelo dentro del área ocupada por las raíces, típicamente expresado en milímetros por día (mm/día).

En los modelos de precipitación-escorrentía, la calibración es el procedimiento mediante el cual se determinan los parámetros óptimos del modelo, de manera que sus resultados se ajusten de la mejor forma posible a los valores observados.

La calibración puede llevarse a cabo de manera manual, mediante un proceso iterativo de prueba y error. En cada ajuste de los parámetros del modelo, los resultados obtenidos se comparan con los datos históricos de aportaciones, ya sea a través de indicadores de bondad de ajuste o mediante una evaluación visual.

4.8 Indicadores de bondad de ajuste.

La calibración de modelos se orienta hacia un criterio de precisión, sustentado en la evaluación cuantitativa de la bondad de ajuste del modelo. Para ello, se emplean diversas metodologías que utilizan ecuaciones específicas o indicadores de ajuste, los cuales permiten medir numéricamente el grado de similitud o discrepancia entre los valores simulados por el MPE y los datos observados en la estación hidrométrica.

Donde la simbología de los indicadores de bondad de ajuste es la siguiente:

Q_{sim} = Flujo simulado.

Q_{obs} = Flujo observado.

t = Intervalo de tiempo.

N = Numero de meses en la calibración y la barra alta denota el valor medio.

4.8.1 Eficiencia de Nash- Sutcliffe (NSE).

Se trata de un error cuadrático medio que asigna un mayor peso a los errores de gran magnitud, los cuales suelen, aunque no necesariamente, presentarse durante períodos de flujo elevado. El coeficiente NSE toma valores en el rango de -1 a 1. Un valor de $NSE = 1$ indica un ajuste perfecto del modelo a los datos observados, mientras que un $NSE = 0$ sugiere que el error tiene una magnitud similar a la varianza de los datos observados, lo que sugiere que la media de dichos datos ofrece un nivel de predicción comparable al del

modelo. Si el valor es menor que cero, indica que la media predice mejor que el modelo, lo cual evidencia un desempeño deficiente del mismo (Navarro, 2019).

Una de las principales limitaciones del coeficiente de Nash-Sutcliffe es que tiende a sobrevalorar los valores más altos de las series temporales, mientras que los valores más bajos no son adecuadamente representados. Esto se debe a que las diferencias entre los valores observados (provenientes de la estación hidrométrica) y los valores simulados (generados por el modelo) se calculan en términos cuadráticos. Como consecuencia, el modelo suele presentar una sobrestimación durante los picos de flujo debido a su funcionamiento deficiente y, en condiciones de caudales reducidos, una subestimación de los valores reales.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}(t))^2}$$

Ecuación 18

4.8.2 Eficiencia de Nash-Sutcliffe modificada (Ln NSE).

Este indicador otorga una mayor ponderación a los errores que ocurren durante períodos de flujo reducido. Para minimizar el problema de las diferencias cuadráticas y la sensibilidad a valores extremos, el cálculo del coeficiente NSE se realiza utilizando los valores logarítmicos de las observaciones y las simulaciones. A través de esta transformación, los valores máximos se suavizan mientras que los valores más bajos permanecen relativamente estables. Como resultado, la influencia de los caudales reducidos se vuelve más significativa en comparación con los picos de flujo, lo que incrementa la sensibilidad del coeficiente Ln NSE ante posibles sobreestimaciones o subestimaciones sistemáticas del modelo.

$$\ln NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}(t)) - \ln(Q_{obs}(t))]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\bar{Q}_{obs}(t))]^2}$$

Ecuación 19

4.8.3 Coeficiente de correlación de Pearson (r).

El coeficiente de correlación de Pearson evalúa la relación y la variación conjunta entre los valores observados y simulados, sin considerar penalizaciones por sesgo. Su valor oscila entre -1 y 1. Cuando existe una correlación positiva perfecta, el coeficiente r alcanza un valor de 1. Este coeficiente es independiente de la magnitud de la pendiente y se presenta cuando los puntos de los datos en los ejes X e Y se alinean en una línea recta perfecta, aumentando simultáneamente. No obstante, si los puntos siguen una línea recta con pendiente negativa, donde los valores de Y disminuyen a medida que los de X aumentan, el coeficiente r adopta un valor de -1. Por otro lado, un valor de r próximo a 0 indica la ausencia de una correlación lineal significativa entre las variables X e Y.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}}$$

Ecuación 20

4.8.4 Coeficiente de simetría (cs).

Es un indicador que evalúa la simetría del ajuste entre el valor medio de la simulación y el valor medio de la observación. Aunque es un aspecto sencillo, resulta fundamental mantenerlo en modelaciones de períodos prolongados. Un valor de CS igual a 1 indica que la media de la serie observada y la de la serie simulada son idénticas.

$$cs = 1 - \left[\max \left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}; \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}} - q \right) \right]^2$$

Ecuación 21

En la siguiente tabla se muestra la calidad del indicador según el valor que se haya obtenido en la calibración.

Tabla 13. Calidad de ajuste con los diferentes indicadores de bondad.

CALIDAD	NSE / Ln NSE / r / CS
Muy Buena	0.75 < Coeficiente ≤ 1.00
Buena	0.65 < Coeficiente ≤ 0.75
Satisfactoria	0.50 < Coeficiente ≤ 0.65
No satisfactoria	Coeficiente ≤ 0.50

4.9 Similitud hidrológica.

La cuenca hidrográfica constituye una unidad integral que engloba todos los procesos del ciclo hidrológico dentro de un área delimitada, lo que permite su análisis y estudio detallado. Para la mayoría de los hidrólogos, la diversidad es un principio fundamental en la naturaleza. Esta perspectiva respalda el concepto de la unicidad del lugar, planteado por Beven (2000), el cual argumenta que cada sitio posee características únicas las cuales son determinadas por su topografía, suelo, geología y vegetación (Wagener et al., 2007).

Dado que muchos de los afluentes en las cuencas cuentan con información limitada en las series de tiempo de caudales, la realización de modelaciones precisas resulta inviable. Por ello, se opta por extrapolar los parámetros de calibración obtenidos en las cuencas modeladas hacia aquellas que no disponen de instrumentación (Luis & Lozano, 2017).

La similitud hidrológica en las cuencas hace referencia al estudio comparativo de aquellas cuencas hidrográficas que presentan características comunes en su dinámica hidrológica. Este análisis tiene como objetivo identificar cuencas que muestren patrones semejantes

en el flujo del agua, en el comportamiento de los caudales y en su respuesta a eventos climáticos.

Este concepto es relevante en hidrología, ya que permite entender cómo se comportan diferentes cuencas y cómo sus características hidrológicas pueden estar influenciadas por factores comunes, incluyendo aquellos criterios basados en el clima (húmedo, árido, semiárido, etc.), en la cobertura del suelo (boscoso, agrícola, urbano, etc.), en la respuesta hidrológica de la cuenca (rápida o lenta) y en el tipo de almacenamiento predominante (cuencas dominadas por aguas subterráneas o por aguas superficiales), entre otros. No obstante, consideramos que estos grupos, por sí solos, no constituyen un sistema de clasificación integral, y algunos de ellos, como la diferenciación entre respuestas rápidas y lentas, carecen de una definición precisa, lo que dificulta su aplicación de manera consistente (Wagener et al., 2007).

El análisis de la similitud hidrológica entre cuencas permite realizar extrapolaciones y aprovechar la información de una cuenca ampliamente estudiada para optimizar el conocimiento y la gestión de otra cuenca con datos o estudios limitados. Es importante mencionar que, para transferir información a una cuenca con datos limitados, es fundamental que la zona seleccionada sea adyacente y comparta características similares y el cumplimiento de estos criterios asegura que las condiciones climáticas, geológicas y de cobertura vegetal sean equivalentes, favoreciendo una transferencia de información más precisa y confiable.

El proceso de la similitud hidrológica consiste únicamente en la transferencia de los parámetros utilizados para alcanzar la calibración óptima en las cuencas ubicadas dentro o en las proximidades de la zona de estudio.

4.10 Balance hídrico.

El balance hídrico es un elemento esencial en la hidrología y en la gestión de los recursos hídricos, ya que permite analizar el comportamiento del agua dentro de una cuenca o región durante un período determinado. Su propósito principal es cuantificar todas las entradas y salidas de agua en un área específica, con el fin de identificar posibles excedentes o déficits hídricos, este balance, se fundamenta en el principio de conservación de la masa de agua, lo que implica que la totalidad del agua que ingresa a un sistema debe equivaler a la suma del agua que egresa, más cualquier variación en el almacenamiento dentro del mismo.

Dado que el balance hídrico proporciona un diagnóstico preciso sobre el estado real del recurso hídrico en una determinada área, lo que facilita la adopción de medidas y el diseño de estrategias para su gestión y conservación. Esto permite asegurar su disponibilidad en términos tanto de cantidad como de calidad, promoviendo un uso sostenible e integrado del recurso.

Según Campos (1998), el escurrimiento de una corriente puede ser considerado como el componente más relevante dentro del ciclo hidrológico. El balance hídrico como ya lo mencionamos, representa los flujos de entrada y salida de agua en un sistema determinado, los cuales pueden expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$P + Q_{in} = ETR + \Delta S + Q_{out}$$

Ecuación 13

Donde:

P= Precipitación (L^3).

Q_{in} = Flujo de agua hacia adentro de la cuenca (L^3).

ETR= Evapotranspiración (L^3).

ΔS = Cambio en el almacenamiento de agua (L^3).

Q_{out} = Flujo de agua (L^3).

En un balance hídrico, las entradas de agua comprenden diversos componentes. La precipitación representa la cantidad de agua que cae en forma de lluvia o nieve dentro del área de estudio. La infiltración corresponde a la fracción de la precipitación que se introduce en el suelo y contribuye a la recarga de los acuíferos. El flujo superficial se refiere al desplazamiento del agua sobre la superficie del suelo hacia ríos, arroyos y otros cuerpos de agua. Asimismo, los aportes externos incluyen cualquier contribución adicional de agua proveniente de fuentes externas, como aguas subterráneas o caudales de otros ríos.

Las salidas de agua en un balance hídrico comprenden varios procesos. La evapotranspiración se define como la pérdida de agua desde la superficie del suelo y las plantas, resultado de la evaporación y la transpiración. La escorrentía hace referencia al agua que fluye fuera del área de estudio a través de ríos u otros cuerpos de agua. Las extracciones de agua incluyen cualquier remoción de agua para fines humanos, agrícolas o industriales.

El cambio en el almacenamiento de agua está determinado por los flujos internos que ocurren en las capas subsuperficiales y profundas. En este contexto, para asegurar un balance hídrico completo y garantizar que el saldo sea cero, es esencial mantener un control preciso sobre los volúmenes de entrada y salida del sistema (Navarro Farfán et al., 2019).

4.11 Características del acuífero.

Se lleva a cabo una caracterización exhaustiva de los elementos que determinan el comportamiento del acuífero analizado. Esta caracterización se desarrolla de forma representativa dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), mediante la

elaboración de mapas temáticos. Dichos mapas facilitan la obtención de datos clave que posteriormente se emplean en la modelación hidrogeológica mediante Modflow.

4.11.1 Relieve continental.

La información referente al relieve continental e insular permite una representación simplificada de las formas que adopta la superficie terrestre, tales como montañas, mesetas, valles, planicies, depresiones y terrazas. Esta representación tiene como propósito facilitar el análisis de los espacios geográficos, permitiendo obtener datos clave como altitudes, pendientes, perfiles topográficos, diferencias de nivel, zonas susceptibles a inundación y delimitación de cuencas hidrográficas, entre otros aspectos relevantes (García et al., 2021). Los datos del relieve continental provienen de un Modelo Digital de Elevación (MDE), también conocido como Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM), disponible en la base de datos del INEGI. Este modelo puede descargarse en formatos compatibles con software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), donde posteriormente se procesa para generar mapas topográficos y análisis espaciales necesarios en diversos estudios.

4.11.2 Salidas y descargas del acuífero.

Las salidas y descargas del acuífero hacen referencia a los flujos de agua que abandonan el sistema subterráneo. Estas pueden ser de origen natural, como los manantiales o flujos hacia cuerpos de agua superficiales, o de origen antropogénico, como las extracciones mediante pozos. Ambas formas influyen directamente en el equilibrio y comportamiento del acuífero.

4.11.3 Pozos de extracción.

En la actualidad, la extracción de agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento hídrico. Por ello, se procede a identificar la localización de los pozos dentro del área de estudio, así como a cuantificar el volumen extraído y el uso al que se destina dicha agua (García et al., 2021). Esta información se obtiene a partir de la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa), previamente descrita.

4.11.4 Manantiales

Los manantiales constituyen puntos de afloramiento natural del agua subterránea en el acuífero, y se consideran al calcular la descarga total del mismo. Para su análisis, se georreferenciaron espacialmente con el fin de elaborar un mapa representativo. La información utilizada proviene del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), mediante un archivo en formato shapefile (.shp), del cual se extrajeron tanto los volúmenes de agua descargados como la altitud correspondiente a cada manantial.

4.12 Modflow.

Modflow es un software desarrollado para la simulación del flujo de agua subterránea, basado en el método numérico de diferencias finitas. Este programa implementa un

código fuente que permite resolver, de forma iterativa, la ecuación diferencial que describe el movimiento del agua en medios porosos. Además, Modflow es capaz de definir las condiciones del sistema de flujo subterráneo e interpretar su interacción con el agua superficial, facilitando así un análisis integral del comportamiento hidrológico del sistema.

El movimiento tridimensional del agua subterránea con una densidad constante a través de un material poroso puede ser descrito por la siguiente ecuación, la cual es una ecuación diferencial parcial que modela el flujo de agua subterránea en un medio heterogéneo y anisotrópico bajo condiciones no estacionarias, suponiendo que los ejes principales de la conductividad hidráulica coinciden con las direcciones de los ejes coordenados (García et al., 2021):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación 23

Donde:

Kxx, Kyy, Kzz: Valores de conductividad hidráulica al largo de los ejes coordenados x, y, z que se supone son paralelos a los ejes principales de conductividad hidráulica (L/T).

h: Altura piezométrica (L).

W: Es un flujo volumétrico por unidad de volumen que representa fuentes y/o sumideros que para W<0 representa el flujo de salida del sistema de aguas subterráneas y para W>0 el flujo de entradas del mismo (T-1).

Ss: Almacenamiento específico del material poroso (L-1).

t: Es el tiempo.

En la ecuación mencionada, es necesario realizar una discretización temporal porque la altura piezométrica (h) varía con el tiempo. Para ello, en el método de diferencias finitas se divide el tiempo en intervalos denominados períodos de estrés. Cada período representa un intervalo durante el cual se asume que las condiciones externas, como recarga o extracción, permanecen constantes. Dentro de estos períodos, se calcula la altura piezométrica en distintos momentos, lo que permite simular cómo evoluciona el flujo subterráneo a lo largo del tiempo (Harbaugh, 2005).

4.12.1 Discretización del acuífero

Para llevar a cabo una simulación en Modflow, es necesario dividir el acuífero en una malla o red de celdas. Esto se debe a que Modflow trabaja con una estructura basada en bloques, en la cual cada celda representa una porción del acuífero. El modelo realiza los cálculos en el centro de cada celda, considerando ese punto como un nodo de la simulación. Esta discretización permite representar espacialmente el comportamiento

del flujo subterráneo de manera numérica, así el software supone que las propiedades hidráulicas e hidrogeológicas son uniformes en la extensión de una celda. En Modflow, el punto de origen de la malla se ubica en la esquina superior izquierda del modelo. El sistema acuífero se representa mediante una malla compuesta por bloques o celdas, y su ubicación se define utilizando un sistema de coordenadas basado en filas, columnas y capas. Para identificar cada celda dentro de la malla, se emplea una notación con índices (J, I, K), donde J indica la fila, I la columna y K la capa vertical (Harbaugh, 2005). Esta forma de organización permite localizar con precisión cualquier celda dentro del modelo, como se ilustra en la figura siguiente:

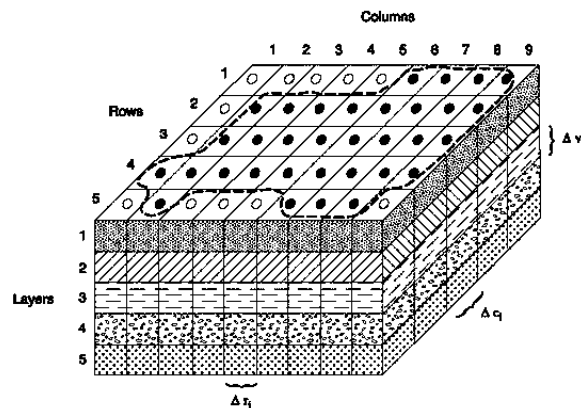


Figura 6. Discretización del acuífero por medio de celdas, marcando filas, columnas y capas. Figura de (Harbaugh, 2005).

En Modflow, se asume que las capas del modelo representan, por lo general, unidades o intervalos geohidrológicos dispuestos de forma horizontal. En el sistema de coordenadas cartesianas, el índice K se utiliza para indicar la posición vertical de una celda, es decir, los cambios a lo largo del eje Z. Las capas se numeran de arriba hacia abajo, por lo tanto, un aumento en el valor de K implica un descenso en la elevación o profundidad dentro del modelo (Harbaugh, 2005).

- **Ecuación de diferencias finitas.**

La ecuación de diferencias finitas se obtiene a partir de la aplicación del principio de conservación de masa, también conocido como la ecuación de continuidad en hidrología. Según este principio, la suma de los flujos de agua que ingresan y salen de una celda del modelo debe ser igual al cambio de almacenamiento dentro de dicha celda durante un intervalo de tiempo determinado (García et al., 2021).

La siguiente ecuación está formulada considerando tanto las entradas de agua como el almacenamiento que se gana en una celda. Para simplificar la expresión, los flujos de salida se representan como flujos de entrada con signo negativo, y de manera similar, las pérdidas se expresan como ganancias con signo negativo. Es decir, en lugar de tratar las

salidas y pérdidas por separado, se integran en la ecuación como valores negativos, lo que permite mantener un enfoque uniforme en la formulación del balance de flujo. Considerando que la densidad del agua subterránea se mantiene constante, la ecuación de continuidad que representa el balance de flujo dentro de una celda puede expresarse de la siguiente forma (Harbaugh, 2005).

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta v$$

Ecuación 14

Donde:

Q_i : Flujo de entrada en la celda (L^3/T).

S_s : Coeficiente de almacenamiento específico del medio poroso ($1/L$).

Δv : Volumen de la celda (L^3).

Δh : Cambio de altura en un intervalo de tiempo Δt .

4.12.2 Obtención de la información que alimenta al modelo subterráneo.

En Modflow, los distintos paquetes utilizados en esta investigación los cuales se describen a continuación reciben su información a través de matrices. Estas matrices están estructuradas en filas y columnas que corresponden a la discretización espacial del modelo, es decir, a la malla que representa el acuífero. Cada celda de la matriz contiene los datos necesarios para simular las condiciones y características del flujo subterráneo en esa ubicación específica del modelo.

Estas matrices se obtienen a partir de un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando mapas que representan distintas características relevantes del acuífero. Para generar las matrices, se realiza una conversión de los archivos en formato ráster a formato ASCII. Este proceso transforma la información espacial del mapa en una estructura de datos numéricos organizada en filas y columnas, lo que permite que las matrices resultantes puedan ser visualizadas y editadas fácilmente en programas como Microsoft Excel.

En el estudio de (García et al., 2021), menciona que las matrices requeridas para alimentar el modelo son fundamentales para representar las condiciones y características del acuífero dentro del entorno de simulación de Modflow son las siguientes:

- **Condiciones de contorno:** La información contenida en esta matriz se construye a partir de la variable IBOUND.
- **Relieve o capa superior:** Esta matriz se basa en un modelo de elevaciones que, como su nombre lo indica, representa las alturas del terreno. En este modelo, a cada celda de la malla del acuífero se le asigna un valor de elevación que

corresponde a la altitud real del terreno en esa ubicación específica. Esto permite representar con precisión la topografía dentro del modelo hidrogeológico.

- **Capa inferior:** Se realiza restando el espesor del acuífero a las elevaciones del relieve en cada celda.
- **Recarga:** Se obtiene al agregar los volúmenes correspondientes a los distritos de riego (recarga artificial) a la infiltración natural de la zona.
- **Extracciones:** Se trata de una matriz que contiene los volúmenes de agua asignados a los pozos de extracción, los cuales están ubicados en las celdas correspondientes de la malla. Estos volúmenes se representan con valores negativos, ya que indican la extracción de agua del sistema.
- **Elevación del nivel estático:** Esta matriz está compuesta por los datos de nivel estático registrados en los pozos del acuífero. Cada uno de estos valores se asigna a la celda correspondiente dentro de la malla del modelo, de acuerdo con la ubicación geográfica de cada pozo. Esta información permite representar la distribución espacial del nivel del agua subterránea en condiciones estáticas
- **Conductancia:** En esta matriz se representa el volumen del manantial.
- **Elevación del manantial:** Se trata de una matriz que contiene los valores de elevación de los manantiales, asignados a las celdas correspondientes dentro de la malla del modelo, según su ubicación geográfica. Esta información permite representar con precisión la altitud a la que se encuentran los manantiales en el área de estudio.
- **Conductividad:** Esta propiedad del acuífero describe la facilidad con la que el agua puede fluir a través de sus poros en un determinado intervalo de tiempo. La matriz correspondiente está compuesta por valores teóricos propuestos por diversos autores, los cuales se fundamentan en las características geológicas de la zona de estudio. Esta propiedad es una de las más relevantes en la caracterización de un sistema acuífero y será utilizada posteriormente en el proceso de calibración del modelo.

Tabla 14. Valores estimados de la conductividad hidráulica (metros/día). Recopilación (Sanders,1998).

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	1 a 100 0,01 a 1 10 ⁻⁴ a 1 10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500				
	Arena media	0,1 a 50	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	
	Arena Fina	0,02 a 20			0,01 a 1	
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁵ a 10 ⁻³	
	Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷		
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, Dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻³ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/Alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas Cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁵ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁶
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 a 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 25				
	Grabo alterado	0,05 a 0,3				

- **Porosidad:** Esta propiedad depende del tipo de material que compone el acuífero y de la capacidad de la roca para almacenar agua. La matriz correspondiente está integrada por valores teóricos propuestos por diversos autores, los cuales se fundamentan en las características geológicas observadas en la zona de estudio.

Tabla 15. Valores estimados de la porosidad (%) (Sanders, 1998).

	Total	Eficaz
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fracturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías NO carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

4.12.3 Tipos de celdas y simulación de condiciones de contorno.

En el software Modflow, se emplean tres tipos de celdas para establecer las condiciones de contorno del modelo de acuífero: celdas de nivel constante, celdas activas y celdas inactivas. Cada una de estas categorías cumple una función específica dentro de la simulación, permitiendo definir las áreas de flujo, las fronteras del sistema y las zonas sin participación en el proceso de modelado.

Las celdas de nivel constante son aquellas en las que se asigna un nivel hidráulico fijo desde el inicio y que permanece invariable durante toda la simulación. Estas celdas se utilizan, por ejemplo, para representar cuerpos de agua como ríos, lagos o manantiales dentro del límite del acuífero (Figura 7) celdas punteadas. Las celdas activas corresponden a zonas del modelo donde no se establece un nivel hidráulico predeterminado, lo que permite que el nivel del agua varíe a lo largo del tiempo en función de las condiciones simuladas (Figura 7) celdas sin color (transparente). Por otro lado, las celdas inactivas representan áreas donde no se permite el movimiento de agua, es decir, no se considera ni entrada ni salida de flujo en ningún momento de la simulación (Figura 7) celdas con líneas. Estas celdas suelen emplearse para excluir regiones que no forman parte activa del sistema acuífero modelado.

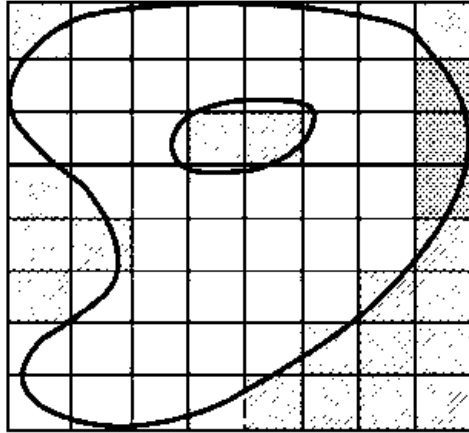


Figura 7. Tipos de celdas y condiciones de contorno en el acuífero (Harbaugh, 2005).

4.13 Paquetes de simulación en Modflow.

El programa Modflow está estructurado en módulos denominados paquetes, los cuales han sido diseñados para abordar diferentes aspectos del flujo subterráneo según las características particulares del problema que se desea simular. Esta organización permite seleccionar y combinar únicamente los paquetes necesarios, en función de los requerimientos específicos de cada modelo hidrogeológico (Harbaugh, 2005). Para ello, se considera de manera lógica la forma en que se construye la ecuación que describe el flujo subterráneo. En consecuencia, las distintas secciones del código que la conforman se encuentran organizadas en módulos específicos dentro del programa, denominados paquetes hidrológicos.

Existen dos categorías principales de paquetes hidrológicos en Modflow. La primera corresponde a los paquetes internos de flujo, los cuales se encargan de simular el movimiento del agua entre celdas adyacentes dentro del modelo. La segunda categoría abarca los denominados paquetes de estrés, que representan fuentes o sumideros específicos de agua subterránea, como ríos, pozos de extracción y recarga. Cada tipo de paquete cumple una función particular en la simulación del sistema hidrogeológico. Sin embargo, antes de que los paquetes hidrológicos puedan ejecutarse correctamente y proporcionar resultados útiles, es necesario incorporar un componente adicional que permita gestionar y coordinar la operación del modelo. Este componente se conoce como paquete básico, y su función principal es establecer los parámetros generales del modelo y controlar su funcionamiento durante la simulación.

4.13.1 Paquete básico.

Maneja una serie de tareas administrativas para Modflow. Este paquete se encarga de gestionar aspectos fundamentales del funcionamiento del modelo. Entre sus funciones principales se encuentra la lectura del nombre del archivo principal para abrir los archivos

necesarios y activar las opciones correspondientes. Además, se encarga de declarar y asignar memoria a las variables requeridas por el modelo, así como de leer los datos de entrada que varían con el tiempo. También interpreta la información relacionada con la discretización temporal y espacial, y controla la generación de resultados de salida conforme a las especificaciones definidas por el usuario. Asimismo, este paquete es responsable de leer la variable IBOUND, que define el tipo de celda (activa, inactiva o de nivel constante) dentro del modelo (García et al., 2021).

4.13.2 Variable IBOUND.

Como lo menciona (Harbaugh, 2005), esta variable contiene un código específico para cada celda, el cual indica el tipo de celda en el modelo. Las celdas de nivel constante se asignan con un valor de -1, las celdas activas se definen con un valor de 1, y las celdas inactivas se representan con un valor de 0. Este sistema de codificación permite clasificar las celdas de manera clara, facilitando su manejo y simulación.

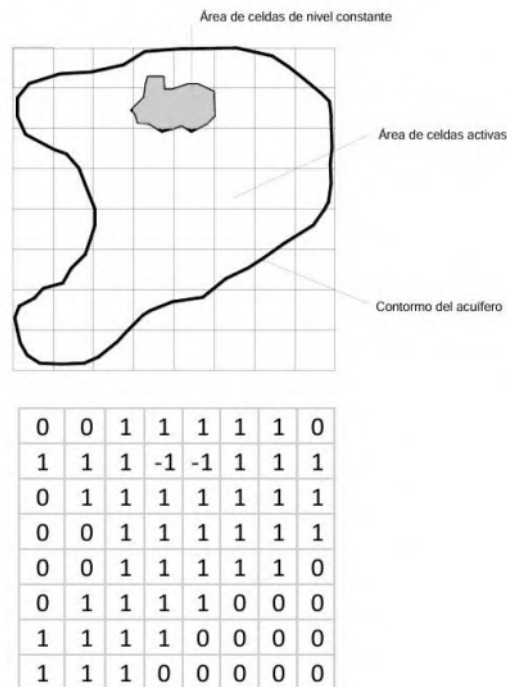


Figura 8. Ejemplo de la variable IBOUND para una capa simple (García Pérez et al., 2021).

▪ Discretización del espacio.

El espacio se divide en una malla formada por celdas. En este proceso, se define el número de filas y columnas, así como el tamaño de cada celda. También se especifica el número de capas dentro del acuífero, así como los espesores de cada capa. Además, se establecen las elevaciones de las celdas superiores e inferiores, lo que permite representar la variación en la topografía del acuífero a lo largo de las diferentes celdas de la malla.

- **Discretización del tiempo.**

El tiempo de simulación se organiza en periodos de estrés, que son intervalos durante los cuales los datos de entrada relacionados con las acciones externas (como recarga, extracción o flujo) permanecen constantes. Estos periodos de estrés se subdividen en pasos de tiempo, que son intervalos más pequeños y son fundamentales para el funcionamiento del método de diferencias finitas (Harbaugh, 2005). Los periodos de estrés pueden expresarse en unidades de tiempo como días, meses o años, dependiendo de la escala temporal de la simulación.

- **Aplicación de los paquetes de estrés.**

Estos paquetes se integran en el proceso de simulación del flujo de agua subterránea, permitiendo modelar las acciones hidrológicas que ocurren en un sistema acuífero. Estos paquetes agregan términos a la ecuación que describe el flujo de agua, los cuales representan entradas o salidas de agua, tales como recarga, extracción o flujo de superficie (Harbaugh, 2005), estos términos adicionales funcionan como condiciones de contorno dentro del modelo, ya que determinan cómo se comporta el sistema en las fronteras del área de estudio.

- a) **Paquete de pozos (Well):** Este paquete simula características como pozos que pueden extraer o agregar agua al sistema acuífero a una tasa constante durante un periodo de estrés. En este contexto, la tasa de extracción o recarga es independiente de factores como la ubicación dentro de la celda y la altura de la celda, lo que significa que se mantiene constante durante todo el periodo de simulación sin verse afectada por estas variables. El caudal de un pozo es determinado por el usuario, quien lo especifica como un volumen de agua extraído o añadido por unidad de tiempo. Cuando el caudal es negativo, se interpreta como un pozo de extracción, es decir, el pozo está descargando agua al sistema. En cambio, cuando el caudal es positivo, se considera un pozo de recarga, lo que significa que el pozo está inyectando agua en el acuífero (García et al., 2021).
- b) **Paquete de recarga (Recharge):** Este paquete está diseñado para simular la recarga distribuida en diferentes áreas del sistema de aguas subterráneas. La recarga areal generalmente ocurre debido a las precipitaciones que se infiltran en el acuífero. Los valores de recarga para cada área y periodo de estrés son establecidos por el modelador, quien determina la cantidad de agua que se recarga en el acuífero durante cada intervalo de tiempo especificado en la simulación (Harbaugh, 2005).

- c) **Paquete de drenaje (Drain):** Este paquete está diseñado para simular los efectos de drenajes, que extraen agua del acuífero a un ritmo proporcional a la diferencia entre la altura del agua en el acuífero y una elevación fija conocida como altura de drenaje. Esta extracción ocurre solo cuando la altura del acuífero está por encima de la altura de drenaje. Si el nivel del acuífero cae por debajo de esta elevación, el drenaje deja de tener efecto sobre el acuífero. La constante que determina la cantidad de agua extraída se denomina conductancia del drenaje. Esta función es similar al flujo de agua entre un río superficial y un acuífero, donde el flujo depende de la diferencia de niveles entre ambos.

4.14 Calibración del Modelo.

Una vez que se obtienen los resultados de la simulación del acuífero en Modflow, se lleva a cabo un proceso de calibración. Este proceso consiste en ajustar los parámetros del modelo de manera que los niveles piezométricos simulados coincidan o se acerquen lo más posible a los niveles medidos en el campo. Para lograr esto, se ajustan los valores de conductividad hidráulica u otros parámetros clave, de modo que los resultados obtenidos sean consistentes y fiables, representando correctamente las condiciones reales del acuífero.

Este proceso se lleva a cabo mediante un enfoque iterativo de prueba y error. Se proponen diferentes valores de conductividad hidráulica en la matriz de entrada del modelo y luego se comparan los niveles estáticos simulados con los niveles reales medidos en el campo. Sin embargo, este procedimiento puede ser complejo, ya que no siempre se dispone de un parámetro de referencia claro para las conductividades hidráulicas, lo que dificulta la identificación del momento en que se ha alcanzado la mejor iteración o la simulación más precisa.

4.15 Colecta de muestras para el análisis del agua.

Los pozos de extracción están ubicados en una región que abarca varios puntos de interés, estos sitios de muestreo para el estudio se seleccionaron tomando como referencia investigaciones y estudios previos de la zona, también la accesibilidad para la toma de muestras fue importante considerarse. Las características del terreno incluyen caminos rurales, áreas boscosas y posibles cuerpos de agua. Es esencial tomar en cuenta las condiciones climáticas y el estado de los caminos para planificar las rutas de acceso.

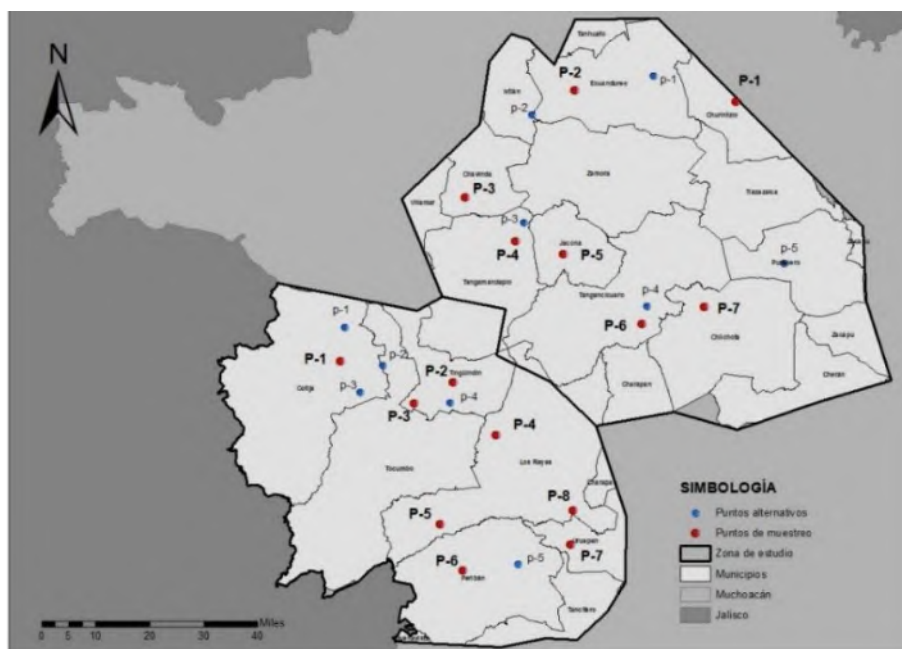


Figura 9. Mapa de los sitios de muestreo preliminar.

A continuación, se presentan dos tablas que contienen la información correspondiente a los pozos propuestos para integrar la red de colecta (Tabla 16 y 17). Las tablas incluyen 2 secciones, en la primera se encuentran los pozos principales seleccionados para la recolección, mientras que la segunda sección contempla pozos complementarios que podrán ser considerados en caso de que, por alguna razón, no sea posible acceder a los pozos principales seleccionados. Esta disposición tiene como objetivo garantizar la continuidad del trabajo de campo, asegurando alternativas viables ante cualquier eventualidad relacionada con el acceso a los pozos principales.

Tabla 16. Pozos de extracción a muestrear en el acuífero de Zamora.

ACUÍFERO DE ZAMORA					
No	CLAVE	X	Y	MUNICIPIO	LOCALIDAD
P-1	CNA 08-214	2207656.89	772542.126	TANGAMANDAPIO	EJIDO JERUSALEN
P-2	CNA 08-238	2214099.78	765111.025	CHAVINDA	CHAVINDA
P-3	CNA 08-369	2229810.77	781135.155	ECUANDUREO	MARRAVILLAS
P-4	CNA 08-416	2195519.41	791083.324	TANGANCICUARO	ADOLFO RUIZ CORTINEZ
P-5	CNA 08-500	2228145.73	804805.19	CHURINTZIO	LA HIGUERA
P-6	CNA 08-527	2198093.89	800190.239	CHULCHOTA	CHILCHOTA
P-7	CNA 08-620	2205817.97	779475.181	JACONA	COLONIA SOCIEDAD LA ARENA
POZOS DE EXTRACCIÓN COMPLEMENTARIOS.					
p-1	CNA08-400	2226267.94	774846.124	IXTLAN D LOS HERVORES	SAN SIMON
p-2	CNA08-302	2231995.85	792749.227	ECUANDUREO	ECUANDUREO
p-3	CNA 08-204	2210385.8	773623.032	JACONA	JACONA
p-4	CNA 08-576	2198181.86	791819.226	TANGANCICUARO	TANGANCICUARO
p-5	CNA 08-424	2204425.71	811891.083	PUREPERO	LOS PALMARES

Tabla 17. Pozos de extracción a muestrear en el acuífero de Cotija.

ACUÍFERO DE COTIJA					
No	CLAVE	X	Y	MUNICIPIO	LOCALIDAD
P-1	CNA-1622-064	2168225.31	780895.738	LOS REYES	SAN JOSE DE GRACIA
P-2	CNA-1622-071	2159391.24	764765.141	PERIBAN	CORONA
P-3	CNA-1622-100	2163163.22	780530.165	URUAPAN	NUEVO ZIROSTO
P-4	CNA-1622-173	2190111.51	746751.611	COTIJA	LOS ZAPOTES
P-5	CNA-1622-265	2179293.86	769590.354	LOS REYES	SAN RAFAEL
P-6	CNA-1622-189	2186938.11	763377.957	TINGUINDIN	TINGUINDIN
P-7	CNA-1622-193	2183877.95	757583.653	TINGUINDIN	TACATZCUARO
P-8	CNA-1622-293	2166144.92	761364.442	LOS REYES	SAN GERONIMO
POZOS DE EXTRACCIÓN COMPLEMENTARIOS					
p-1	CNA-1622-045	2160323.57	772860.46	PERIBAN	EL PEDREGAL
p-2	CNA-1622-132	2184031.79	762900.748	TINGUINDIN	TINGUINDIN
p-3	CNA-1622-179	2185543.64	749632.947	AYUMBA	COTIJA
p-4	CNA-1622-200	2189495.16	753003.48	TOCUMBO	LA MAGDALENA

4.15.1 Trabajo de campo.

Para la caracterización hidrogeoquímica del área de estudio, se llevó a cabo una campaña de colecta para toma de muestras de calidad, esta colecta de agua de pozos de extracción y/o manantiales, se realizó en el mes de Julio del 2024 los días miércoles 17 y jueves 18.

Las actividades realizadas durante el reconocimiento y la recolección de muestras de agua de los diversos pozos de extracción y/o manantiales seleccionados en los acuíferos de Zamora y Cotija consisten en la recopilación de información y muestras en campo, con el objetivo de realizar análisis y estudios complementarios. Estos estudios permitirán determinar el origen y la calidad del agua en la región mediante análisis hidrogeoquímicos.

Equipo necesario:

- Vehículo todo terreno.
- Equipo para muestreo de agua (botellas estériles, conservantes).
- Equipo de medición de parámetros in situ (pH, conductividad, temperatura).
- Equipos de protección personal como, guantes.
- Documentación: mapas, planos de los pozos, rutas de muestreo.
- Llevar equipo de comunicación y GPS.

4.15.2 Objetivo del trabajo de campo.

El proceso consiste en la recolección de muestras de agua de pozos de extracción y/o muestras adicionales de manantiales, los objetivos principales son:

- Verificar el estado operativo de los pozos de extracción.
- Recopilar datos sobre los caudales de extracción.
- Evaluar la calidad del agua extraída.

Los objetivos secundarios incluyen la medición de parámetros en campo, tales como temperatura ambiente, temperatura de la muestra, conductividad eléctrica, pH y sólidos disueltos totales, utilizando un multiparamétrico de campo. Además, se procederá al análisis de las muestras de agua en el Laboratorio “CEMA” (Centro de Estudio en Medio Ambiente) con el fin de determinar la concentración de cationes y aniones, así como los niveles de cloruro, nitrito, nitrato, nitrógeno amoniacal, NTK, fluoruro, fósforo total y arsénico.

4.15.3 Metodología del trabajo en campo.

Se eligieron 25 pozos tomando en cuenta su localización y altitud dentro de los acuíferos, con el objetivo de lograr una adecuada representación de la distribución de la composición química del agua subterránea. Además, estos pozos fueron seleccionados por encontrarse en zonas actualmente destinadas a la agricultura de riego.

La recolección y toma de parámetros de campo se realizó con el siguiente instrumental y material:

- Garrafas plásticas de muestreo de 5L.
- Dispositivo multiparamétrico en campo.
- Material etiquetado (Etiquetas, marcador impermeable, cinta aislante, libreta de campo, plumas).
- Baldes de plástico limpios (vasos).
- Equipo de preservación (hieleras plásticas para el almacenamiento de las muestras).
- Guantes de látex.
- Formulario de registro de muestreo.
- Agua destilada.
- Prueba de nitratos en campo (KIT HANNA).

La recolección de las muestras de agua se hizo usando las garrafas de 5L para las pruebas de laboratorio mencionadas anteriormente, consistió en la colecta directa del pozo de extracción con el siguiente procedimiento:

1. Primeramente, nos aseguramos de que el entorno donde se trabajara en el pozo este limpio para evitar contaminaciones.
2. Se realiza una purga en el pozo de extracción donde se va a recolectar la muestra, es necesaria para eliminar el agua estancada en la columna del mismo para obtener una muestra representativa del agua del acuífero.
3. Las garrafas al abrirlas se enjuagan tres veces antes de tomar la muestra final (tapa y recipiente), estas con el tipo de agua que será recolectada, después de dejarla correr por algunos segundos (con la purga mencionada anteriormente).
4. Se llena la garrafa completamente dejando un pequeño espacio en la parte superior para evitar la formación de burbujas.
5. Una vez sellada la garrafa, se procede a etiquetar cada una de las muestras. La etiqueta contiene la identificación del pozo. (Ej. Pozo #1)
6. El etiquetado es uno de los procesos más importantes, ya que también se deberá de hacer el registro completo de la muestra en la hoja de registro con información incluyendo la fecha y hora de la muestra, ubicación del pozo, condiciones meteorológicas como la temperatura, y algunas observaciones adicionales.
7. La preservación de la muestra consiste en colocar las muestras en las hieleras plásticas con hielo para mantener las pruebas entre 3°C y 4°C y seguir con la ruta de muestreo. Es importante que la entrega al laboratorio sea dentro de las 24-36hrs posteriores a la toman de muestra.
8. Determinar los valores de pH y Conductividad Eléctrica de manera independiente, usando el dispositivo multiparamétrico, de la misma forma que es tomada la temperatura con dicho dispositivo, anotando los datos en la hoja de registro de campo.

Como consideraciones adicionales, debemos de asegurarnos que los equipos estén en buen estado y sean adecuados para la toma de muestras (Ej. El multiparamétrico calibrado). También debemos de tener la precaución de evitar la contaminación cruzada, para esto es no tocar la parte interior de los frascos ni las tapas. Y no olvidar mantener un registro detallado de todo el proceso para garantizar la trazabilidad de la muestra.

Los análisis de laboratorio como fue mencionado anteriormente se realizaron en “CEMA” (Centro de Estudio en Medio Ambiente), ubicado en W.A. Mozart #639, Col. La Loma, Cp. 58290 en la ciudad de Morelia, Michoacán. En el laboratorio de este centro fueron determinados los iones mayores (F^- , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4 , HCO_3^- ; Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , NTK, As, NO_2^- , P), utilizados en la clasificación de aguas.

4.16 Calidad de agua.

4.16.1 Balance iónico.

Dada la necesidad de asegurar y controlar la calidad del análisis químico del agua, el cálculo del balance iónico surge como un método sencillo, preciso y fácilmente interpretable. Este procedimiento permite una evaluación clara de la calidad analítica y, en ciertos casos, facilita la detección de posibles errores en los análisis al comparar los balances iónicos y la correlación entre los diferentes iones (Voutsis et al., 2015).

El balance iónico consiste en verificar que la suma de los mili-equivalentes (meq) de los aniones sea aproximadamente igual a la de los cationes, en concordancia con el principio de electro-neutralidad del agua. No obstante, esta propiedad puede verse alterada por diversos procesos, lo que da lugar al desequilibrio iónico, un fenómeno problemático. El error asociado a este balance se determina mediante la diferencia entre los iones presentes en la muestra.

Un error negativo indica un exceso de aniones, mientras que uno positivo refleja un exceso de cationes. Se considera que el error es aceptable cuando es igual o inferior al 10% (Toscano Reyes et al., 2019).

$$\%Error = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} \times 100$$

Ecuación 25

4.16.2 Intercambio iónico.

El intercambio iónico influye principalmente en los cationes, ya que en la naturaleza predominan las sustancias con carga positiva (Custodio & Llamas, 2001). Aunque hay muchos minerales con capacidad para realizar este tipo de intercambio, solo ciertas especies del grupo de las arcillas poseen una relevancia significativa. Su relevancia se encuentra en los acuíferos que contienen una fracción arcillosa, ya que las formaciones predominantemente arcillosas son prácticamente impermeables.

El cambio de bases afecta principalmente a los cationes Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y también al H^+ , Li^+ y Sr^+ mientras que el K^+ y el NH_4^+ tienden a ser fijados irreversiblemente.

4.16.3 Fenómenos de oxidación-reducción.

Los procesos de oxidación-reducción pueden alterar la composición del agua al disolver o precipitar ciertos iones, los cuales pueden existir en diferentes estados de valencia. Estos fenómenos son particularmente significativos en la solubilización del hierro, así como del manganeso, el cual exhibe un comportamiento similar, aunque en menor abundancia. El manganeso puede disolverse en medios reductores y se precipita con facilidad cuando el entorno se vuelve oxidante (Custodio & Llamas, 2001).

El ion nitrato también se ve influenciado por los procesos redox, ya que puede ser reducido a N_2 o NH_4^+ , siendo este último susceptible de ser oxidado nuevamente a N_2 y NO_3^- . Las relaciones redox pueden actuar, en ocasiones, como generadoras y, en otras, como consumidoras de hidrogeniones.

4.17 Hidroquímica.

La caracterización hidroquímica del agua, junto con su distribución en el espacio y el tiempo, proporciona información fundamental sobre su origen, los procesos fisicoquímicos que la afectan y su calidad, incluyendo aspectos relacionados con la contaminación y la degradación. Con esta información, es posible analizar la evolución del acuífero a lo largo del tiempo, lo que permite evaluar su vulnerabilidad, identificar posibles impactos y definir medidas correctivas, es decir, todo esto facilita una gestión adecuada y sostenible del recurso hídrico (García Hidalgo et al., 2012)

La gran variedad en la composición química del agua, junto con la necesidad de entender la interacción entre el agua subterránea y las rocas que forman el acuífero, ha impulsado el desarrollo de múltiples técnicas para analizar y reportar los componentes químicos del agua (Chakraborti et al., 2015).

El manejo de los estudios de análisis químicos puede volverse más sencillo al utilizar gráficos y diagramas, especialmente cuando se realizan comparaciones entre varios análisis de agua de un mismo lugar en diferentes épocas o de distintos lugares.

La clasificación de las aguas subterráneas en diversos tipos se realiza según la composición predominante de iones, tomando en cuenta las concentraciones de los cationes y aniones principales. Para visualizar esta información gráficamente, se utilizan diagramas de Piper o de Stiff. Estos diagramas cualitativos facilitan la identificación de familias o facies hidrogeoquímicas del agua, además de permitir analizar la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea.

4.17.1 Diagrama de Piper.

El diagrama triangular de Piper facilita el análisis del carácter del agua en sus diversas fases químicas, mostrando de manera clara las relaciones entre los diferentes tipos de agua, su evolución y las posibles mezclas entre ellos. Este diagrama consta de tres secciones principales: dos triángulos y un rombo central. Los valores se representan en miliequivalentes por litro (Toscano Reyes et al., 2019). Los diagramas triangulares son particularmente útiles para representar tres componentes. En un triángulo equilátero, cada vértice corresponde a uno de los componentes. En estos triángulos, se muestra la composición de cationes y aniones, mientras que el rombo central complementa la información proveniente de ambos triángulos.

Para realizar el diagrama será necesario recalcular las concentraciones de los iones expresados e meq/L a %. Lo más usual es representar como aniones bicarbonato más carbonato ($\text{CO}_3\text{H}^- + (\text{CO}_3^{2-})$), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros más nitratos ($\text{Cl}^- + (\text{NO}_3^-)$) y como cationes sodio más potasio ($\text{Na}^+ + (\text{K}^+)$), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}).

La ubicación de un análisis en un diagrama de Piper puede servir para llegar a una conclusión preliminar sobre el origen del agua representada en dicho análisis. Sin embargo, de varios análisis trazados en diagramas de Piper, se pueden obtener cuatro conclusiones fundamentales, que son las siguientes:

- Tipo de agua.
- Precipitación o solución.
- Mezcla.
- Intercambio iónico.

La sección del rombo en el diagrama puede emplearse para clasificar diferentes tipos de agua. Piper los agrupó en cuatro categorías principales según su posición cerca de las cuatro esquinas del rombo. El agua situada en la parte superior del rombo presenta un alto contenido de ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y ($\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$), lo que da lugar a un área de dureza permanente. El área cercana a la esquina izquierda del diagrama está caracterizada por un alto contenido de ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y HCO_3^- , lo que la convierte en la zona de agua con dureza temporal. Por otro lado, el agua ubicada en la esquina inferior del rombo está compuesta principalmente por carbonatos alcalinos ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$). Y por último el agua que se encuentra cerca del lado derecho del diamante puede considerarse solución salina ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y ($\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$) (Hounslow, 1995). Estas divisiones se muestran en la siguiente figura:

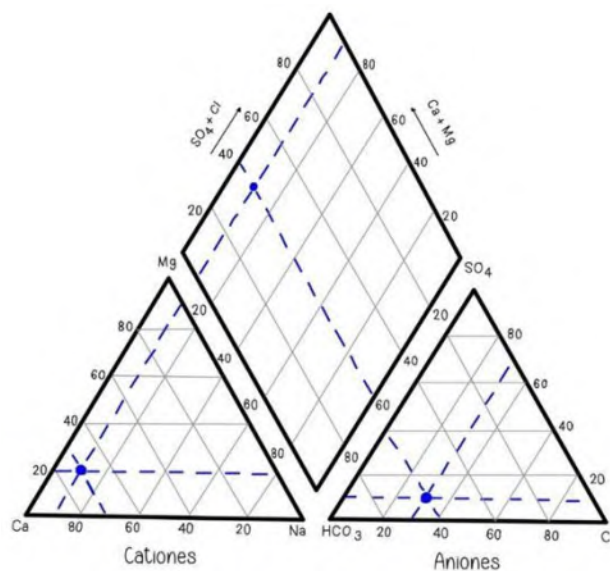


Figura 10. Diagrama del triángulo catiónico. Imagen adaptada de (Hounslow, 1995).

En la siguiente figura se muestra el diagrama trilineal de Piper, con su respectiva clasificación de las diferentes facies hidroquímicas del agua.

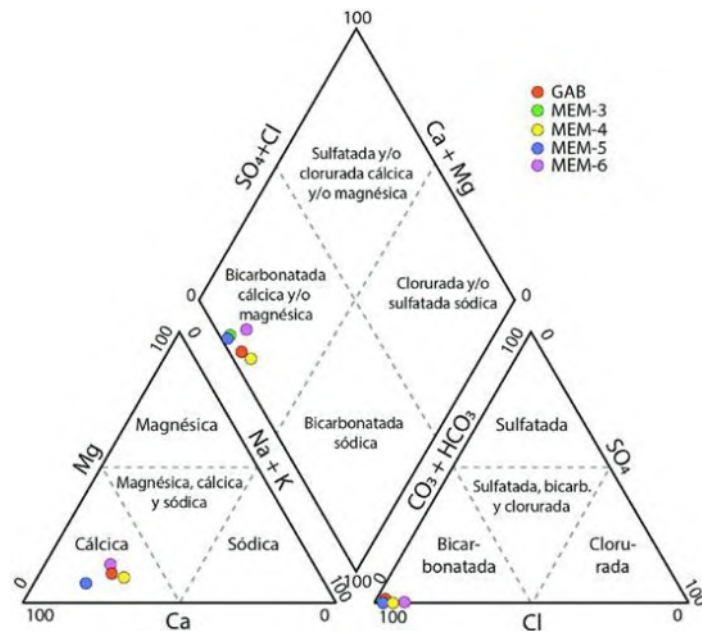


Figura 11. Diagrama de clasificación hidroquímica para aguas naturales usando el diagrama de Piper (1944).

4.17.2 Diagrama de Stiff.

La composición del agua se muestra en función de los iones predominantes. Estos diagramas permiten visualizar el grado de mineralización de los cuerpos de agua. La gráfica resultante consta de tres ejes horizontales, cada uno vinculando un catión con un anión. Los cationes se sitúan en el lado izquierdo, mientras que los aniones se encuentran en el lado derecho. De este modo, el ion Na^+ se enfrenta al Cl^- , el Ca^{2+} al HCO_3^- y el Mg^{2+} al SO_4^{2-} , el resultado es una figura cuya forma refleja las proporciones relativas de los distintos iones en miliequivalentes por litro (meq/L), mientras que su tamaño representa la concentración total en la que dichos iones están presentes (Toscano Reyes et al., 2019).

Este diagrama es adecuado para las aguas subterráneas comunes y se adapta eficazmente para su uso en mapas geohidroquímicos, facilitando comparaciones rápidas. Sin embargo, para aguas con concentraciones muy altas o muy bajas, el diagrama tiende a alargarse, por lo que es recomendable ajustar la escala, lo cual puede indicarse mediante un diagrama especial dentro del gráfico.

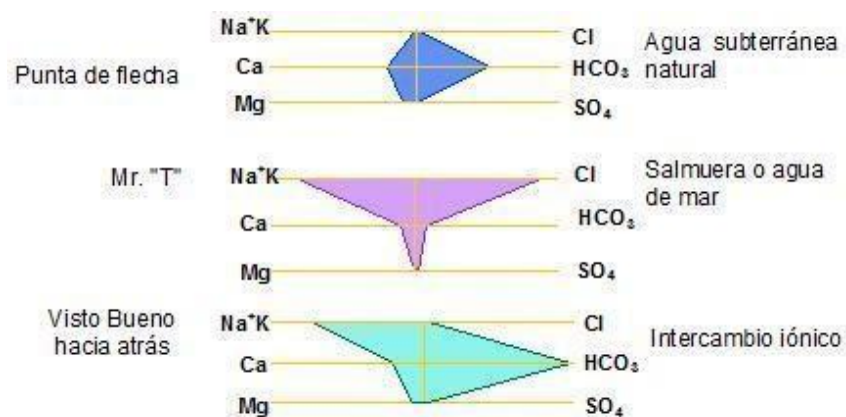


Figura 12. Diagrama de Stiff.

4.17.3 Secuencia de Chevorateb.

Hay una regla general que señala que las aguas subterráneas con un tiempo de residencia más corto en el subsuelo suelen ser principalmente bicarbonatadas, seguidas por las sulfatadas, mientras que las aguas que permanecen más tiempo en el acuífero tienden a ser cloruradas. Este proceso de evolución es conocido como la “secuencia de Chevorateb”, y en cuanto a la composición de cationes, existe una secuencia equivalente: Ca^{2+} , Mg^{2+} y a final el Na^{2+} . Esta secuencia está determinada por dos factores principales: la solubilidad y la disponibilidad de las distintas sales en el subsuelo.

Los carbonatos tienen una solubilidad considerablemente menor que los sulfatos, y estos últimos son menos solubles que los cloruros. Debido a esto, el límite de saturación se alcanza primero con los bicarbonatos, seguido por los sulfatos y, finalmente, con los cloruros.

La abundancia se relaciona con la posibilidad de que el agua interactúe con minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. Si desde el momento de su infiltración el agua interactuara simultáneamente con minerales que liberan todos esos iones, no se observaría la secuencia de Chevorateb. En su lugar, las aguas serían cloruradas desde el principio, ya que los cloruros son las sales más solubles (Toscano Reyes et al., 2019).

En las grandes cuencas se distinguen 3 zonas de profundidad:

- **Zona superior:** Flujo activo, con trayectos cortos y tiempos de permanencia que varían desde años hasta varias décadas, da lugar en esta área a aguas bicarbonatadas y con baja salinidad.
- **Zona intermedia:** En esta zona, un flujo subterráneo menos dinámico, con recorridos más extensos y tiempos de residencia que pueden ir desde varios cientos hasta miles de años, da lugar a aguas con mayor salinidad y contenido de sulfatos.

- **Zona inferior:** En esta región, el flujo extremadamente lento, con trayectos extensos y tiempos de residencia que van de miles a millones de años, da lugar a aguas con alta salinidad y predominio de cloruros.

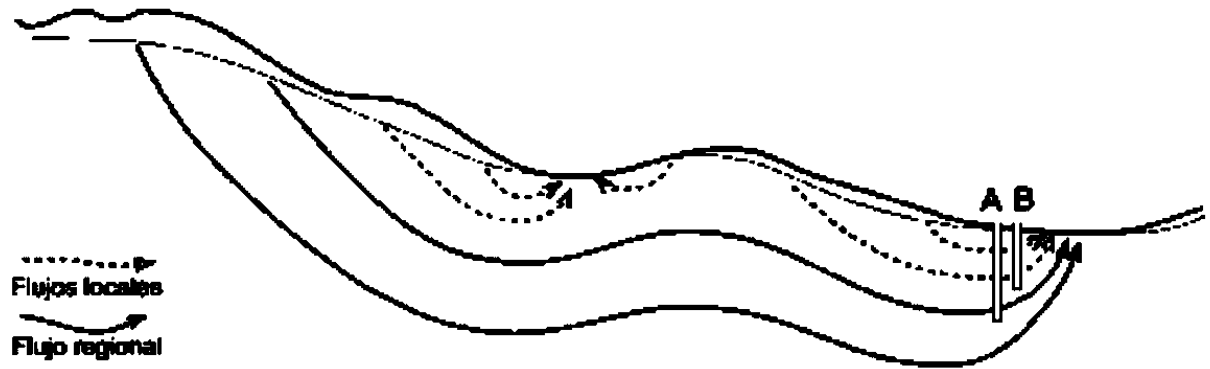


Figura 13. Zonas de profundidad de acuíferos.

Explicando la figura anterior, el sondeo A capta un flujo regional, mientras que el B intercepta un flujo local, de modo que su química en los sondeos puede ser diferente.

En los acuíferos formados por rocas carbonatadas, la facie más común es la bicarbonatada cálcica o la cálcica magnesiana, según la proporción de materiales calizos o dolomíticos presentes. La mineralización es usualmente baja, lo que hace que estas aguas sean adecuadas para abastecimiento y riego. Su pH se encuentra en un rango de 4 a 8, con una relación Na/Cl de 1 y una relación $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ mucho mayor que 1 (Toscano Reyes et al., 2019). Por lo tanto, las características del agua se deben a su interacción con las formaciones rocosas en las zonas de recarga, donde el movimiento del flujo es predominantemente vertical y descendente.

4.17.4 Diagrama de Durov.

El diagrama de Durov se basa en los porcentajes de miliequivalentes de los principales iones. Los cationes y aniones se representan en dos diagramas triangulares separados, y los datos se proyectan sobre una cuadrícula situada en la base de cada triángulo.

Los cationes determinan los parámetros del triángulo izquierdo. Por defecto, se utilizan los principales cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , aunque es posible elegir otros parámetros según sea necesario. Los aniones, por lo general, definen los parámetros del triángulo superior, los aniones predeterminados son Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- , pero también se puede optar por seleccionar otros parámetros diferentes si se requiere.

Dado que los puntos de datos se proyectan a lo largo de la base del triángulo, la cual está perpendicular al tercer eje de cada triángulo, la concentración del elemento ubicado en

el vértice (tercer elemento) no se representa en la cuadrícula. Ajustar la orientación de los parámetros en ambos triángulos puede facilitar la identificación de grupos diferentes de manera más clara. Además también el diagrama de Durov facilita la comparación directa de otros dos parámetros del agua subterránea, generalmente el pH y la concentración total de sólidos disueltos (TSD).

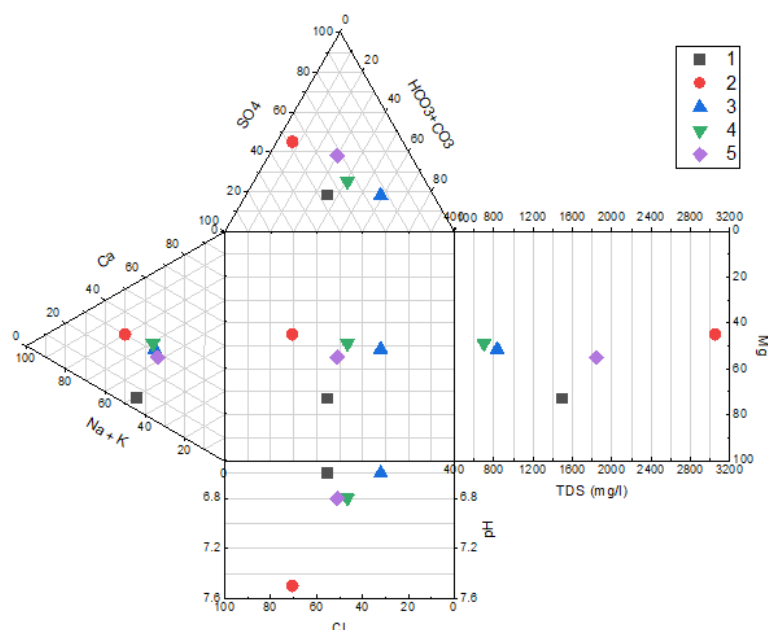


Figura 14. Diagrama de Durov.

4.17.5 Diagrama de Schoeller.

Schoeller (1962) diseñó diagramas semi-logarítmicos para representar los principales análisis iónicos en miliequivalentes por litro (meq/L), con el fin de mostrar distintos tipos de aguas hidroquímicas dentro de un mismo esquema. El número de análisis que se pueden representar simultáneamente está restringido debido a las líneas en el diagrama. En los diagramas de Schoeller, se representan los valores de diferentes aniones, cationes o su suma en miliequivalentes por litro (meq/L), empleando una escala logarítmica y uniendo los puntos mediante líneas consecutivas. El gráfico ofrece la ventaja de mostrar las concentraciones reales de los parámetros, a diferencia de los gráficos trilineales. Permite representar múltiples muestras en un solo diagrama para facilitar la comparación. Es ideal para analizar la evolución temporal del agua en un mismo punto y las variaciones en la composición de muestras de diferentes lugares. Además, resulta útil para mostrar tanto aguas de baja como de alta salinidad en un mismo diagrama, permitiendo observar la relación entre iones a través de la inclinación de las líneas.

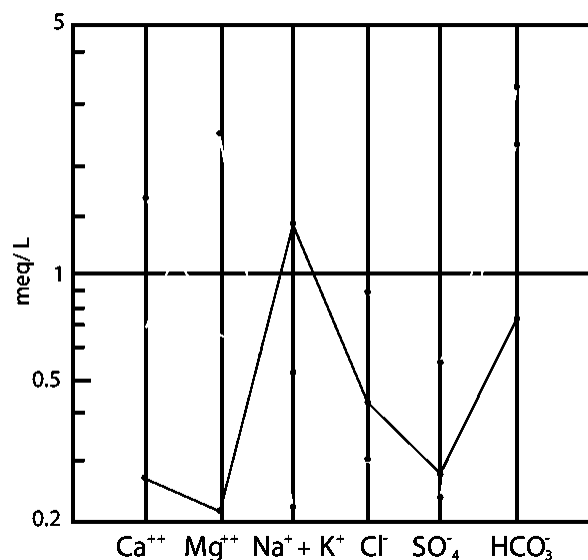


Figura 15. Diagrama de Schoeller.

4.17.6 Diagrama de Gibbs.

Este concepto facilita el análisis de los procesos que ocurren dentro del acuífero, donde la composición química de las aguas superficiales y subterráneas está determinada por tres factores principales: la lluvia (en términos de precipitación e infiltración), el proceso de intemperismo (que involucra la interacción entre el agua y las rocas), y el dominio de evaporación y cristalización, donde la temperatura juega un papel clave como factor determinante (Gaikwad et al., 2020). Asimismo, su gráfico se construye representando en el eje Y la concentración de SDT, mientras que en el eje X se plasman las dos relaciones de cationes y aniones, según se detalla a continuación:

$$\frac{Na^{+}+K^{+}}{Na^{+}+K^{+}+Ca^{2+}} \text{ O } \frac{Cl^{-}}{Cl^{-}+HCO_{3}^{-}}$$

Ecuación 15



Figura 16. Diagrama de Gibbs (Cationes).

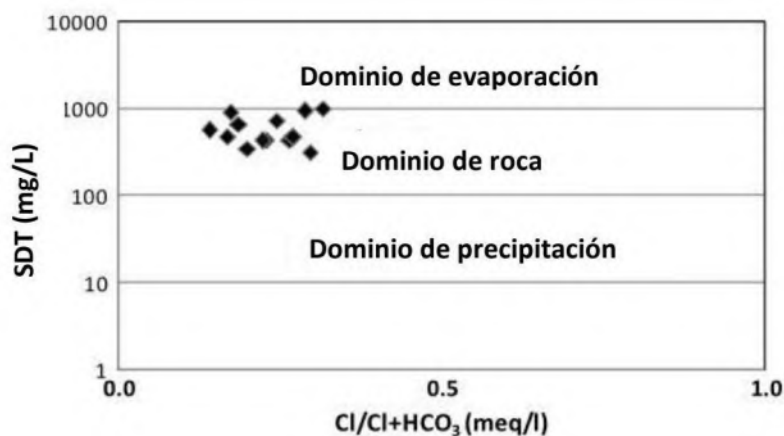


Figura 17. Diagrama de Gibbs (Aniones).

4.18 Relaciones hidrogeoquímicas.

El origen y las interacciones entre el agua y las rocas son evaluadas mediante relaciones hidrogeoquímicas, el movimiento y dirección de las aguas del subsuelo se establecen por la concentración de sales disueltas totales. Estas relaciones son fundamentales para identificar el origen de la composición de las aguas subterráneas. Además, facilitan la comprensión de las reacciones fisicoquímicas que influyen en las aguas subterráneas durante su recorrido desde las áreas de recarga. Las relaciones calculadas fueron las siguientes: rNa^+/rCl^- , rNa^+/rK^+ , rMg^{2+}/rCl^- , rCa^{2+}/rMg^{2+} , rCa^{2+}/rSO_4^{2-} , $rHCO_3^-/rCl^-$ ($r=meq/L$).

- **Relación rNa^+/rCl^- .**

El valor de esta relación está relacionado con los procesos de cambio de bases, dado que el ion cloruro no interactúa significativamente con el terreno, mientras que el ion sodio sí lo hace. Además, la meteorización de ciertos silicatos puede influir en el valor de esta relación, ya que estos minerales podrían liberar sodio al agua. Si el valor de la relación es mayor a 1, se puede inferir que el Na^+ proviene de una reacción de intemperismo con silicatos. En el agua subterránea, esta relación presenta valores más elevados, llegando a un promedio de 1.1.

- **Relación rNa^+/rK^+ .**

En aguas dulces, los valores más comunes de esta relación suelen oscilar entre 2 y 250. De manera general, en el agua subterránea se aprecia que conforme incrementa la salinidad, también aumenta el valor de esta relación. Los valores más elevados de esta relación pueden ser interpretados a través de la interacción entre el agua y la roca, donde, como resultado de la alteración de los silicatos, se produce una preferencia por la adsorción del K^+ en los minerales alterados. Un valor bajo de esta relación permite identificar zonas de alta temperatura o áreas de migración directa, mientras que un valor

alto puede indicar trayectorias indirectas que favorecen las interacciones agua-roca o los procesos de enfriamiento (Toscano Reyes et al., 2019).

Esta relación está influenciada por la composición de la roca, reduciéndose cuando la acidez de la roca aumenta. En términos generales, a mayor salinidad del agua, más alta es la relación, debido a que el K^+ tiene una menor solubilidad y una mayor adsorción selectiva en comparación con el Na^+ . En aguas subterráneas, cuando no hay contaminación agrícola causada por un exceso de fertilizantes con sales de potasio, el valor de esta relación suele ser siempre mayor a 1.

- **Relación rMg^{2+}/rCl^- .**

Esta relación es útil para analizar la posible combinación entre agua de origen meteórico y agua marina. No obstante, el análisis de esta relación debe realizarse con cautela, ya que podría haber aportes de magnesio al agua debido a la alteración de silicatos magnésicos (Custodio & Llamas, 2001). Cuando el valor de esta relación excede 1, se evidencia el efecto de la interacción agua-roca, indicando una mayor aportación de magnesio al agua, esto como resultado de la alteración de silicatos que contienen magnesio.

- **Relación rCa^{2+}/rMg^{2+} .**

Esta relación indica que los puntos con un valor igual a 1 representan aguas subterráneas influenciadas por la disolución de dolomita. Cuando la relación se encuentra entre 1 y 2, está vinculada a la reacción con la calcita. En aguas subterráneas donde esta proporción supera el valor de 2, la causa principal es la disolución de minerales de silicato, que liberan Mg^{2+} al agua.

- **Relación rCa^{2+}/rSO_4^{2-} .**

Los valores bajos de esta relación indican una disminución de calcio, que puede ser resultado de su precipitación como carbonato de calcio o de procesos de intercambio iónico. Estos procesos ocurren con mayor frecuencia en aguas subterráneas someras que en las de mayor profundidad. Por otro lado, las muestras con relaciones más altas de Ca^{2+}/SO_4^{2-} indican que el calcio se ha añadido al agua debido a la meteorización de minerales ricos en calcio que no son yeso (Salem & Osman, 2017).

- **Relación $rHCO_3^-/rCl^-$.**

Los valores elevados de esta relación son más comunes en aguas subterráneas frías, ya que indican un flujo de agua de corta distancia y circulación rápida. En cambio, cuando los valores son bajos o muy bajos, se asocia con aguas termales, las cuales provienen de trayectorias de flujo más largas y profundas, lo que sugiere una circulación más lenta y profunda en el subsuelo (Cuoco et al., 2010).

4.19 Índice de calidad del agua subterránea.

El Índice de Calidad del Agua Subterránea (ICA) consiste en la integración de múltiples parámetros que evalúan la calidad del agua, proporcionando una visión más precisa y representativa del estado real del recurso hídrico en una determinada área (MacHiwal et al., 2011). Este índice fue desarrollado por Brown et al. (1970) y mejorado en 1975 por Deininger. Este método es ampliamente aplicado a nivel global para analizar la calidad del agua subterránea, ya que permite representar de manera integral la información sobre sus características. Asimismo, constituye una de las herramientas más eficaces al incluir parámetros clave para la evaluación y gestión de este recurso (Sadat-Noori et al., 2014).

El procedimiento de cálculo consta de las siguientes etapas:

1. Etapa 1.

En la fase inicial del análisis, se asigna un peso específico (w_i) a cada uno de los 13 parámetros evaluados (pH, SDT, Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , dureza, F^- , NO_3^- y N-NH_3) considerando su impacto en la salud. Los parámetros con mayor relevancia en la calidad del agua, como los sólidos disueltos totales, nitratos, cloruros y sulfatos, reciben el peso máximo de 5 (Saravanan et al., 2015). A los demás parámetros como pH, HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , dureza, F^- , y N-NH_3 se le asigna un peso entre 1 y 5 dependiendo de su importancia en la calidad general de agua potable (Toscano Reyes et al., 2019).

Tabla 18. Ponderaciones de los parámetros para evaluar el índice de Calidad del Agua.

Parámetros	Peso (w_i)	Peso relativo (W_i)
pH	4	0.089
SDT	5	0.111
Cl^-	3	0.067
SO_4^{2-}	5	0.111
Na^+	3	0.067
K^+	2	0.044
HCO_3^-	1	0.022
Ca^{2+}	3	0.067
Mg^{2+}	3	0.067
NO_3^-	5	0.111
Dureza	4	0.089
F^-	5	0.111
N-NH_3	2	0.044
TOTAL	45	1

2. Etapa 2.

En la segunda fase o etapa 2, se calculó el peso relativo (W_i) de cada parámetro utilizando la fórmula del método del peso aritmético, según lo propuesto por Brown et al. (1970) y Horton (1965), mediante la siguiente ecuación:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_i^n w_i}$$

Ecuación 16

Donde:

W_i : Peso relativo.

w_i : Peso de cada parámetro.

n : Número de parámetros.

3. Etapa 3.

En la tercera etapa, se determinó una escala de valoración de la calidad para cada parámetro (q_i). Para ello, la concentración obtenida de cada muestra de agua analizada se comparó con su respectivo límite máximo permitido según la NOM-127-SSA1-1994 (J. A. Sánchez et al., 2016). Luego, el valor resultante se multiplicó por 100 para obtener la escala correspondiente, la siguiente ecuación corresponde a la etapa 3:

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \times 100$$

Ecuación 17

Donde:

q_i : Calificación de calidad.

C_i : Concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua.

S_i : Concentración de los estándares establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y por la OMS.

Tabla 19. Límites máximos permitidos por estándares nacionales o internacionales.

Parámetro	Estándar NOM-127-SSA1-1994	Estándar OMS
pH	6.5-8.5	6.5-8.5
SDT	1000	1000
Cl ⁻	250	250
SO ₄ ²⁻	400	250
Na ⁺	200	200
K ⁺	-	12
HCO ₃ ⁻	-	120
Ca ²⁺	-	75
Mg ²⁺	-	50
NO ₃ ⁻	10	45
Dureza	500	500
F ⁻	-	10
N-NH ₃	0.5	1.5
TOTAL	45	1

Finalmente, para calcular el ICA se determinó el Sli usando la ecuación siguiente:4

$$Sli = Wi \times qi$$

Ecuación 18

Donde:

Sli: Subíndice de cada parámetro.

qi: Calificación de calidad.

Wi: Peso relativo.

$$ICA = \sum Sli$$

Ecuación 19

Los valores de ICA calculados suelen clasificarse en cinco categorías: excelente, bueno, pobre, muy pobre e inapropiado para el consumo humano (Sadat-Noori et al., 2014), como se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 20. Categorías del índice de Calidad del Agua.

Valor de ICA	Calidad del Agua
<50	Excelente
50-100	Buena calidad
100-200	Mala calidad
200-300	Muy mala calidad
>300	Agua no potable

5. Resultados

5.1 Caracterización de la zona de estudio.

La utilización de modelos digitales, junto con las diversas capas de información espacial integradas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilita la delimitación precisa de la zona de estudio y la generación de mapas temáticos correspondientes a los acuíferos analizados.

Los acuíferos en México desempeñan un papel fundamental en el suministro de agua dulce, constituyéndose como una fuente estratégica para el desarrollo socioeconómico y la sostenibilidad ambiental del país. Aunque México cuenta con una considerable disponibilidad de recursos hídricos, los mantos acuíferos subterráneos representan una proporción significativa de dicha disponibilidad, siendo esenciales para garantizar el acceso al agua en diversas regiones del territorio nacional.

La zona de estudio comprende dos acuíferos cuya extensión conjunta abarca un total de 5,026.27 kilómetros cuadrados, y estos acuíferos que serán objeto de estudio en el presente proyecto corresponden a los acuíferos Zamora y Cotija (clave 1608 para Zamora y 1622 para Cotija), ambos localizados dentro del territorio del estado de Michoacán. Esta área representa una unidad hidrogeológica de gran relevancia, tanto por su función en la recarga y almacenamiento de recursos hídricos subterráneos, como por su contribución al abastecimiento de agua para diversos usos, el doméstico y sobre todo agrícola.

La siguiente imagen presenta, además de la ubicación geográfica de la zona de estudio, la localización de los acuíferos analizados, los cuales se sitúan en la región occidental de México, específicamente en el estado de Michoacán. El acuífero Cotija, con una superficie de 2,198.42 km², se localiza en la zona límite con el estado de Jalisco, como se aprecia en la Figura 18, donde se observa su emplazamiento en la porción occidental de Michoacán. Por su parte, el acuífero Zamora abarca una extensión de 2,827.85 km² y se encuentra localizado hacia la porción nororiental del estado.

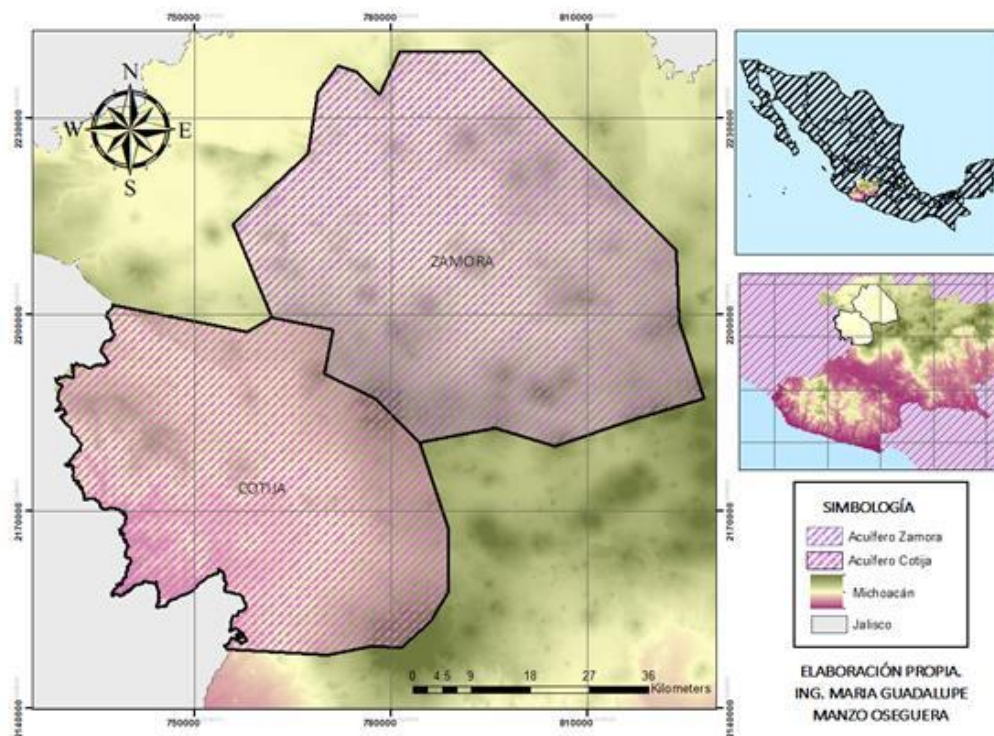


Figura 18. Localización de la zona de estudio.

La configuración topográfica influye directamente en el comportamiento hidrológico de la región, determinando el patrón de escurrimientos superficiales, la formación de cuencas y subcuencas, así como la dirección de los flujos hídricos hacia los cuerpos receptores, como ríos o acuíferos. Además, condiciona el uso del suelo, la distribución de la vegetación y el asentamiento humano. El acuífero de Zamora desde el punto de vista fisiográfico, la región presenta un desnivel con la misma orientación que el río Duero, es decir, en dirección sureste-noroeste. Asimismo, los valles se disponen de manera escalonada, con una orientación predominante de noreste a suroeste. En particular, el Valle de Zamora se localiza a altitudes que oscilan entre los 1,530 y 1,600 msnm y también es una zona reflejada por rocas extrusivas conformadas por rocas basálticas y andesíticas. Este valle se encuentra asentado sobre una antigua cuenca lacustre así lo indica (CONAGUA, 2024). Mientras que el acuífero de Cotija, se localiza en la subprovincia fisiográfica de fosas tectónicas que integra el cinturón volcánico transmexicano con manifestaciones volcánicas de edad reciente, la principal característica tectónica del Eje Neovolcánico es la alineación predominantemente va de este a oeste, según (CONAGUA, 2024), estos fallamientos E-W han alcanzado profundidades significativas, lo que ha facilitado el ascenso del magma desde cámaras profundas y, en consecuencia, la emisión de grandes volúmenes de lava.

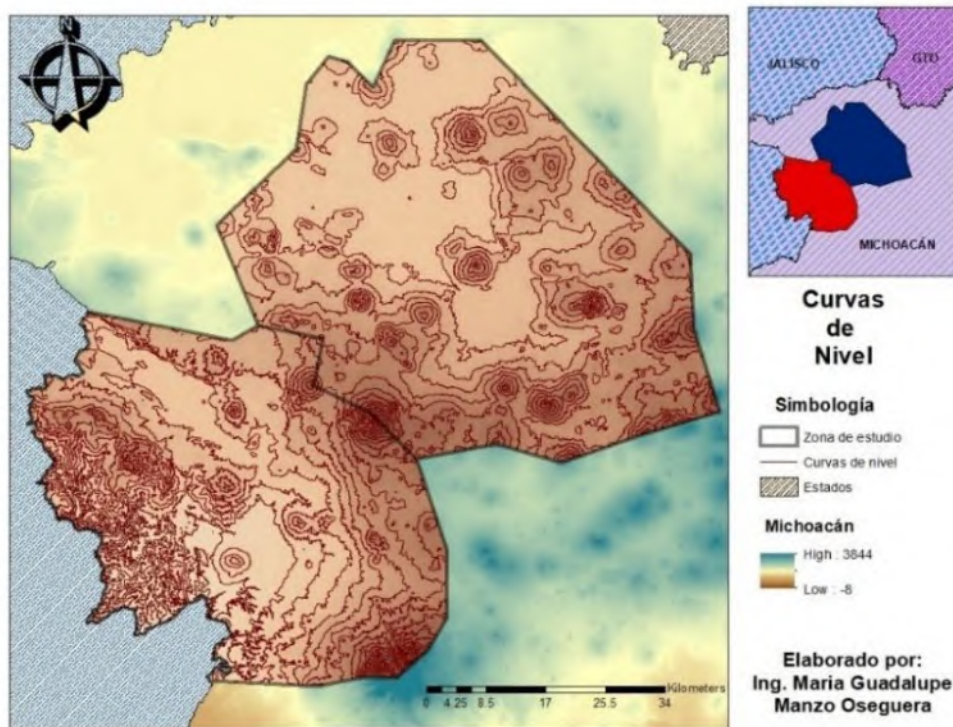


Figura 19. Topografía de la zona de estudio.

Es fundamental considerar como parte del análisis de la zona de estudio la totalidad de los municipios que ejercen influencia en el área de estudio, ya que su inclusión permite un análisis integral del área en términos administrativos, sociales y geográficos. De esta manera, en la siguiente figura se presentan los 24 municipios que intervienen dentro del ámbito geográfico analizado (Figura 20).

Estos municipios son: Peribán, Purépero, Tancítaro, Tangamandapio, Tangancícuaro, Tingüindín, Tlazazalca, Tocuambo, Uruapan, Villamar, Zacapu, Zamora, Charapan, Chavinda, Cherán, Chilchota, Churintzio, Cotija, Ecuandureo, Ixtlán, Jacona y Los Reyes.

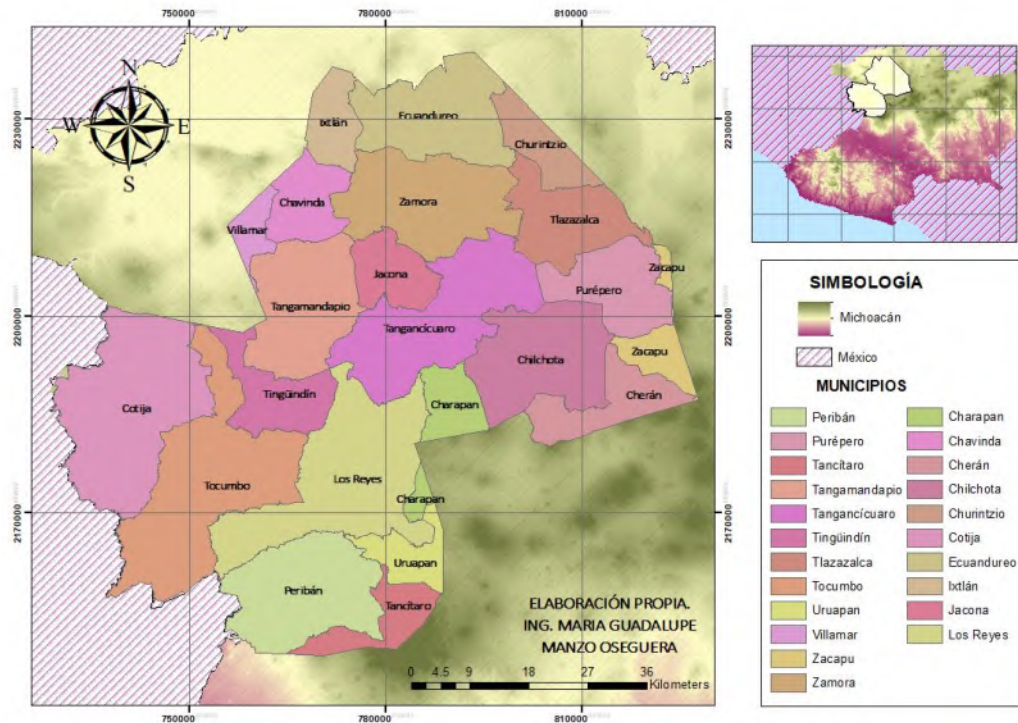


Figura 20. Municipios que abarcan la zona de estudio.

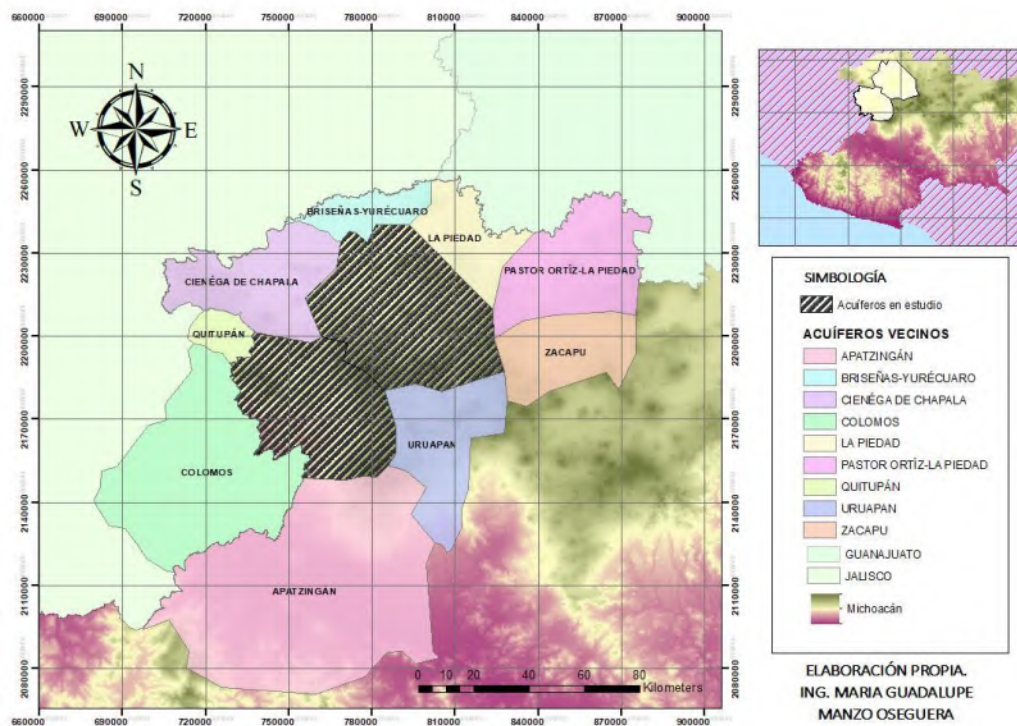


Figura 21. Acuíferos asociados a los estudiados.

El territorio mexicano alberga una amplia variedad de acuíferos distribuidos a lo largo de distintas regiones y entidades federativas. Cada uno de estos sistemas presenta características particulares, tales como su extensión, profundidad, capacidad de

almacenamiento y comportamiento hidrogeológico, lo que les confiere una dinámica específica en cuanto a su funcionamiento y aprovechamiento. El área de estudio está vinculada a un total de nueve acuíferos, a saber: Apatzingán, Briseñas-Yurécuaro, Ciénega de Chapala, Colomos, La Piedad, Pastor Ortiz-La Piedad, Quitupán, Uruapan y Zacapu (Figura 21). Cabe destacar que, en el contexto nacional, aproximadamente el 40 % del volumen total de agua concesionada para usos consuntivos tiene como fuente las aguas subterráneas, lo que resalta la relevancia de estos sistemas acuíferos para el abastecimiento y la gestión sostenible del recurso hídrico.

La precipitación media anual en la zona de estudio constituye un factor clave en el análisis hidrológico, ya que influye directamente en la disponibilidad de recursos hídricos superficiales y subterráneos. Según los registros analizados, la zona presenta una precipitación media anual de aproximadamente que va desde los 500 mm hasta los 1500 mm, distribuidos de manera desigual a lo largo del año (Figura 22).

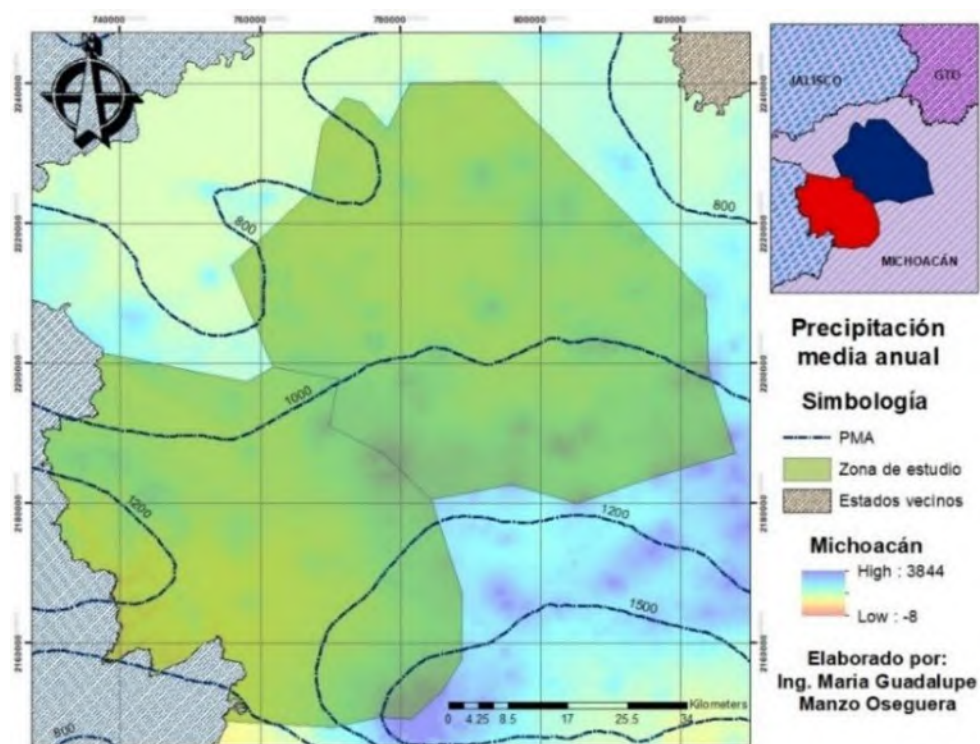


Figura 22. Precipitación media anual de la zona de estudio.

La precipitación media anual en la zona del acuífero de Zamora según (CONAGUA, 2023) oscila entre 750 y 1,200 mm, registrándose un valor promedio de 813.1 mm. Las precipitaciones más bajas se concentran particularmente en las áreas de menor altitud, mientras que los valores más altos se presentan en las zonas montañosas. El periodo de lluvias se extiende, en general, de mayo a septiembre, siendo julio el mes con mayor acumulación pluvial, alcanzando un promedio de 225 mm.

Mientras que la zona del acuífero de Cotija la temporada de lluvias en la región se extiende desde mayo hasta octubre, alcanzando su punto máximo en el mes de julio, mientras que los niveles más bajos de precipitación se presentan en febrero y marzo y se ha determinado una lámina de precipitación media anual de 871.6 mm en la zona. Según (CONAGUA, 2021) los factores como la orografía, la presencia de embalses artificiales y la dirección predominante de los vientos inciden significativamente en las cantidades de precipitación registradas en las estaciones meteorológicas de esta zona, y se identificaron ciclos de años con lluvias abundantes y años con escasa precipitación, con una periodicidad aproximada de 13 años.

Las regiones hidrológicas de México revisten una gran relevancia debido a la notable diversidad de ecosistemas y condiciones climáticas que caracterizan al país. Estas regiones comprenden agrupaciones de cuencas y sistemas fluviales que comparten atributos hidrológicos comunes, lo que permite su análisis y gestión de forma integral. El conocimiento detallado de las particularidades hidrológicas de cada región resulta esencial para prever situaciones de escasez o sobreexplotación del recurso hídrico, y para implementar estrategias orientadas a asegurar su disponibilidad para distintos usos como el abastecimiento poblacional, la actividad agrícola, industrial y otros sectores, especialmente en aquellas zonas con mayor vulnerabilidad.

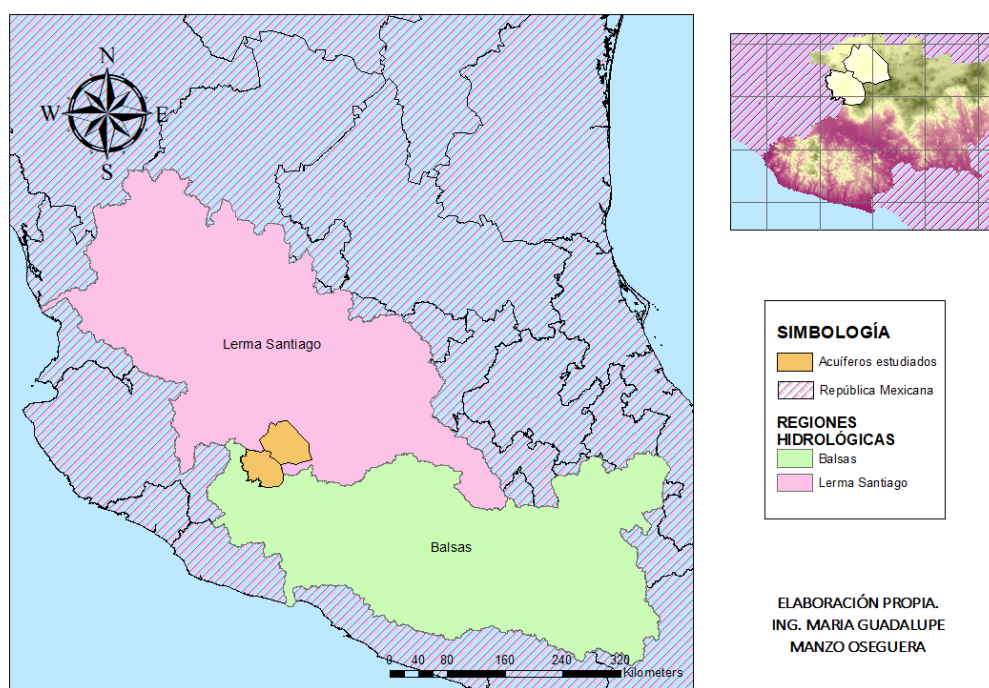


Figura 23. Localización de las regiones hidrológicas administrativas de la zona de estudio.

De este modo, se establece que la zona de estudio se ubica específicamente dentro de dos Regiones Hidrológico-Administrativas distintas (Figura 23). El acuífero de Zamora se localiza en la Región Hidrológica Lerma-Santiago. Por su parte, el acuífero de Cotija forma parte de la Región Hidrológica del Balsas, que abarca las cuencas de los ríos Balsas, Tepalcatepec, entre otros, en los estados de Michoacán, Guerrero y una porción del Estado de México.

Conocer la hidrografía es fundamental en el análisis de una zona de estudio, nos proporciona información detallada sobre la distribución y el comportamiento de los cuerpos de agua superficiales, tales como ríos, lagos y presas. Esto, nos permite identificar las principales corrientes de agua, su jerarquía, dirección de flujo y conectividad, aspectos esenciales para entender la dinámica hidrológica del territorio.

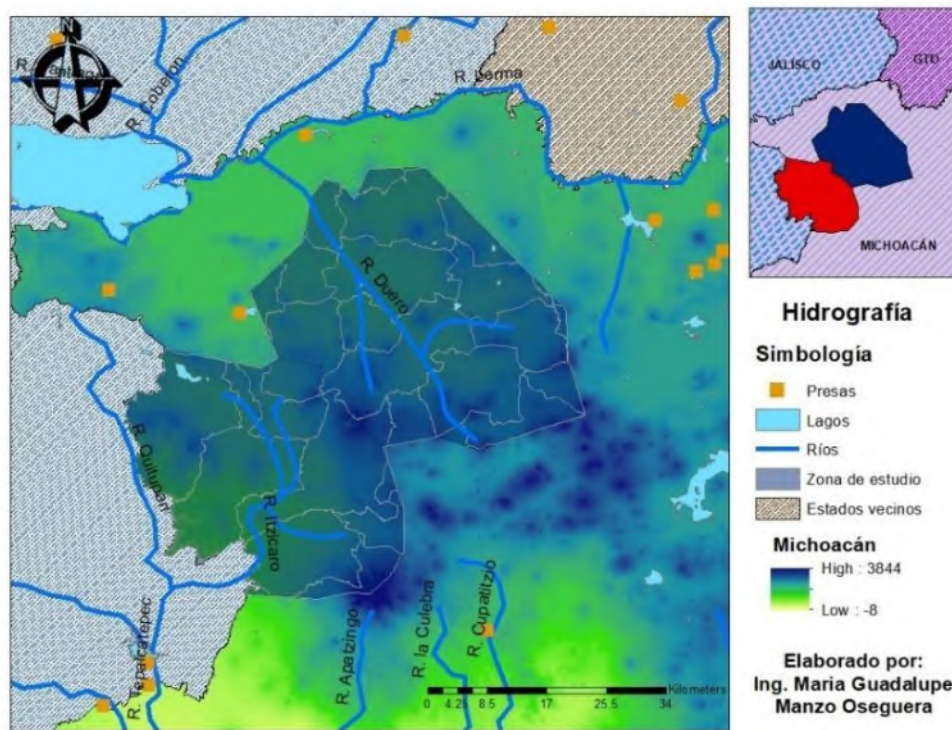


Figura 24. Hidrografía de la zona de estudio.

En la Figura 24, se muestra el río Duero, es el río importante de uno de los acuíferos de la zona de estudio, este, tiene su origen en el sector oriental del acuífero de Zamora, específicamente en las elevaciones conocidas como cerros El Tecolote y El Tule ubicados en el municipio de Zacapu. El cauce del río se origina a partir de la unión de los ríos El pejo, Tlazazalca y Chilchota. A partir de ahí, fluye a través del Valle de Zamora con dirección sureste a noroeste, atravesando la Ciénega de Chapala hasta confluir con el río Lerma. Su régimen hidrológico es perenne, ya que recibe aportaciones constantes a lo

largo del año, provenientes tanto de manantiales localizados al sur y este formados en formaciones basálticas como del acuífero subyacente del valle.

Dentro de la zona que abarca el acuífero de Cotija, el río más relevante es el Río Itzícuaru (Figura 24) ya que constituye el principal cauce superficial en esta región. Este río recoge escurrimientos locales y recorre una parte significativa del área de estudio, hasta finalmente confluir con el Río Tepalcatepec, uno de los ríos mayores de la región. Su presencia es clave para la dinámica hidrológica del acuífero, ya que contribuye al régimen de escurrimientos superficiales y puede influir en los procesos de recarga.

En la siguiente figura (Figura 25) se presenta el comportamiento de los escurrimientos superficiales en la zona de estudio los cuales siguen trayectorias naturales influenciadas por la topografía y características del terreno. Estos escurrimientos convergen en los principales cuerpos de agua de la región, siendo los ríos Duero e Itzícuaru los principales receptores.

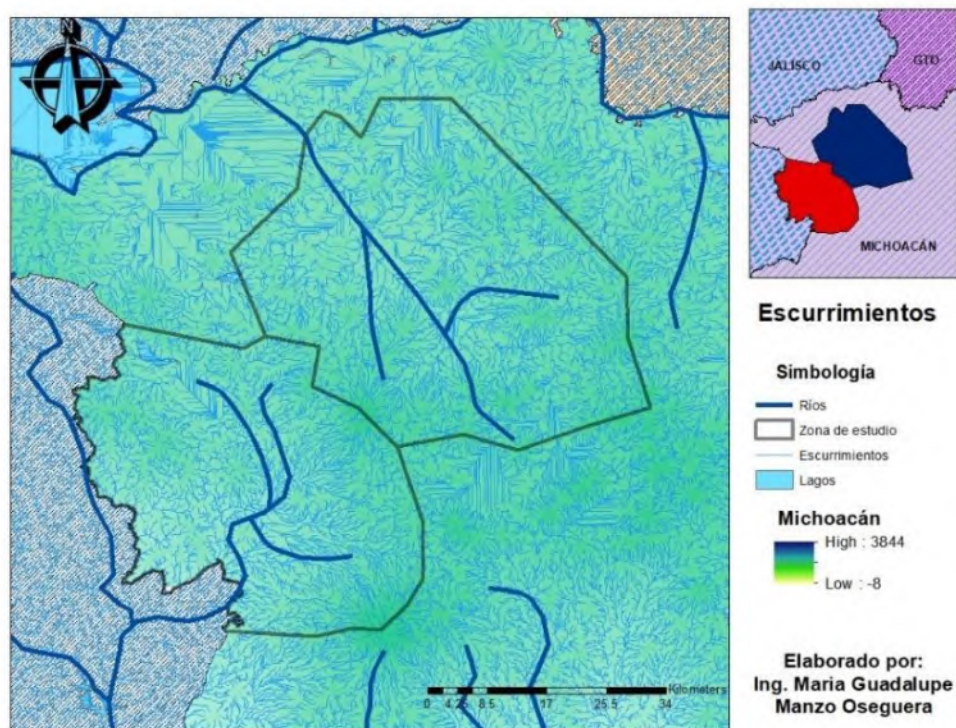


Figura 25. Escurrimientos superficiales de la zona de estudio.

Por la parte del acuífero de Zamora, una de las corrientes tributarias del Duero, es el Río Chilchota, que se origina en el Cerro El Tecolote, a su paso por la localidad de Carapan, recibe las descargas provenientes de manantiales. Posteriormente, al atravesar la Cañada de los Once Pueblos, el Duero continúa recibiendo aportaciones de aguas de manantiales. Más adelante, se incorporan a su cauce los escurrimientos originados en el Lago de Camécuaro, también, El río Tlazazalca constituye otra de las corrientes que dan

origen al río Duero. Su nacimiento se localiza en el cerro El Tule, y su confluencia con el río Chilchota ocurre en las inmediaciones de la localidad de Tangancícuaro.

Dentro del área del acuífero de Cotija, se identifican corrientes de relevancia, entre las cuales destaca el río Cotija, este río se forma a partir de los escurrimientos que descienden del cerro Los Cigarros.

Los distritos de riego (Figura 26) constituyen unidades administrativas diseñadas para gestionar de manera eficiente y equitativa el uso del recurso hídrico destinado al riego agrícola en una región determinada. Estos distritos son establecidos y regulados por las autoridades competentes en materia hídrica en México, y su funcionamiento se rige por un marco normativo y reglamentario específico que garantiza su adecuada operación.

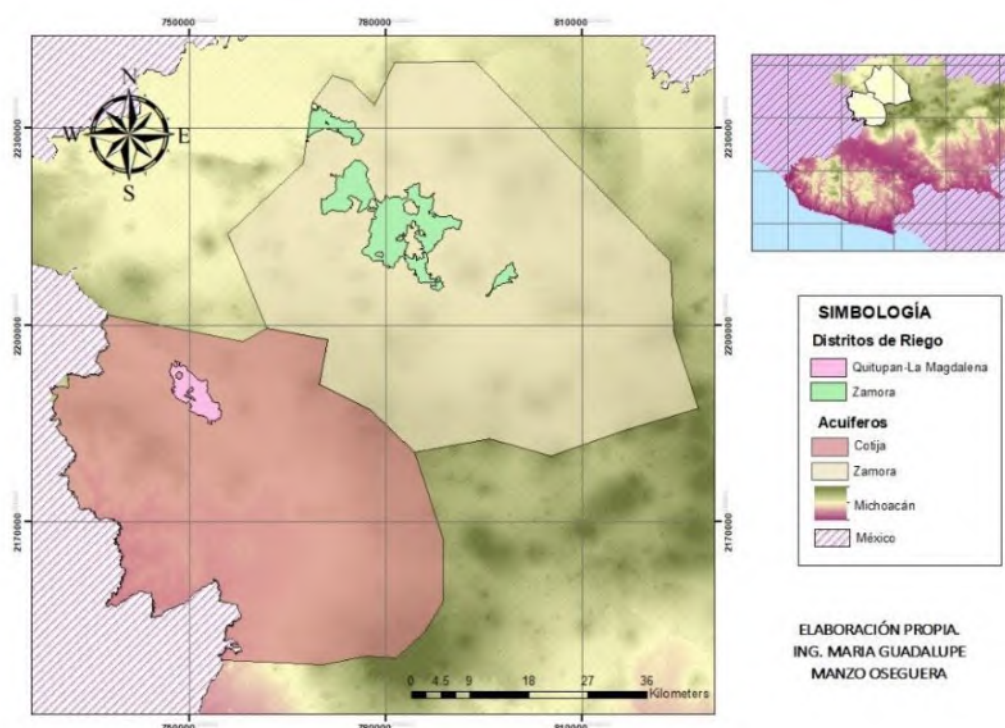


Figura 26. Distritos de riego en la zona de estudio.

La instauración de los distritos de riego tiene como propósito central optimizar la productividad agrícola y promover un uso eficiente del recurso hídrico, asegurando un suministro adecuado de agua para los cultivos en las áreas correspondientes. Estas entidades juegan un papel esencial en la gestión sostenible del agua destinada al riego, contribuyendo no solo al fortalecimiento del sector agrícola, sino también a la preservación del recurso hídrico y al impulso del desarrollo económico y social de las comunidades rurales involucradas.

En México existen un total de 86 Distritos de Riego, los cuales abarcan una superficie de riego de 2,585,937.84 ha y cuentan con 570,541 usuarios, según datos proporcionados por la Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola de la Conagua. En el estado de Michoacán, se encuentran ocho Distritos de Riego distribuidos a lo largo de su territorio, con una superficie superior a las 300,000 hectáreas. Estos distritos se dedican principalmente a la agricultura comercial orientada al mercado nacional, y algunos de ellos también a la exportación. Dentro de la zona de estudio, entre los acuíferos de Zamora y Cotija, se encuentran dos distritos de riego: el 061 Zamora y el 099 Quitupán-La Magdalena (Figura 26).

La mayor parte de la zona de estudio está conformada por rocas ígneas extrusivas y depósitos aluviales (Figura 27), las cuales se originaron por procesos volcánicos en los que el magma alcanzó la superficie terrestre y se enfrió rápidamente, estas rocas tienen una composición rica en minerales como olivino y piroxeno.

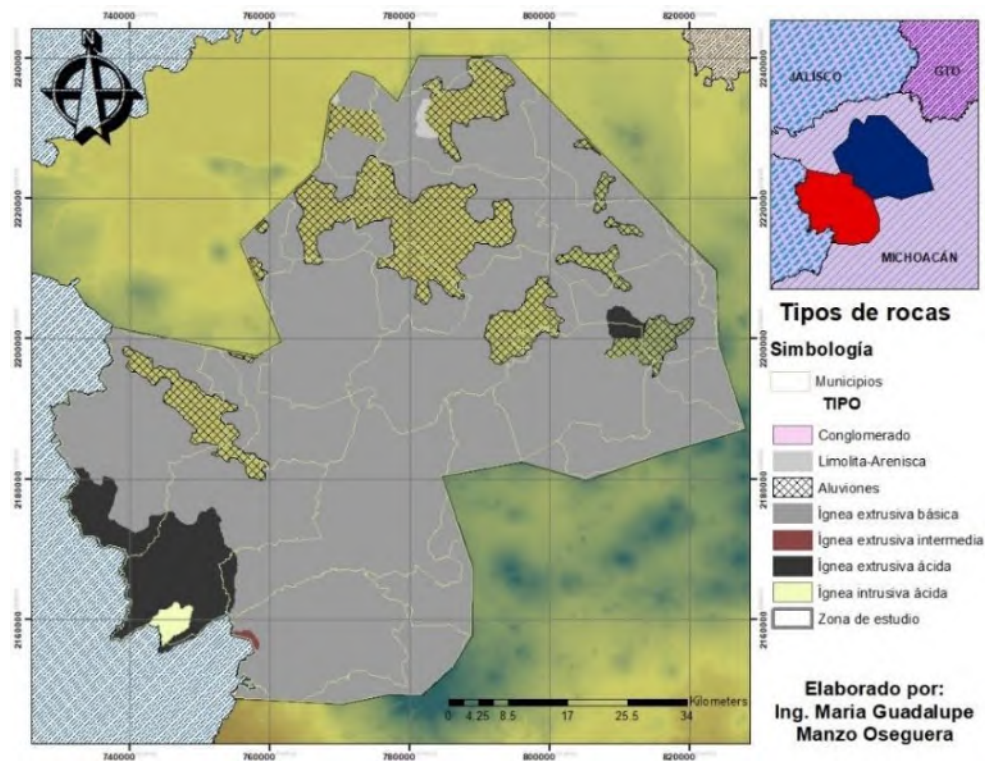


Figura 27. Tipos de rocas en la zona de estudio.

La presencia predominante de estas rocas en la zona tiene implicaciones importantes para el comportamiento hidrológico, ya que, si bien estas rocas pueden presentar una baja permeabilidad en estado masivo, su fracturación natural permite el desarrollo de cierta porosidad secundaria que facilita procesos de infiltración y recarga de acuíferos. Dentro de las rocas ígneas extrusivas se encuentran el basalto, que es la más representativa, es una roca de color oscuro, textura fina y muy abundante en regiones

volcánicas, la escoria volcánica que es una roca porosa y ligera, también de composición básica y también la toba basáltica que es una roca que material fue depositado por explosiones volcánicas.

El conocimiento de las formaciones geológicas presentes en una zona de estudio resulta fundamental (Figura 28), ya que aporta información esencial para comprender la geodinámica regional, el comportamiento hidrogeológico, los procesos geológicos activos y las características físicas del terreno. Una vez identificadas y delimitadas dichas unidades geológicas, es posible acceder a información detallada sobre sus propiedades hidrogeológicas. Esto permite una caracterización más precisa de cada formación, a la cual se pueden asignar parámetros hidrogeológicos relevantes como la conductividad hidráulica, la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento en función de su litología y estructura geológica.

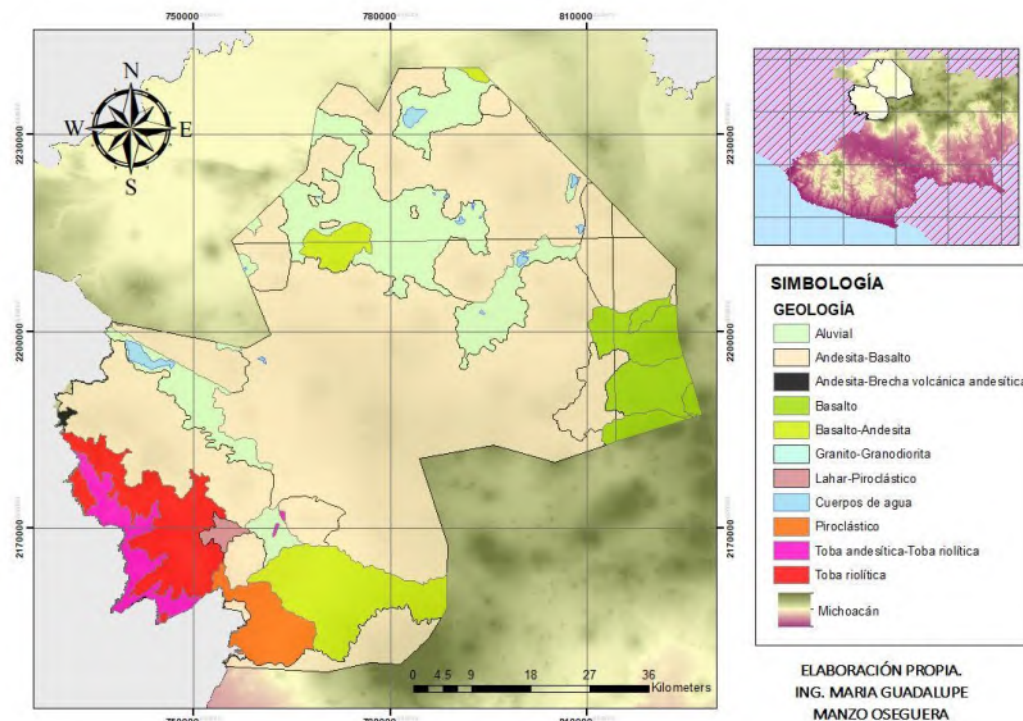


Figura 28. Masas geológicas que conforman la zona de estudio.

La delimitación de la zona de estudio se llevó a cabo mediante la vectorización de las cartas geológicas proporcionadas por el Servicio Geológico Nacional (2023). Las cartas empleadas en este proceso corresponden a las hojas E13-3, E14-1, F13-12 y F14-10, las cuales abarcan porciones de los estados de Jalisco, Michoacán y Guanajuato.

Al delimitar las áreas según su geología, obtenemos un enfoque más preciso y personalizado en el análisis de flujo de agua subterránea y la respuesta del acuífero ante distintos escenarios.

Una vez realizada la caracterización digital de las formaciones geológicas en la zona de estudio (Figura 28), se procede a identificar aquellas que se superponen con los acuíferos analizados. Este procedimiento permite delimitar con precisión el área de interés, la cual queda definida por un total de diez masas geológicas distintas, cuya presencia varía en extensión dentro del territorio, siendo algunas de ellas más representativas que otras en la superficie evaluada.

Tal como se aprecia en la figura 28, la mayor parte del área correspondiente a ambos acuíferos se encuentra sobre una misma unidad geológica predominante, compuesta por Andesita-Basalto. Esta formación corresponde a una roca ígnea con una composición intermedia entre la andesita y el basalto. Se trata de una roca de origen volcánico, generada a partir de procesos geológicos vinculados a la actividad volcánica, ya sea mediante erupciones explosivas o a través del enfriamiento de flujos de lava.

La andesita-basalto presenta una composición mineralógica que combina elementos característicos de ambos tipos de rocas (andesita y basalto). La andesita, clasificada como una roca volcánica de composición intermedia, se encuentra constituida principalmente por plagioclasas, hornblenda y, en menor proporción, minerales máficos como los piroxenos. En contraste, el basalto, considerado una roca volcánica máfica, está compuesto predominantemente por piroxenos y olivino. Esta combinación mineralógica refleja el origen mixto y la transición composicional entre ambas litologías.

En la figura 29 se presentan los tipos de suelo de la zona de estudio, destacándose en mayor proporción el vertisol, representado en color amarillo medio, y el andosol, indicado en color gris.

El Vertisol es un tipo de suelo caracterizado por su elevado contenido de arcilla y por su tendencia a formar grietas profundas y fisuras cuando se encuentra seco. La presencia de arcilla en su composición les confiere una textura pegajosa y cohesiva cuando están húmedos. Además, suelen ser ricos en nutrientes debido a la acumulación de materia orgánica y minerales, lo que los hace aptos para la actividad agrícola.

El andosol es un tipo de suelo de origen volcánico que se distingue por su alta fertilidad. Estos suelos se originan a partir de la descomposición de materiales volcánicos, como cenizas y lava, y son comunes en áreas cercanas a volcanes o en regiones con actividad volcánica reciente. Los andosoles poseen una excelente capacidad para retener agua y nutrientes, lo que les otorga una gran fertilidad. Gracias a estas propiedades, son suelos altamente aptos para la agricultura.

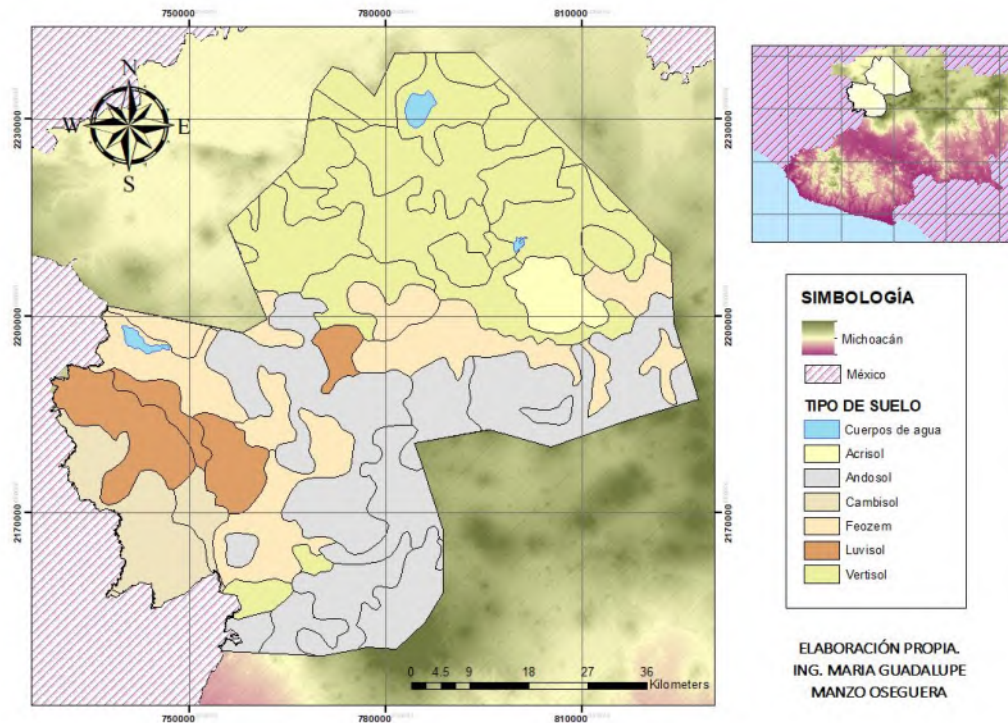


Figura 29. Tipo de suelo en la zona de estudio.

En la zona de estudio también se localizan áreas de menor extensión donde predominan suelos clasificados como Luvisol y Feozem. Aunque su distribución es limitada en comparación con los andosoles y vertisoles presentes en la región, su presencia es significativa desde el punto de vista edafológico. Los Luvisoles se caracterizan por la acumulación de arcillas en el horizonte subsuperficial, lo que puede afectar tanto la dinámica del agua como la disponibilidad de nutrientes. En tanto, los Feozems presentan un alto contenido de materia orgánica en el horizonte superficial, lo cual les confiere una elevada fertilidad natural.

En el siguiente mapa (Figura 30), se presentan los usos de suelo correspondientes a la zona de estudio, los cuales constituyen un elemento fundamental para el análisis territorial. La identificación de los distintos tipos de cobertura y uso del suelo es esencial, ya que permite comprender la interacción entre las actividades humanas y los recursos naturales, así como evaluar su impacto sobre procesos como la infiltración, el escurrimiento superficial y la disponibilidad hídrica.

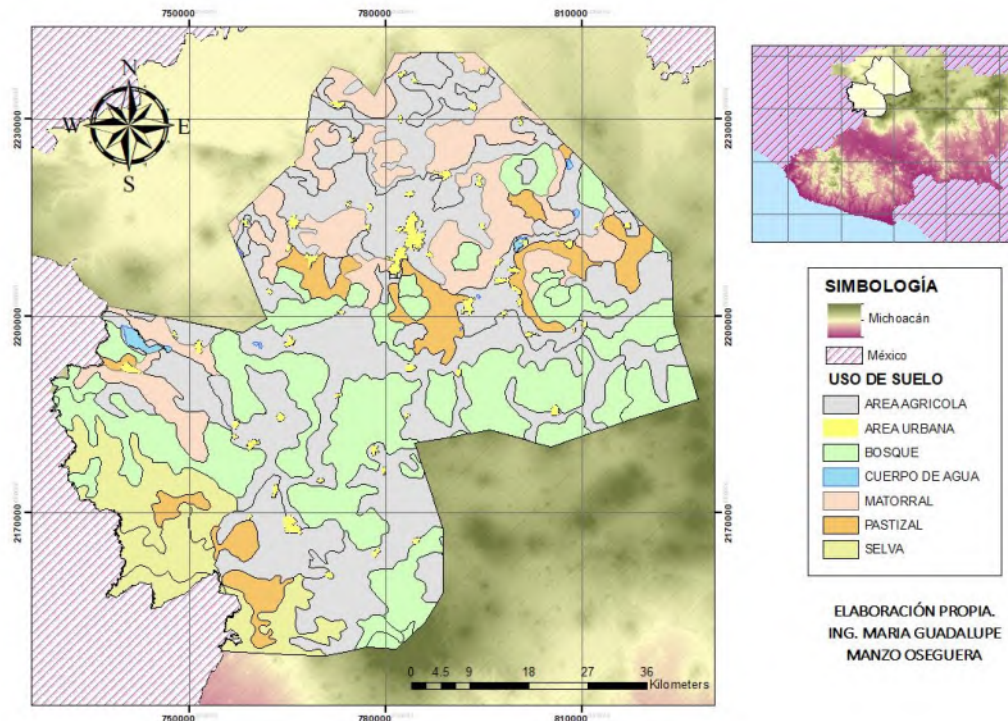


Figura 30. Uso de suelo en la zona de estudio.

El uso del suelo hace referencia a la manera en que se emplea la superficie terrestre para diversas actividades humanas, tales como la agricultura, la urbanización, la industria, la conservación de áreas naturales, entre otras. Constituye una descripción detallada de la asignación de las diferentes porciones de tierra para fines específicos.

La clasificación del uso del suelo es un proceso fundamental que implica la categorización y división del territorio en diversas clases o tipos de uso, con el propósito de comprender y gestionar de manera eficiente los recursos naturales y el espacio disponible.

Tal como se muestra en la figura 30, el uso del suelo predominante en la zona es agrícola, ocupando la mayor parte de la superficie, seguido por las áreas boscosas. Los bosques principales presentes en la región corresponden a los tipos de encino y encino-pino.

En la siguiente figura 31, se presenta la distribución de la cobertura vegetal en la zona. Del análisis de dicha figura, se observa que las coberturas predominantes corresponden a áreas destinadas a la actividad agrícola y a zonas boscosas (mencionado ya anteriormente).

Esto indica que gran parte del territorio está ocupado por terrenos utilizados para el cultivo (principalmente aguacate y berries), mientras que otra proporción significativa conserva formaciones vegetales naturales como son los bosques. Esta información es relevante para el entendimiento del uso del suelo y su relación con el balance hídrico, ya

que ambos tipos de cobertura influyen en procesos como la evapotranspiración, la infiltración y el escurrimiento superficial

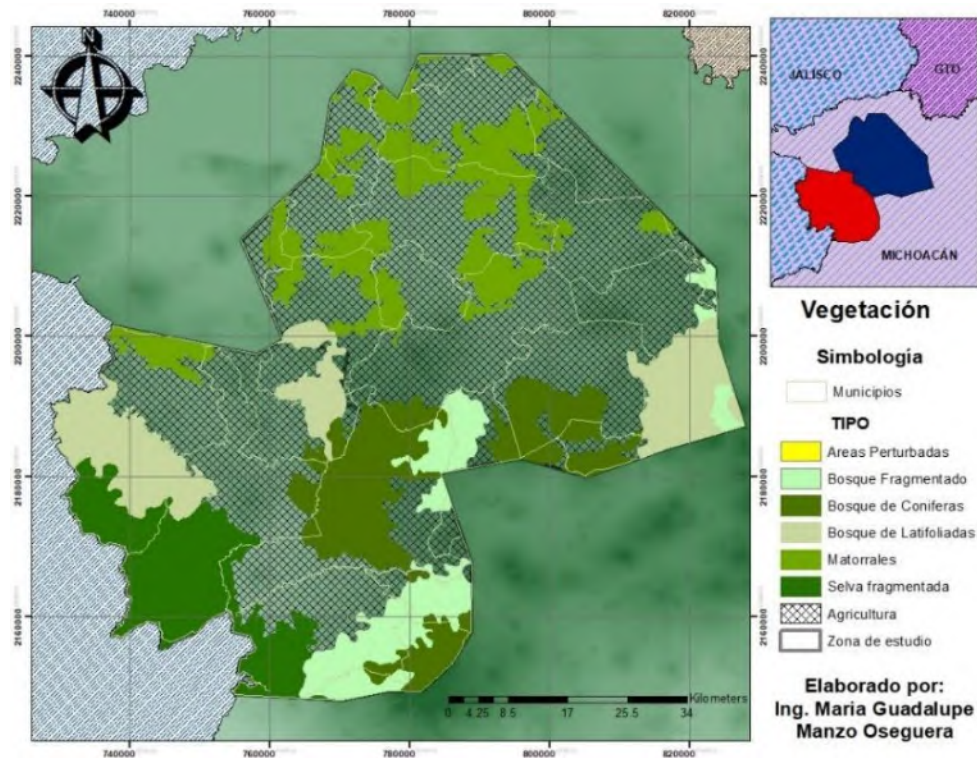


Figura 31. Mapa de vegetación de la zona de estudio.

Cabe señalar que la principal actividad económica asociada al uso del recurso hídrico en estas regiones es la agricultura, sector al cual se destina aproximadamente el 80 % del volumen total de agua concesionada en la actualidad.

5.2 Recopilación de datos para la modelación superficial.

La selección de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio se fundamenta en los resultados obtenidos a partir de las pruebas de consistencia las cuales fueron descritas en el capítulo de metodología. Al priorizar estaciones que presenten características de homogeneidad e independencia, se busca reducir al mínimo la incertidumbre asociada a los datos que se emplearán en el modelo, particularmente en lo que respecta a las series de precipitación y temperatura. Esta selección rigurosa asegura la calidad y confiabilidad de los datos de entrada, lo que, a su vez, contribuye a generar resultados más precisos y representativos dentro del análisis realizado.

Primero se identifican las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio (Figura 32), una vez identificadas las 115 posibles estaciones disponibles, se procede a realizar la selección de las estaciones principales, aplicando los siguientes criterios: Contar con al menos 25 años efectivos de registro, presentar un porcentaje de datos faltantes inferior

al 15%, estar actualmente en operación, lo cual es indispensable para su consideración y tener como último año de registro el 2009.

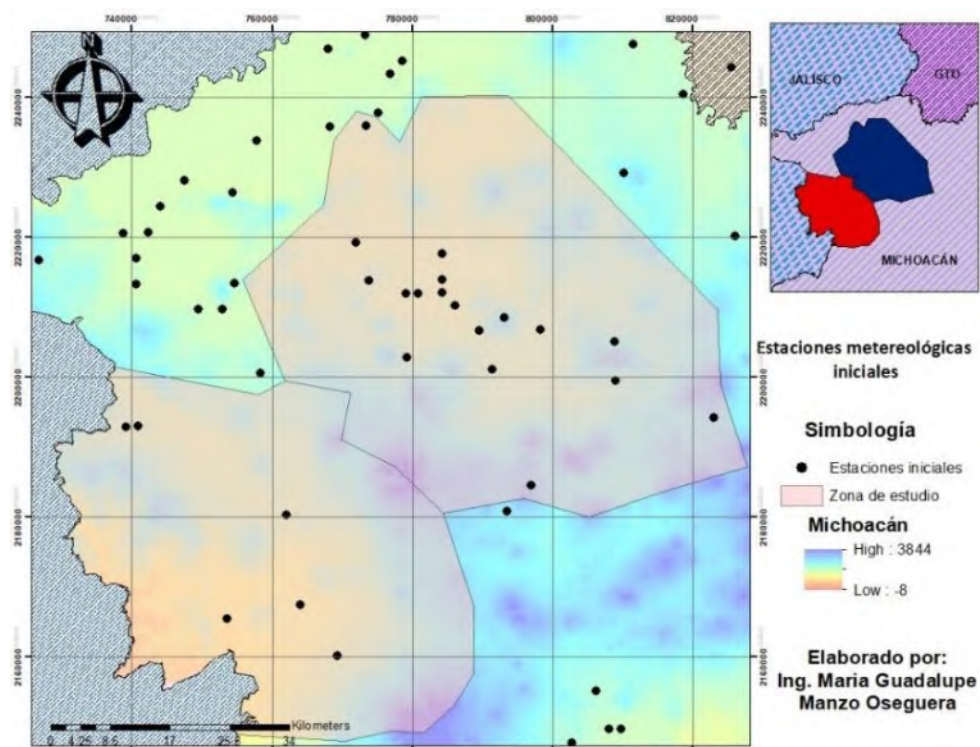


Figura 32. Estaciones meteorológicas iniciales en la zona de estudio.

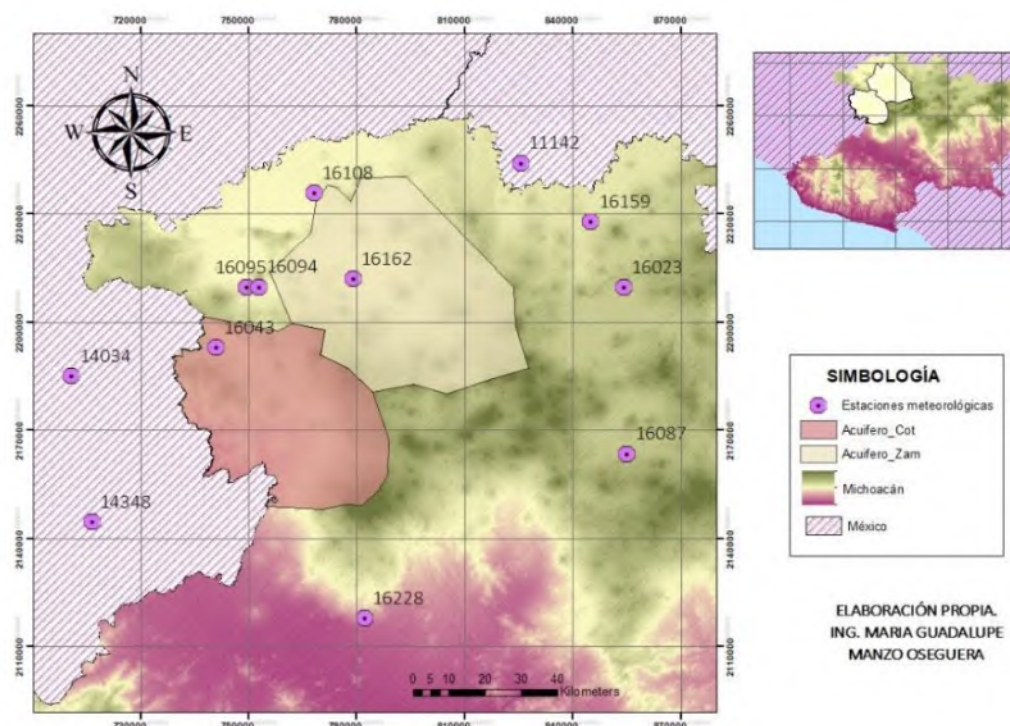


Figura 33. Estaciones meteorológicas principales.

A partir del conjunto de estaciones ya seleccionadas anteriormente, y la discretización, en total, se seleccionaron 12 estaciones meteorológicas (Figura 33) que presentan una vinculación directa con las cuencas objeto de estudio y que, adicionalmente, abarcan las cuencas definidas a partir de las estaciones hidrométricas seleccionadas en la región. Tal como se muestra en la siguiente tabla, únicamente se consideraron aquellas estaciones que cumplieron con los criterios de homogeneidad e independencia establecidos. En el proceso de selección, se sometieron a prueba 27 estaciones, habiéndose evaluado aproximadamente 113 estaciones dentro del área de estudio y mostradas en la figura 32.

En la siguiente tabla se especifican las estaciones principales:

Tabla 21. Estaciones principales.

N°	Codigo	Nombre	X	Y	Altitud
1	16159	El Rosario, Mich	217664.3068	2224834.711	1700
2	11142	El Cubo, Gto	301601.5081	2245821.436	1738
3	14348	Jilotlán, Jal	710025.1647	2146305.459	740
4	14034	Contla, Jal	688550.1333	2190353.04	1160
5	16087	Patzcuaro, Mich	227104.7088	2158220.717	2140
6	16023	Copandaro de Galeana, Mich	269679.7432	2201920.989	1840
7	16043	El Puerto, Mich	740944.6278	2190988.333	1640
8	16228	Acahuato, Mich	784087.717	2114083.721	227
9	16095	Presa Jaripo, Mich	751109.1851	2213280.804	1587
10	16094	Presa Guaracha, Mich	751109.1851	2213280.804	1580
11	16162	Orandino, Mich	782514.7636	2213759.18	1580
12	16108	San Cristobal, Mich	771699.9441	2235743.234	1530

En la tabla 22, se observa que la mayoría de las estaciones cumplen satisfactoriamente con las pruebas establecidas; sin embargo, algunas no superaron ciertos criterios de homogeneidad. En este contexto, fue necesario definir un criterio de aceptación para determinar la inclusión o exclusión de estaciones en el análisis. Para este estudio, se adoptó un criterio de moderación, permitiendo que una estación pudiera no cumplir hasta en dos pruebas de homogeneidad, siempre y cuando aprobara todas las pruebas de independencia. En caso de que una estación presentara tres fallos en homogeneidad o incumpliera alguna prueba de independencia, se consideró no apta y, por lo tanto, fue descartada del conjunto final.

Esta decisión metodológica se fundamenta en la limitada disponibilidad de datos climatológicos confiables en México, lo que obliga a establecer parámetros de selección más flexibles para aprovechar al máximo la información existente sin comprometer la calidad del análisis.

Tabla 22. Estaciones meteorológicas utilizadas para la modelación superficial.

Id	Secuencias	Helmert	T-Student	Cramer	Curva Masa	Límites de Anderson
16159	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
11142	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
14348	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
14034	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Independiente
16087	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
16023	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
16043	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
16228	Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	No Homogénea	Homogénea	Independiente
16095	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
16094	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
16162	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente
16108	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Independiente

Se construyeron polígonos de Thiessen para las estaciones meteorológicas principales (Figura 34), con el propósito de establecer la influencia espacial de cada estación sobre el área de estudio. Esta metodología permitió definir con precisión la relación entre las cuencas hidrográficas y las estaciones meteorológicas, identificando así cuál estación representa de manera más adecuada las condiciones climáticas dentro de cada cuenca.

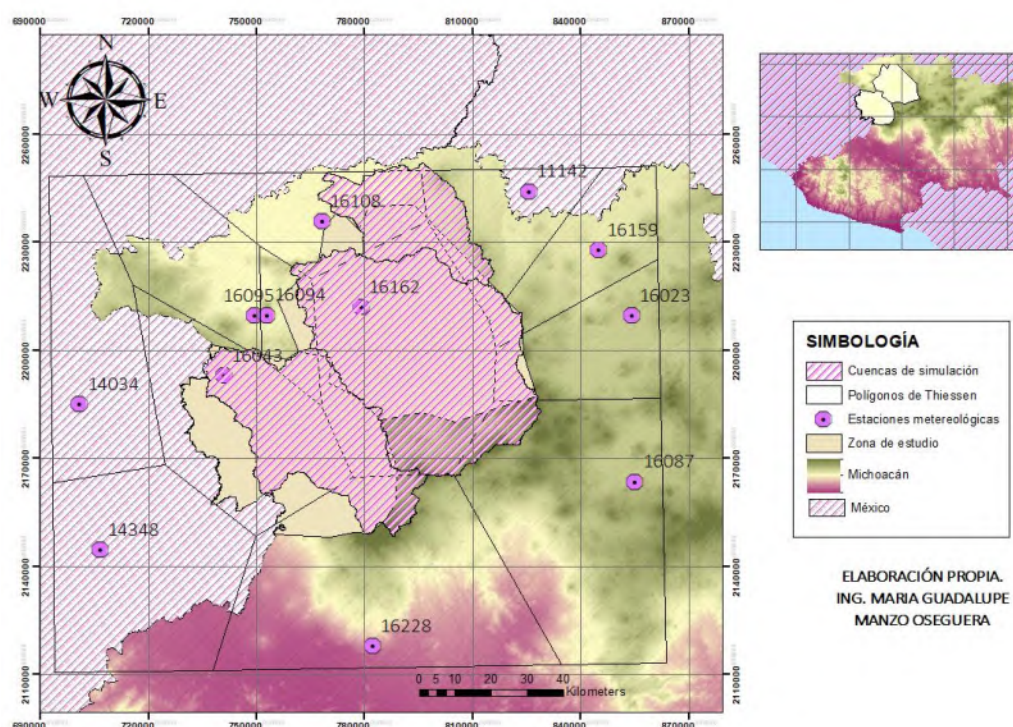


Figura 34. Polígonos de Thiessen para las cuencas de simulación.

A partir de las estaciones meteorológicas seleccionadas, se extrajeron las series históricas de precipitación y temperatura. Estas series presentaban datos incompletos, por lo que fue necesario aplicar métodos de estimación para su reconstrucción. Para la

precipitación, se empleó el método de ponderación por distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés), el cual asigna valores en función de la proximidad a otras estaciones con datos disponibles. En el caso de la temperatura, se utilizó el método de la media aritmética, considerando los valores registrados en estaciones cercanas. Estas técnicas permitieron completar las series de manera adecuada, garantizando la continuidad y calidad de los datos requeridos para el análisis y modelación en el presente estudio.

Es fundamental considerar que, aunque existan métodos para completar series de datos incompletas, lo ideal es contar con registros con el menor porcentaje posible de datos faltantes, ya que esto disminuye la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos en los modelos. Una vez que se ha realizado el proceso de llenado y verificación de las series de precipitación y temperatura, se da inicio a la etapa de modelación superficial. En esta fase del estudio, se incorporan al modelo los datos hidrometeorológicos previamente procesados. La tabla siguiente presenta la información específica que se introduce en cada modelo correspondiente a esta etapa.

Tabla 23. Información de entrada para el modelo superficial.

Modelo WEAP	Entradas
Soil Moisture Method (SMM)	Cuenca y punto de salida de la cuenca (Shape). Río principal (Shape). Relación entre área de la cuenca y uso de suelo. Series de precipitación. Series de temperatura. Latitud de la cuenca.

En el caso del modelo SMM, se incorpora la serie de temperatura para calcular la evapotranspiración mediante el método de Penman-Monteith, utilizando para ello el software WEAP. Este procedimiento permite generar distintas series de evapotranspiración correspondientes a los métodos empleados, lo que contribuye a un análisis comparativo y más preciso del comportamiento hidrológico en la zona de estudio. No obstante, la variación mensual promedio entre ambos métodos es de apenas 1.8 mm. Dado que esta diferencia resulta poco significativa y que no se cuenta con información clave para realizar el cálculo manual de la evapotranspiración mediante el método de Penman-Monteith, se ha optado por conservar dicha discrepancia y proseguir con el proceso de modelación sin mayores ajustes. Esta decisión se fundamenta en la minimización del impacto que dicha variación podría tener sobre los resultados del estudio. Dicha elección se justifica en razón de la ausencia de información necesaria para llevar a cabo una calibración más precisa del modelo. Además, la diferencia de 1.8 mm en los valores de evapotranspiración no representa un impacto significativo en los resultados globales del estudio, por lo que se considera aceptable mantenerla en el

análisis. Es relevante considerar que, en determinadas circunstancias, preservar una diferencia aceptable entre los métodos empleados puede constituir una práctica válida y justificada. Esta estrategia resulta pertinente cuando se presentan limitaciones en la disponibilidad de datos o restricciones en la capacidad para realizar cálculos de manera manual, siempre que dicha diferencia no comprometa la precisión ni la validez de los resultados del estudio.

5.3 Modelación Superficial.

Para la selección de las estaciones hidrométricas, se realizó un análisis espacial en la zona de estudio mediante la aplicación de un área de influencia (buffer). Como resultado de este procedimiento, se identificaron un total de 33 estaciones hidrométricas dentro del área delimitada (Figura 35). Sin embargo, únicamente 2 de estas estaciones se localizan en la cabecera de los ríos, lo que implica que operan bajo condiciones de régimen natural, es decir, sin alteraciones significativas por infraestructura hidráulica o usos antrópicos aguas arriba.

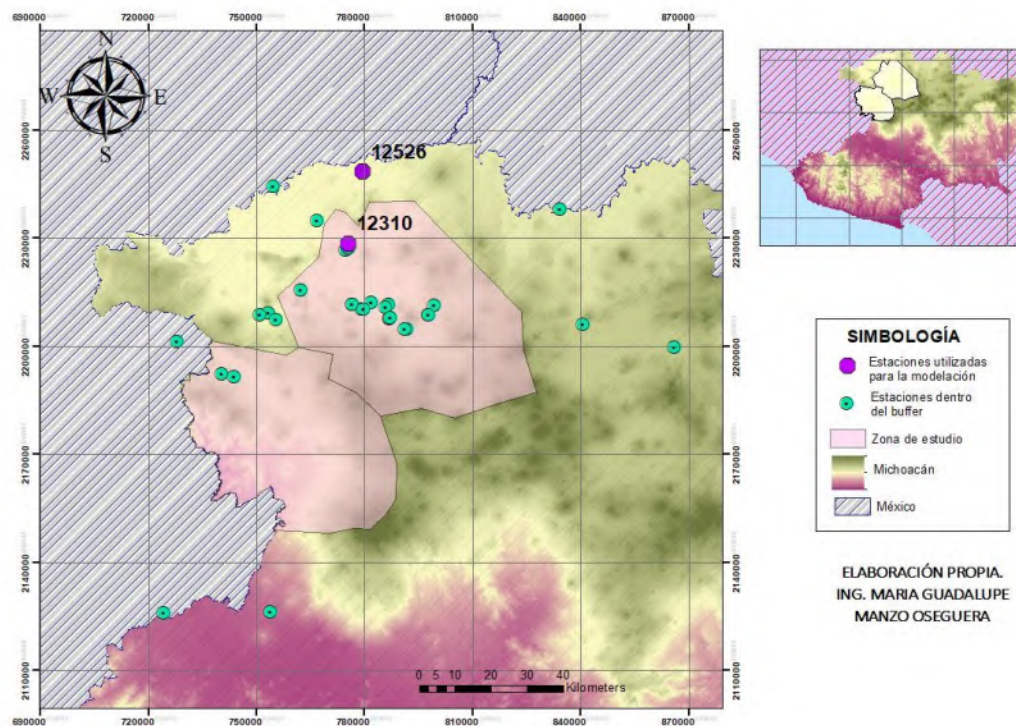


Figura 35. Estaciones hidrométricas localizadas en la zona de estudio.

Esta condición es fundamental, ya que permite obtener datos más representativos y confiables del comportamiento hidrológico natural. Por esta razón, solo estas dos estaciones fueron consideradas aptas para ser utilizadas en el proceso de modelación hidrológica. La selección se fundamentó en la necesidad de garantizar la calidad de los datos de entrada para lograr resultados más precisos y adecuados dentro del estudio.

Tal como se muestra en la figura 36, las cuencas seleccionadas para la modelación superficial, son las cuencas generadas por la estación hidrométrica 12526 y 12310. Estas cuencas fueron consideradas las más apropiadas para el estudio debido a su relevancia en el contexto de la modelación, y fueron las que se emplearon en el análisis hidrológico superficial del área de estudio.

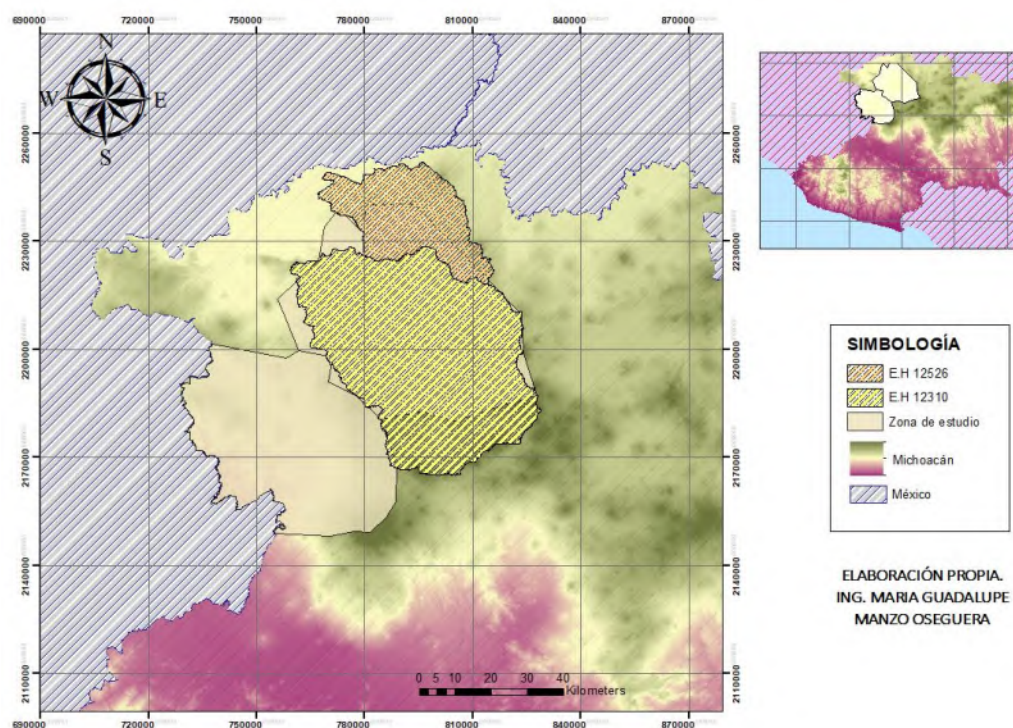


Figura 36. Cuencas de simulación a régimen natural.

La modelación hidrológica superficial se llevó a cabo mediante el uso del método de humedad del suelo (Soil Moisture Method, SMM) implementado en el software WEAP. Para este proceso, se incorporaron las dos cuencas hidrográficas mostradas en la figura 36, son las que cumplieron con los criterios técnicos requeridos para su inclusión en el estudio.

Dado que la zona de estudio no se encuentra completamente cubierta por las cuencas seleccionadas para la modelación, es necesario realizar el proceso de modelación de manera individual para cada cuenca. Posteriormente, se aplicará un análisis de similitud hidrológica que permita identificar y asociar cuencas representativas a las áreas no cubiertas, con el fin de extrapolar los resultados de manera coherente y fundamentada en condiciones hidrológicas comparables.

En una primera etapa, se procede a la calibración de la evapotranspiración correspondiente a la cuenca de estudio. Una vez concluida dicha calibración, se continúa con la calibración de los escurrimientos, tanto a través de un análisis gráfico como

mediante indicadores estadísticos. Estos procedimientos se desarrollan y exponen a continuación.

En la figura siguiente (Figura 37) se presentan los esquemas utilizados en el software de WEAP para llevar a cabo las modelaciones hidrológicas de cada cuenca. Estos diagramas ilustran la configuración del sistema modelado, incluyendo la delimitación de la cuenca, el cauce principal y la ubicación de la estación hidrométrica seleccionada para la calibración. Esta última se realiza a partir de la comparación de volúmenes mensuales de escurrimiento observados y simulados. También, se representan los componentes esenciales requeridos por WEAP, como las conexiones entre el río y la cuenca, y entre la cuenca y el acuífero. Estas relaciones permiten modelar de manera integral los procesos del ciclo hidrológico en la zona de estudio.

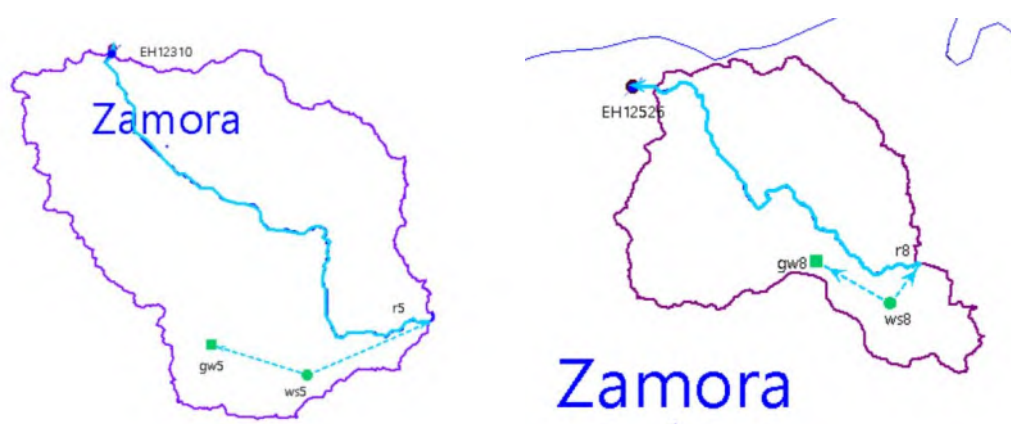


Figura 37. Esquemas de modelación de la Cuenca 5 y 8.

Como primer paso en el proceso de calibración para cada una de las cuencas, se plantea la evaluación de la evapotranspiración. Esta consiste en comparar los valores medios estimados mediante el método de Thornthwaite con los valores de evapotranspiración real calculados por el software WEAP. En la tabla siguiente se presentan los errores promedio, expresados en milímetros, correspondientes a cada una de las cuencas modeladas.

Tabla 24. Errores en la evapotranspiración.

Cuenca	Error (mm)	Evapotranspiración por Thorthwaite (mm)	Evapotranspiración por Weap (mm)
Cuenca 5 (12310)	-8.17	81.11	89.28
Cuenca 8 (12526)	5.55	84.90	79.35

Dentro de los nueve parámetros que pueden ajustarse en el entorno de modelación de WEAP, el coeficiente de cultivo (K_c) es empleado específicamente para calibrar la evapotranspiración. Es fundamental señalar que, una vez alcanzado un margen de error

aceptable que es inferior al 10%, este coeficiente se mantiene constante. Posteriormente, el proceso de calibración se enfoca en los escurrimientos, para lo cual se ajustan los parámetros RRF (factor de resistencia a la escorrentía), S_w (capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular) y K_s (root zone conductivity).

Los periodos establecidos para la calibración han sido definidos en función de la disponibilidad y calidad de la información hidrométrica existente. En consecuencia, se determinaron los siguientes intervalos de calibración para cada caso de estudio:

- Cuenca 5 (E.H. 12310): Periodo de modelación de 1972 – 1999 (27 años).
- Cuenca 8 (E.H. 12526): Periodo de modelación de 1986 – 2014 (28 años).

La primera cuenca a modelar es la cuenca 5 con estación hidrométrica (12310), y los resultados de la calibración obtenida en el modelo muestran un buen desempeño general ya que se tiene un comportamiento similar a los volúmenes observados. Los indicadores de bondad de ajuste son aceptables para catalogar el estudio como una buena calibración. No obstante, el valor ($\ln NSE$) fue significativamente bajo, lo que sugiere que el modelo presenta limitaciones para replicar los caudales bajos con precisión. Este comportamiento es común cuando existen datos con alta variabilidad en la magnitud de los caudales, especialmente en épocas de estiaje, donde pequeños errores en la simulación tienen un impacto considerable en este indicador.

A pesar de este resultado, el bajo valor del $\ln NSE$ no compromete la validez general de la calibración, ya que el resto de los indicadores muestran una alta confiabilidad.



Figura 38. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SSM para la cuenca 5 (12310).

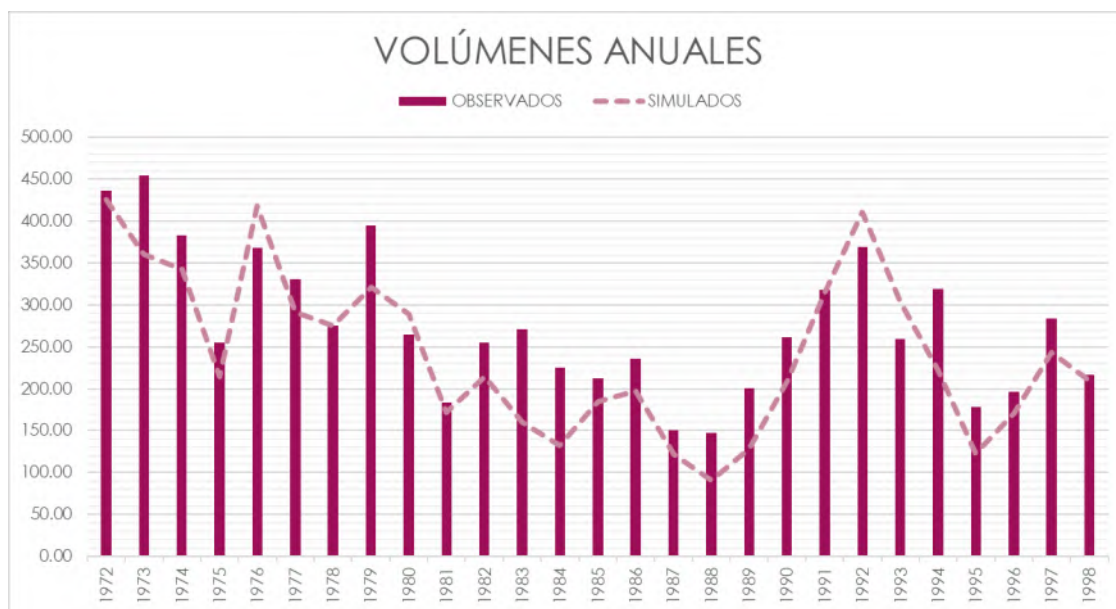


Figura 39. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 5 (12310).



Figura 40. Resultados de los volúmenes mensuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 5 (12310).

La segunda cuenca a modelada es la cuenca 8 con estación hidrométrica (12526), esta modelación se volvió un poco más compleja, a pesar de que tuvo mejores indicadores de ajuste, pero el modelo tiende a subestimar los valores mensuales de escurrimiento en comparación con las observaciones reales, particularmente en ciertos meses o eventos. Esta subestimación sistemática de esta cuenca sugiere que aún hay oportunidades para mejorar la calibración, especialmente en la magnitud de los flujos simulados, y se atribuye a que se podría estar omitiendo flujos de retorno o aportaciones adicionales que sí están presentes en la realidad.



Figura 41. Resultados de los volúmenes medios mensuales obtenidos con el SMM para la cuenca 8 (12326).

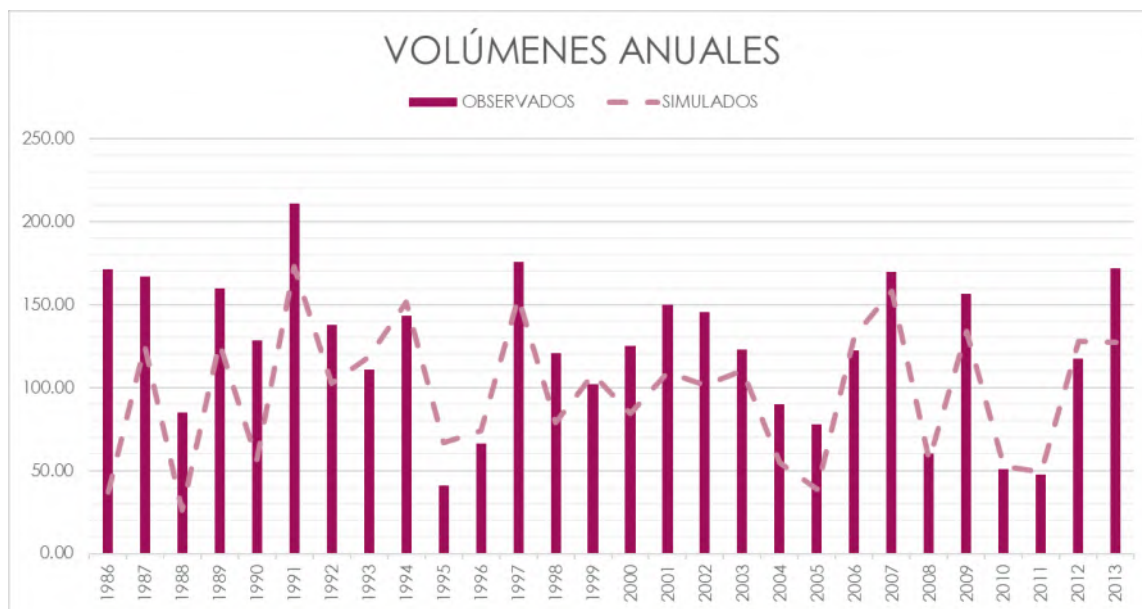


Figura 42. Resultados de los volúmenes anuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 8 (12326).

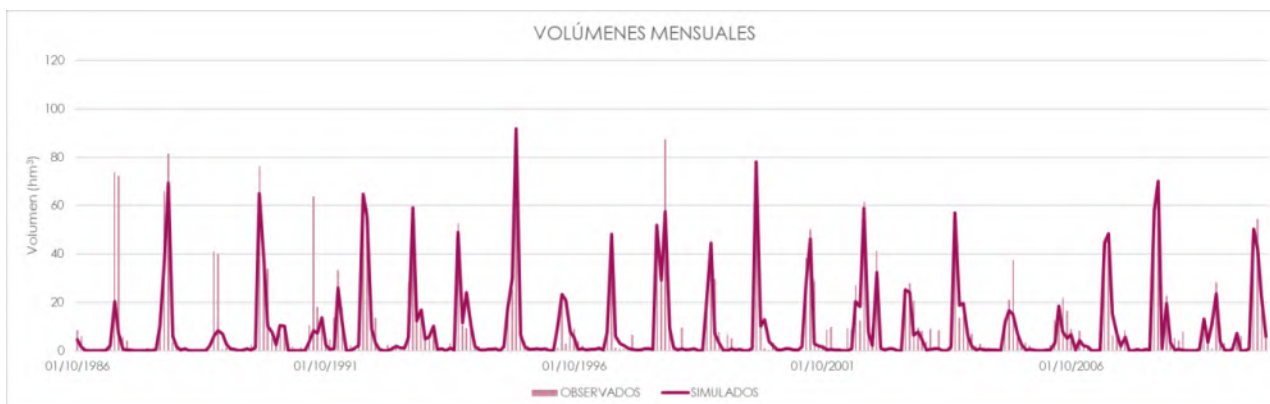


Figura 43. Resultados de los volúmenes mensuales obtenidos con el modelo SSM para la cuenca 8 (12326).

A continuación, se presenta una tabla que contiene los indicadores de bondad de ajuste correspondientes a las dos cuencas previamente modeladas y descritas. Los indicadores incluidos son fundamentales para determinar la precisión y confiabilidad de la simulación realizada en cada cuenca.

Tabla 25. Indicadores de ajuste obtenidos de la modelación con Weap.

Cuencas	Indicadores de ajuste			
	NSE	Ln NSE	r	Cs
Cuenca 5 (12326)	0.78	0.26	0.90	0.98
Cuenca 8 (12526)	0.77	0.52	0.88	0.92

5.4 Similitud hidrológica.

En el caso del acuífero de Cotija, no se dispone de una estación hidrométrica ubicada dentro de su área de influencia, lo cual imposibilita realizar una modelación hidrológica directa y precisa para dicha zona ya que no podemos comparar los datos observados y simulados. Ante esta limitación, se recurre al enfoque de similitud hidrológica, el cual consiste en llevar a cabo una comparación sistemática entre las zonas de interés, con el propósito de verificar que presentan similitudes desde el punto de vista hidrológico identificando una cuenca con características fisiográficas, climáticas y de uso del suelo similares.

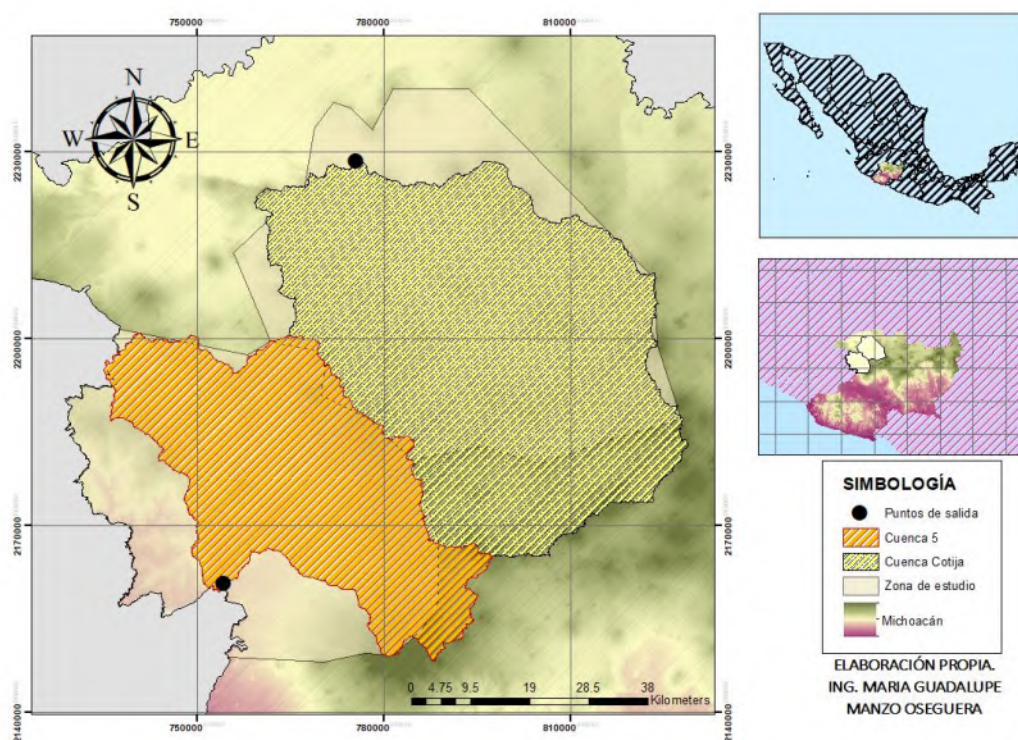


Figura 44. Cuencas para la similitud hidrológica.

En este estudio, la cuenca 5 ya ha sido calibrada previamente y se ha determinado que se tomara como referencia para establecer la similitud con la cuenca que no puede ser calibrada debido a la falta de información, en este caso, se nombre como “Cuenca Cotija” (Figura 44), está ubicada dentro del área del acuífero de Cotija, y presenta condiciones hidrológicas comparables. Esta metodología permite inferir el comportamiento de una zona no instrumentada con base en una cuenca con datos disponibles y verificados. Posteriormente, los parámetros hidrológicos obtenidos a partir del proceso de calibración de la Cuenca 5 serán asignados a la Cuenca Cotija. Esta transferencia de parámetros permitirá la generación de las series de escurrimientos correspondientes para dicha cuenca.

A partir de los resultados obtenidos en el proceso de calibración mediante el método de humedad del suelo (SMM), se procede a la transferencia de información hacia el área correspondiente al acuífero de Cotija, mediante la aplicación de parámetros previamente ya calibrados. Los valores utilizados para la modelación de la región de Zamora corresponden a los parámetros que se obtuvieron durante la calibración de la Cuenca 5 y son los parámetros que se trasladan a la “Cuenca Cotija”.

Los parámetros aplicados a la cuenca Cotija incluyeron el coeficiente de cultivo (K_c), la capacidad de retención de agua en la zona radicular (S_w), el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la capacidad de almacenamiento de agua en el acuífero profundo (K_s). Cabe señalar que, durante el proceso de calibración, se realizaron ajustes en estos parámetros de manera mensual, con el objetivo de representar de manera más precisa las variaciones estacionales y mejorar la fidelidad del modelo hidrológico.

Tabla 26. Parámetros utilizados para la modelación de la Cuenca 5 con el SMM.

Uso de suelo	K_c	S_w	RRF	K_s
Agrícola	0.5 hasta 1.2	120 hasta 1000	1 hasta 5	5 hasta 50
Urbano	0.1 hasta 0.3	50 hasta 550	3	5
Bosque	0.8 hasta 1.2	200 hasta 1000	1 hasta 10	5 hasta 100
Pastizal	0.1 hasta 0.35	50 hasta 100	5	5
Selva	0.4 hasta 1.5	200 hasta 1000	0.8 hasta 5	5 hasta 80

5.5 Balance hídrico.

Para llevar a cabo el balance hídrico en la zona de estudio, es necesario contar con la estimación de los volúmenes medios anuales (hm^3) correspondientes a los principales componentes del ciclo hidrológico: precipitación, evapotranspiración, escorrentía directa, infiltración (flujo hacia el acuífero) y las variaciones en el almacenamiento del agua.

Dado que se trata de un balance hídrico, el resultado ideal sería un cierre exacto en cero. No obstante, debido a que el periodo de análisis corresponde a una serie temporal relativamente corta, es razonable asumir que un valor cercano a cero representa un balance satisfactorio, reflejando una adecuada coherencia entre los componentes evaluados.

Tabla 27. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance del acuífero de Cotija.

Parámetro	Volumen (Hm ³)
Precipitación	4381.72
Evapotranspiración	174.33
Escurrentía	683.56
Infiltración	3523.83

En la Tabla 27 se muestran los volúmenes de entradas y salidas considerados en el balance hídrico de la cuenca del acuífero de Cotija, donde indica que la precipitación representa el 100% del aporte hídrico al sistema. De esta, se distribuyen los flujos hacia diferentes componentes del ciclo hidrológico, la evapotranspiración representa aproximadamente el 6.87% de la precipitación total, lo cual indica una pérdida relativamente baja al ambiente en comparación con otros sistemas naturales y esto puede deberse a condiciones climáticas, uso del suelo o cobertura vegetal, el escurrimiento superficial constituye un 15.96% del total precipitado, este valor sugiere una moderada capacidad de generación de escurrentía, posiblemente asociada a la pendiente del terreno, la textura del suelo o también la cobertura superficial y por último la Infiltración representa el 77.15% de la precipitación, este es un valor significativamente alto, lo que indica una gran capacidad del terreno para permitir el paso del agua hacia los mantos acuíferos, favoreciendo la recarga de los mismos. El balance hídrico en la cuenca del acuífero de Cotija cierra adecuadamente y se mantiene en equilibrio, lo cual indica una buena consistencia en los datos empleados.

El balance hídrico de Cotija (Figura 45) indica que el sistema hidrológico se caracteriza por una alta infiltración, lo que resalta la importancia del agua subterránea en el régimen hidrológico de la región, la evapotranspiración baja podría indicar condiciones favorables para la conservación de agua en el sistema, y este balance no presenta pérdidas ni incrementos no contabilizados, por lo que se puede considerar equilibrado bajo un régimen estacionario.

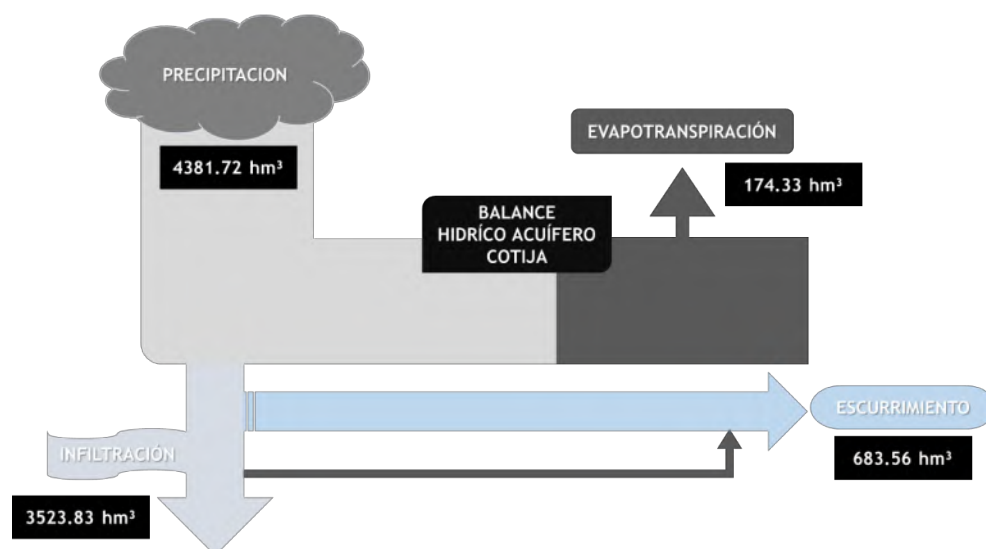


Figura 45. Balance hidrológico medio anual de la cuenca perteneciente al acuífero de Cotija, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con SMM.

Como se observa en la figura 45, el balance muestra que el 77.15% del agua precipitada se infiltra al subsuelo, lo que representa una recarga potencial muy significativa para los acuíferos de la región lo que debe ser considerado como un activo clave para la sostenibilidad hídrica. Dada que es alta la infiltración, es esencial evitar la sobreexplotación de los pozos profundos, ya que, aunque hay una recarga alta, el uso intensivo podría exceder la capacidad de recuperación natural, también proteger las zonas de recarga mediante la conservación de suelo. Además, el bajo porcentaje de evapotranspiración que es de 6.87% sugiere que una mayor proporción del agua se dirige hacia el subsuelo que hacia la atmósfera, favoreciendo una disponibilidad subterránea continua.

Tabla 28. Volúmenes de entrada y salida del sistema considerados en el balance del acuífero de Zamora.

Parámetro	Volumen (Hm³)
Precipitación	3995.30
Evapotranspiración	274.40
Escurrimiento	637.56
Infiltración	3083.34

El balance de Zamora mostrado en la tabla 28, refleja que tiene una escurrimiento de 15.9%, este valor moderado indica que existe una fracción significativa de la precipitación que no se infiltra ni se evapora, lo que puede deberse a pendientes del terreno o a suelos poco permeables en ciertas zonas, una evapotranspiración de 6.9%, que representa el agua que se devuelve a la atmósfera por la evaporación del suelo y transpiración de la vegetación. Su bajo porcentaje puede deberse a una cobertura vegetal no muy densa, o a una eficiencia en el uso del agua en el sector agrícola, la mayor parte del agua precipitada se infiltra hacia el subsuelo, se tiene el 77.2%, lo que indica un potencial alto

para la recarga de acuíferos. Este valor es particularmente importante para la gestión del agua subterránea, ya que refleja una entrada significativa al sistema acuífero.

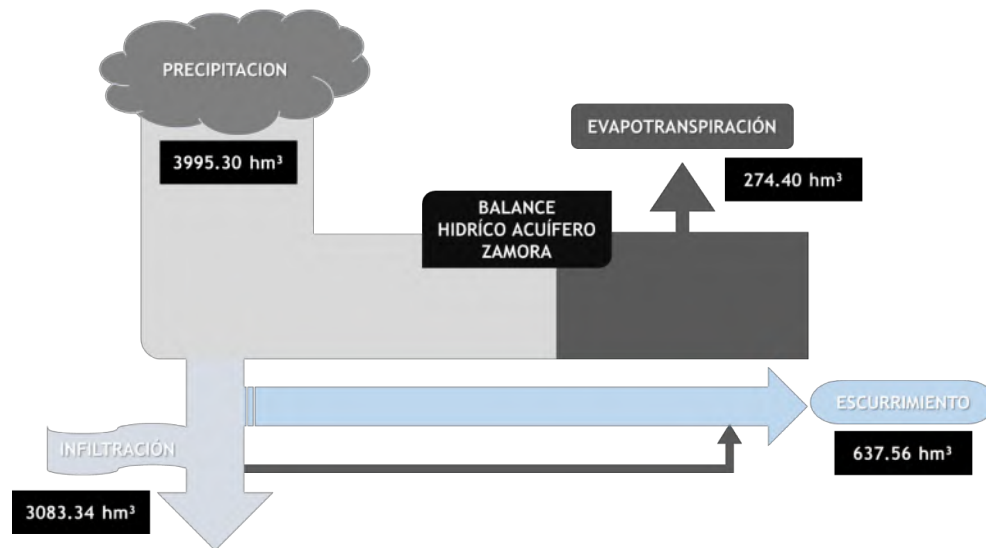


Figura 46. Balance hidrológico medio anual de la cuenca perteneciente al acuífero de Zamora, realizado por similitud hidrológica con los resultados de las modelaciones con SMM.

El análisis del balance hídrico de la cuenca del acuífero de Zamora se muestra en la figura 46 y revela un comportamiento hidrológico favorable para la disponibilidad de agua subterránea, destacando la importancia de conservar las áreas de recarga y de mantener un manejo integral del recurso, considerando no solo los volúmenes de infiltración, sino también los impactos del uso del suelo y la agricultura.

5.6 Gestión de datos subterráneos.

Para llevar a cabo la simulación de las masas subterráneas es indispensable disponer de información detallada de la zona de estudio, a continuación, se presenta la caracterización subterránea, la cual es fundamental para la construcción del modelo subterráneo en MODFLOW. Esta caracterización comprende la información necesaria para representar adecuadamente las condiciones del sistema acuífero, donde se incluye los volúmenes de recarga y extracción, así como las propiedades hidrogeológicas del medio, tales como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento. Asimismo, es fundamental contar con los datos topográficos, como son las elevaciones del terreno, el espesor de las unidades geológicas y la ubicación de los manantiales. Adicionalmente, para la correcta representación de las condiciones iniciales del modelo, se requiere conocer la altura del nivel estático en el momento inicial de la simulación.

Al analizar los acuíferos, es fundamental considerar tanto las extracciones como las recargas asociadas a los diferentes usos presentes en la zona. Para este propósito, se emplea la base de datos del REPDA (2023), la cual proporciona información sobre los

volúmenes concesionados en la región, así como los fines a los que se destinan. Es particularmente importante distinguir entre los usos urbano, industrial y agrícola, ya que esta diferenciación permite calcular la recarga por retorno de riego, que se estima en un 20% del volumen concesionado para el uso agrícola. En las tablas 29 y 30 se detallan un total de 1,390 pozos de extracción ubicados en la zona de estudio.

Tabla 29. Volúmenes concesionados para el acuífero de Zamora.

Usos	Volumen total concesionado (hm ³ /año)	No. De pozos de extracción	%
Acuacultura	0.02	2	0.2
Agrícola	11.63	681	66.6
Agroindustrial	0.25	14	1.4
Diferentes usos	5.73	47	4.6
Domestico	1.60	20	2.0
Industrial	3.20	57	5.6
Pecuario	0.39	15	1.5
Público urbano	19.97	136	13.3
Servicios	1.18	50	4.9
TOTAL	143.97	1022	100

Tabla 30. Volúmenes concesionados en el acuífero de Cotija.

Usos	Volumen total concesionado (hm ³ /año)	No. De pozos de extracción	%
Agrícola	38.64	311	84.5
Diferentes usos	1.12	21	5.7
Domestico	0.91	4	1.1
Pecuario	0.00	3	0.8
Público urbano	2.81	26	7.1
Servicios	0.02	3	0.8
TOTAL	43.51	368	100

En el siguiente mapa (Figura 47) se presentan los pozos de extracción localizados dentro de la zona de estudio. Esta representación cartográfica permite visualizar la distribución espacial de los pozos en los distintos municipios que conforman el área analizada en el estudio. Se observa una notable concentración de pozos en los municipios de Peribán, Zamora, Jacona y Tangancícuaro, en comparación con otros municipios en el área.

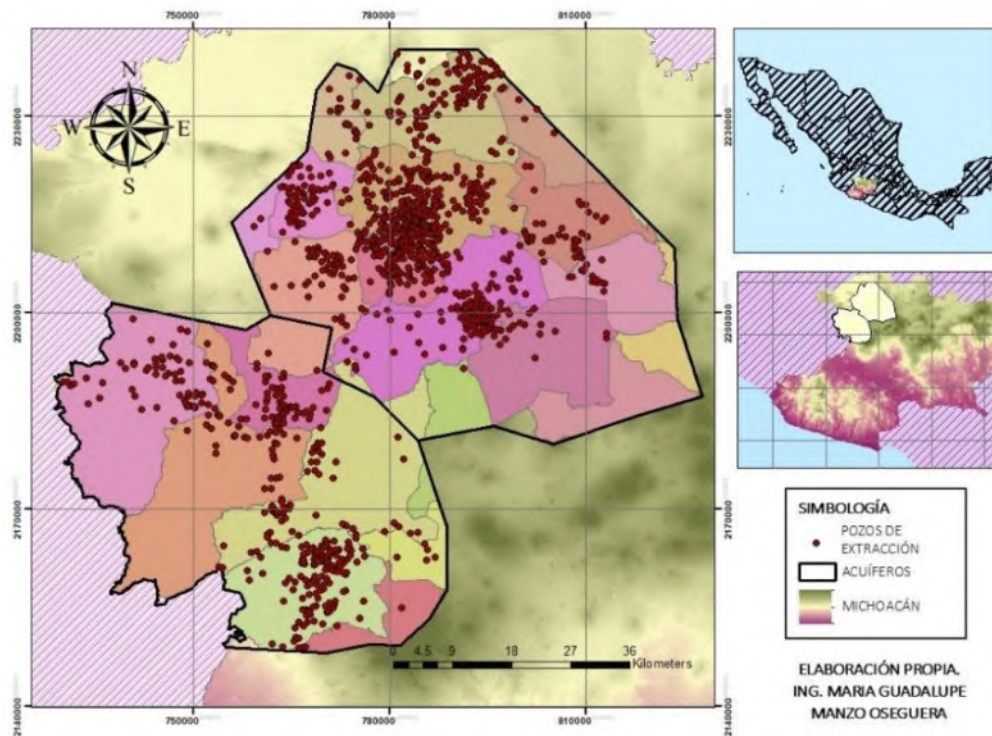


Figura 47. Pozos de extracción concesionados en la zona de estudio.

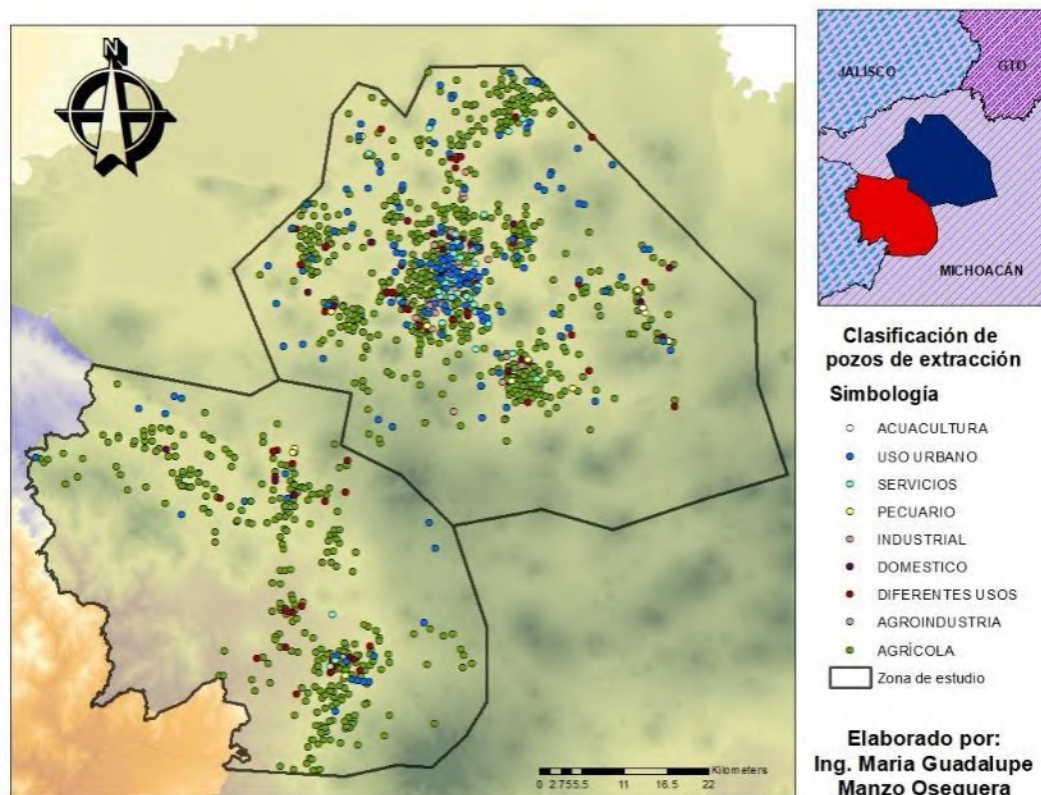


Figura 48. Clasificación de los pozos de extracción de la zona.

La figura 48 muestra la distribución espacial de los pozos de extracción localizados en la zona de estudio, clasificados de acuerdo con el uso del agua concesionada. Esta representación permite identificar la variabilidad en los usos, tales como agrícola, público-urbano, industrial, entre otros.

Como etapa inicial del estudio, resulta indispensable identificar y ubicar los manantiales presentes en el área de análisis, los cuales se encuentran dispersos en toda la región. En la figura siguiente (Figura 49) se presenta la distribución espacial de los manantiales localizados dentro de la zona de estudio, esta identificación y análisis espacial de los manantiales contribuyen a evaluar su importancia como fuentes de descarga del acuífero y a establecer criterios para su manejo y conservación.

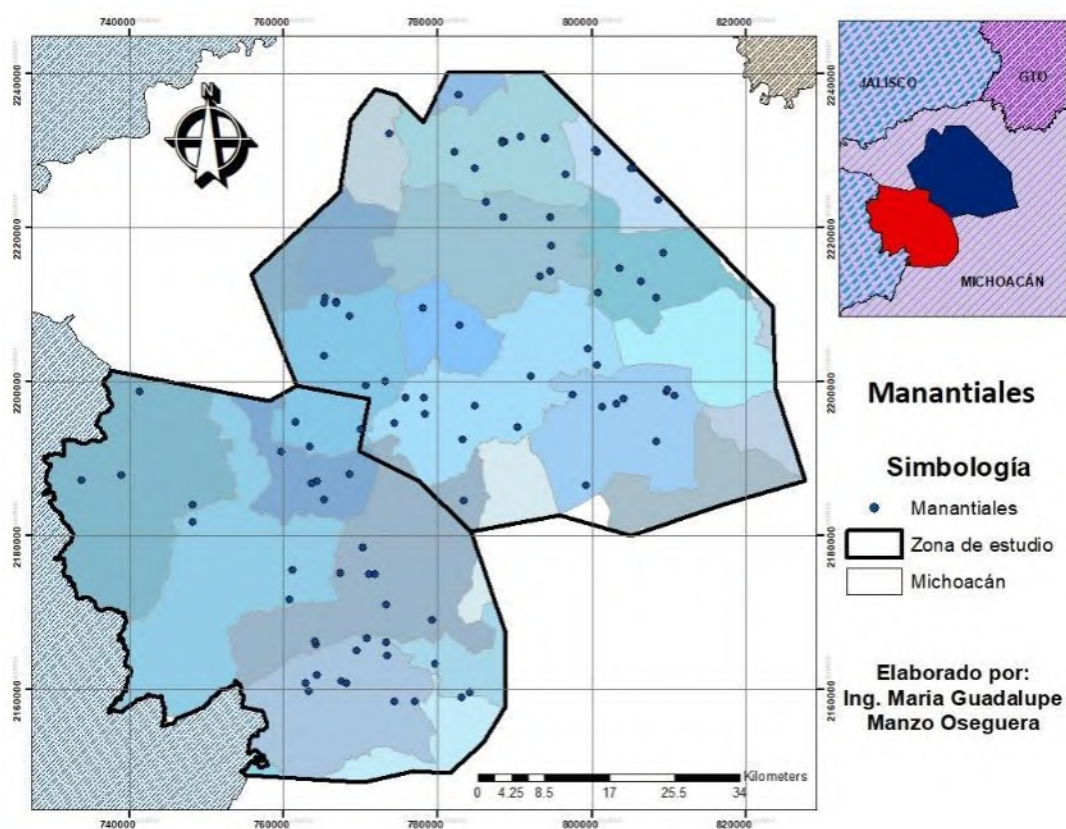


Figura 49. Localización de manantiales en la zona de estudio.

Se han registrado un total de 94 manantiales que aportan al sistema hídrico de la zona y constituyen una fuente importante para el aprovechamiento del agua (Tabla 31), el volumen anual concesionado en el acuífero de Zamora es de 275 hm³/años (volumen de descarga) donde aproximadamente 25 manantiales son originados en basaltos de edad Cuaternaria, y 36 alimentados por rocas basálticas del Terciario.

Tabla 31. Manantiales con información en la zona de estudio.

ZAMORA		COTIJA		
Manantial	Q (Lps)	Manantial	Q (Lps)	V (mm ³ /año)
Cuerámaro	2000	Zipicha	170	5.261
Chilchota	1212	La Yerbabuena	70	2.207
Presa Verduzco	1183	La Majada	2000	63.072
Junguarán	463	Tarecuato	200	6.307
Guario	438	Ojo de agua	500	15.768
Cupatziro	424	El Cabrio	0.5	0.016
Ostácuaro	500			
Ichán-Aricho	500			

La piezometría es uno de los parámetros necesarios para la construcción de un modelo subterráneo. Los registros de niveles piezométricos en el país presentan limitaciones significativas tanto en su control como en su calidad. La falta de un monitoreo sistemático y riguroso ha derivado en bases de datos incompletas e inconsistentes, lo cual dificulta una adecuada caracterización del comportamiento hidrogeológico a lo largo del tiempo.

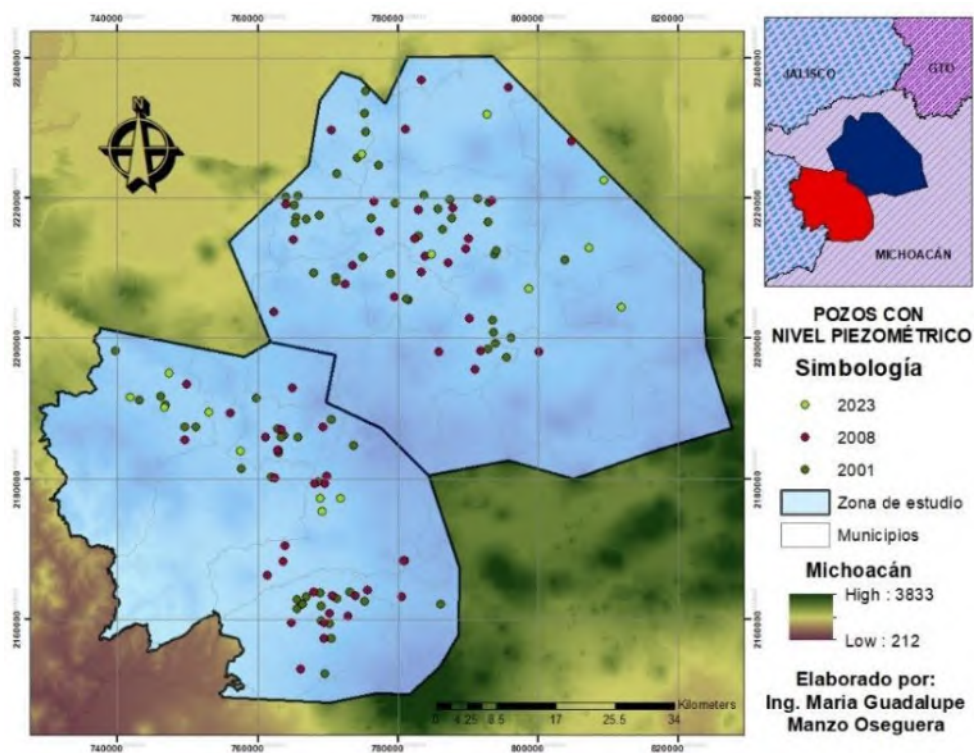


Figura 50. Pozos con información piezométrica en la zona de estudio.

En particular, para los acuíferos en estudio, se cuenta con poca información. En el año 2001, se cuenta con registros de 75 pozos; para el 2008, esta cifra se redujo a 64 pozos, y en el año 2023 únicamente se dispone de información piezométrica de 15 pozos que

se tomaron en el monitoreo planteado para este estudio, los pozos con información de nivel estático se muestran en figura 50.

El análisis de la piezometría histórica nos permite observar y comprender la evolución del comportamiento del acuífero a lo largo del tiempo. Para ello, se llevaron a cabo tres cortes o perfiles transversales en el acuífero, denominados A–A', B–B' y C–C', estos cortes fueron trazados estratégicamente con el objetivo de analizar la distribución del nivel estático del agua subterránea. A partir de estos trazos, se elaborarán los perfiles piezométricos correspondientes, los cuales permitirán visualizar de manera detallada la variación del nivel estático a lo largo de cada sección del acuífero, facilitando así la interpretación de su comportamiento.

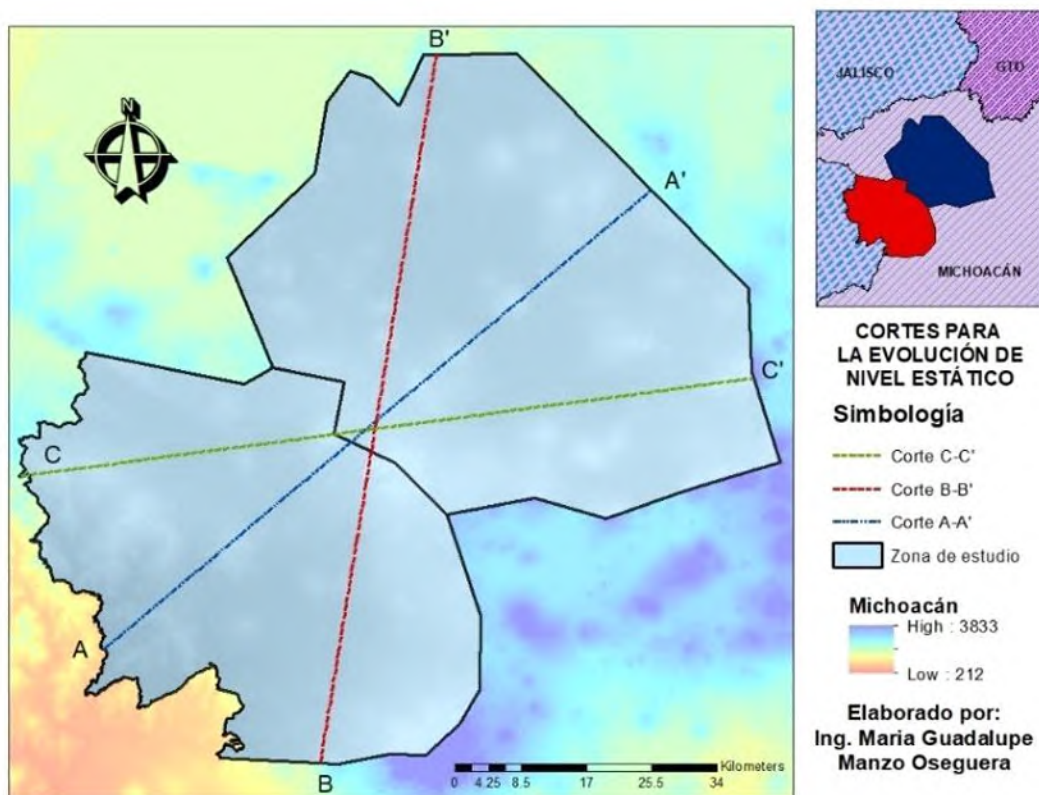


Figura 51. Cortes en los acuíferos para la evolución del nivel estático.

En los perfiles piezométricos mostrados en las figuras siguientes (52, 53 y 54) son elaborados a partir de los cortes A–A', B–B' y C–C' (Figura 51), se observa una tendencia descendente en los niveles piezométricos a lo largo del tiempo, siendo el año 2023 el que presenta los valores más bajos registrados. El nivel del agua subterránea se encuentra muy próximo a la superficie, es decir, es una capa freática somera que, en algunos casos, prácticamente coincide con el nivel del terreno natural.



Figura 52. Corte A-A' de la evolución del nivel estático de la zona de estudio.

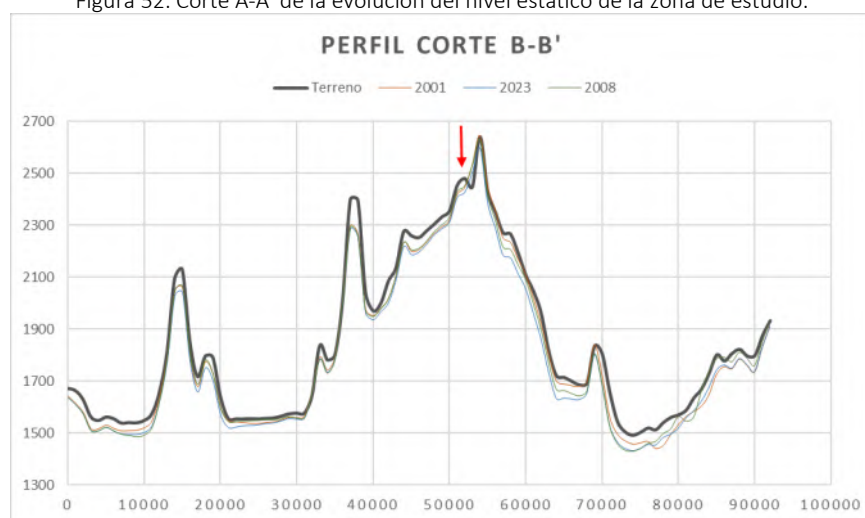


Figura 53. Corte B-B' de la evolución del nivel estático de la zona de estudio.

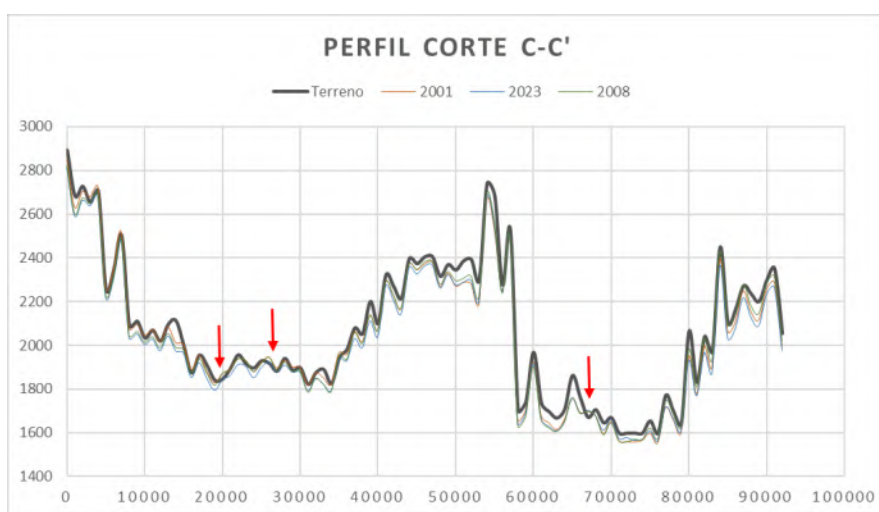


Figura 54. Corte C-C' de la evolución del nivel estático de la zona de estudio.

Asimismo, en varios puntos de los perfiles se identifica la existencia de conexión hidráulica entre el acuífero y los cuerpos superficiales de agua, particularmente con el río Duero, la laguna de La Magdalena y el río Itzicuaro, lo que sugiere una posible interacción directa en esas zonas, ya sea de recarga o descarga entre el agua subterránea y los cuerpos de agua superficiales.

El análisis de la dirección del flujo subterráneo a lo largo de los diferentes años estudiados muestra que esta mantiene una tendencia general constante, es decir, el sentido en que se desplaza el agua subterránea no ha cambiado significativamente con el tiempo (Figura 55, 56 y 57). Sin embargo, si se observa una disminución progresiva en los niveles piezométricos, lo que indica un descenso en la elevación del nivel del agua subterránea en todo el acuífero.

Esta situación sugiere que, aunque las condiciones y la pendiente natural del flujo se mantienen, el acuífero ha experimentado un agotamiento gradual, posiblemente asociado a una extracción excesiva o a una recarga insuficiente. El descenso sostenido del nivel piezométrico es un indicio claro de un desequilibrio entre la recarga y la descarga, afectando la disponibilidad de agua subterránea a mediano y sobre todo a largo plazo.

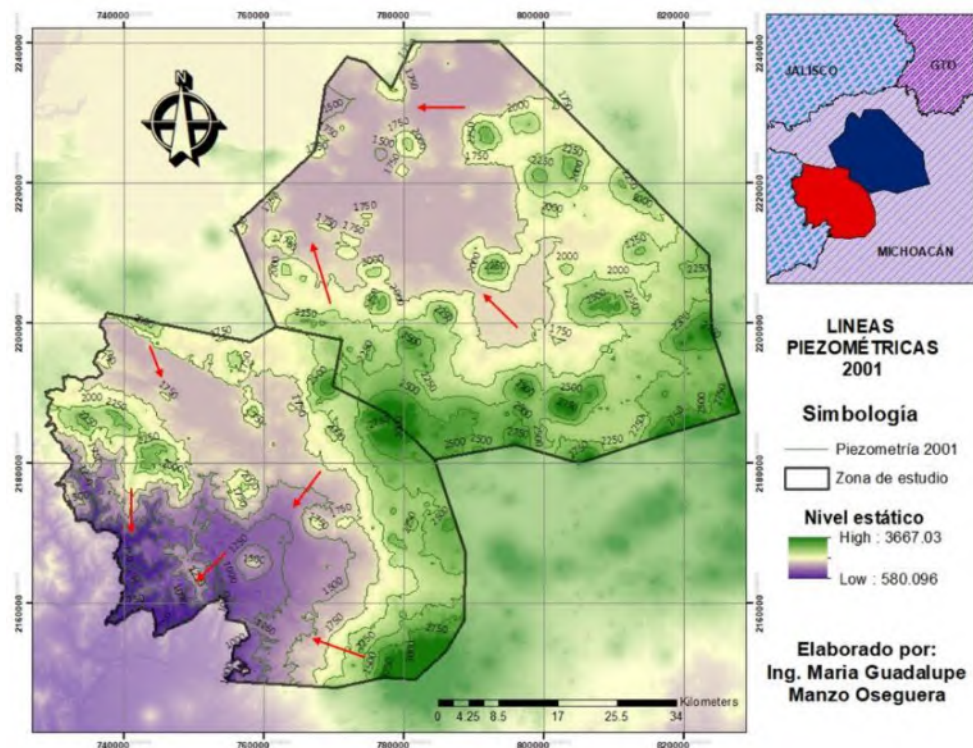


Figura 55. Comportamiento del nivel estático (Año 2001).

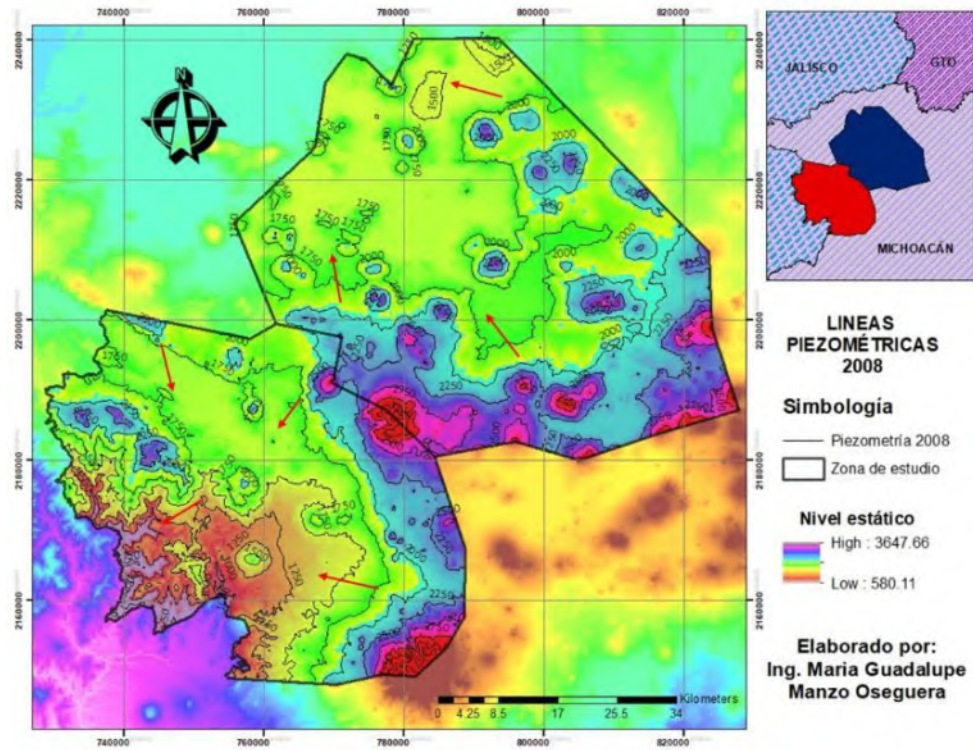


Figura 56. Comportamiento del estático (Año 2008).

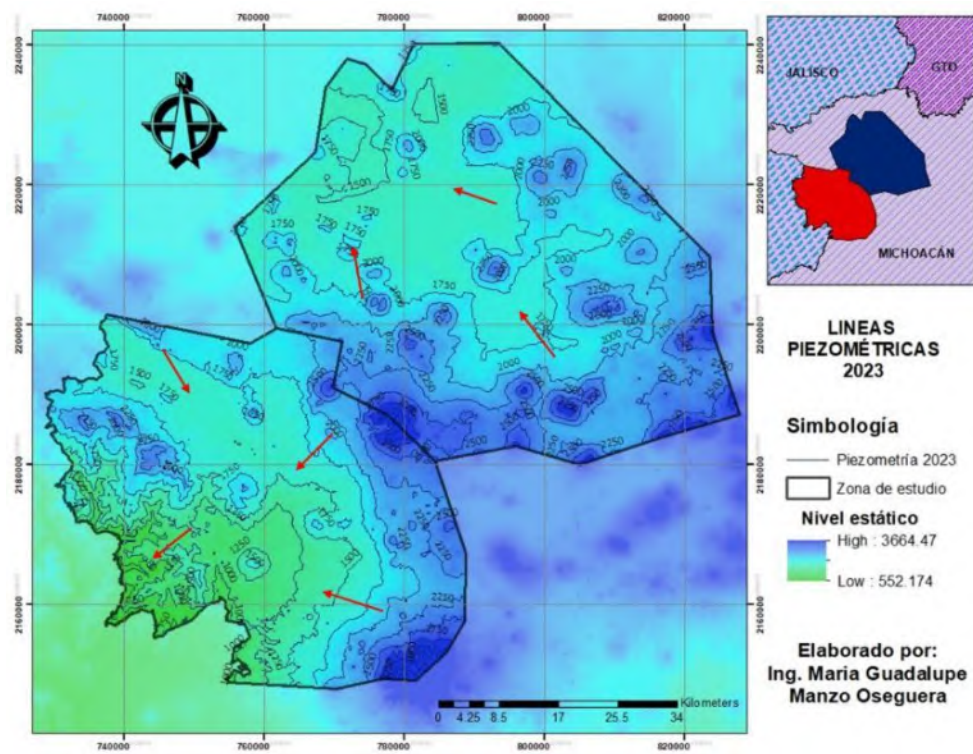


Figura 57. Comportamiento del nivel estático (Año 2023).

En los acuíferos, la profundidad del nivel estático oscilaba entre menos de 5 metros y hasta 30 metros. Las mayores profundidades, superiores a 30 metros, se localizaron en la parte occidental de cada acuífero. En particular, en el acuífero de Zamora, el patrón de circulación subterránea refleja un comportamiento similar al del relieve superficial, destacando que en las zonas más altas del valle se produce la descarga del acuífero hacia el corredor fluvial del río Duero. Este flujo continúa en dirección aguas abajo, indicando que el acuífero descarga finalmente hacia la región de la Ciénega de Chapala, tal como se menciona en (CONAGUA, 2020a) y se muestra en las imágenes anteriores, es importante mencionar que, en la zona de Chavinda se identificaba una depresión en los niveles del agua subterránea, con elevaciones mínimas del nivel piezométrico de 1,526 msnm.

Esta condición se atribuía a la intensa operación de pozos localizados en esa área, lo cual generaba un descenso significativo del nivel del acuífero y esa información se obtuvo de un estudio de Diagnóstico de las Condiciones Geohidrológicas Actuales y Análisis de Alternativas de Operación del Acuífero de Zamora, que fue realizado en 1993, sin embargo, los datos más recientes indican que en la actualidad, los niveles piezométricos en esa misma zona han descendido aún más, alcanzando elevaciones cercanas a los 1,500 msnm, lo que evidencia un agravamiento de la depresión a lo largo del tiempo, posiblemente por una combinación de extracción continua y recarga insuficiente.

En el acuífero de Cotija, el nivel del agua subterránea se encuentra a muy poca profundidad, con valores que llegan a ser de apenas un metro bajo la superficie. Incluso se han reportado casos de artesianismo, donde el agua asciende por sí sola dentro de los pozos debido a la presión interna del sistema. Estas condiciones sugieren la presencia de un acuífero semiconfinado, en el que el agua se encuentra bajo cierta presión, aunque no completamente aislada por capas impermeables. En el Estudio Geohidrológico de la región de Cotija, Michoacán, realizado en 1963, se documentó que, en la porción sureste del valle, los niveles del agua subterránea en los pozos eran considerablemente profundos, registrándose a 12.5 metros, entre 20 y 35 metros, e incluso hasta 57 metros de profundidad. Esta zona abarca, de localidad a Tacátzcuaro y Santa Inés. No obstante, para el año 2023, en el muestreo realizado para el estudio, se observó un incremento significativo en la profundidad del nivel del agua en la localidad de Tacátzcuaro, ya que alcanza los 100 metros, lo cual refleja una disminución considerable del nivel piezométrico a lo largo del tiempo y sugiere una posible sobreexplotación o reducción en la recarga del acuífero en esta región. El flujo subterráneo permite observar que tiene una dirección de NW – SE, de la Laguna de san Juanico hacia Tocumbo como se menciona en (CONAGUA, 2020b).

5.7 Recopilación de datos para la simulación subterránea.

La modelación del flujo subterráneo en los acuíferos de Zamora y Cotija se llevó a cabo bajo condiciones de régimen estacionario, considerando un periodo de un año correspondiente al 2001. Este año fue seleccionado debido a que representa el intervalo con mayor disponibilidad y calidad de información relacionada con niveles estáticos del agua subterránea. Para la construcción del modelo, se consideraron parámetros hidrogeológicos clave, tales como la porosidad efectiva de los materiales que conforman el acuífero y la conductividad hidráulica, los cuales controlan el almacenamiento y el movimiento del agua subterránea dentro del sistema.

Como parte de la configuración inicial del modelo, se estableció una malla espacial con celdas de 2 kilómetros por 2 kilómetros. Esta malla está compuesta por 50 columnas y 47 filas, lo que permite una adecuada representación espacial del área de estudio (Figura 58). La elección de esta resolución responde a la necesidad de lograr una discretización suficientemente detallada para reflejar con mayor precisión las condiciones hidrogeológicas del acuífero. La estructura de dicha malla se muestra en la figura 58.

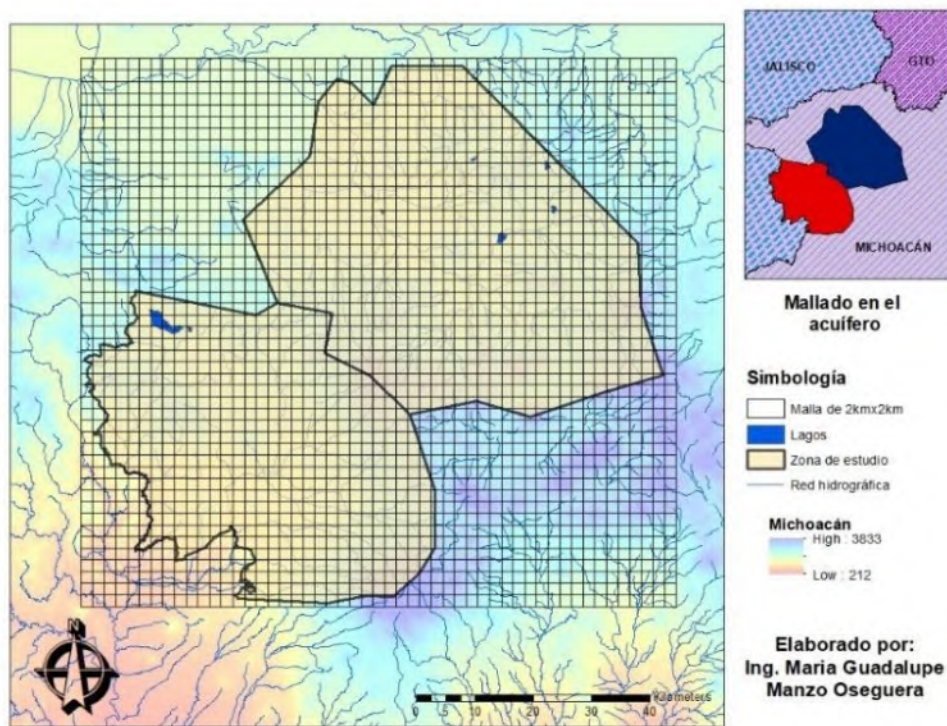


Figura 58. Malla de los acuíferos Zamora y Cotija con resolución de 2kmx2km.

El siguiente mapa (Figura 59), representa las condiciones de contorno del modelo hidrogeológico, mostrando la distribución espacial de las celdas activas, inactivas y de altura constante dentro de la malla del modelo. Estas condiciones definen el comportamiento hidrodinámico del sistema subterráneo, delimitando las zonas en las

que el flujo de agua subterránea es simulado (celdas activas) y son 1348 celdas, aquellas que no participan en la simulación (celdas inactivas) son 1014 y las que mantienen una elevación fija del nivel piezométrico a lo largo del tiempo (celdas de altura constante) son únicamente 35 celdas. La correcta delimitación de estas condiciones es fundamental para establecer un modelo numérico coherente con las características físicas e hidrogeológicas del acuífero.

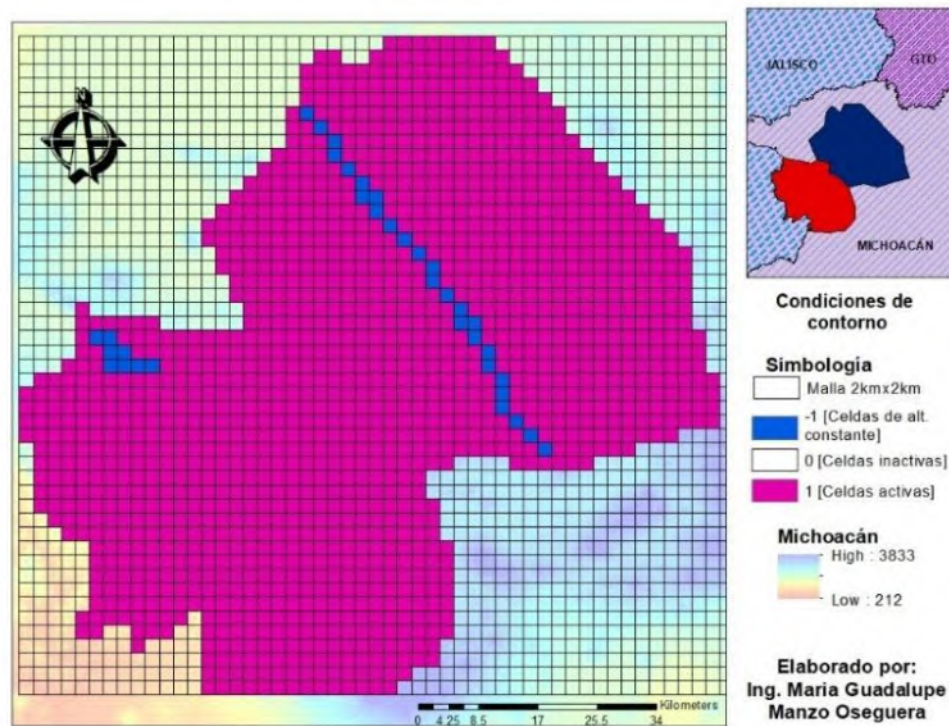


Figura 59. Mapa de condiciones de contorno de los acuíferos estudiados.

Una vez definidas las celdas en las que se llevará a cabo el balance, es necesario conocer la elevación del terreno natural y el espesor de las formaciones geológicas presentes. La elevación del terreno se determina a partir de los Modelos Digitales de Elevación (MDE) proporcionados por el INEGI. Para construir la matriz de las elevaciones o relieve correspondiente, se asigna a cada celda de la malla el valor de altitud obtenido en su centroide.

Las elevaciones del terreno natural guardan una estrecha relación con las celdas de altura constante (Figura 60), las áreas con mayor altitud se ubican al sureste del área de estudio, por parte del acuífero de Zamora el gradiente topográfico se desarrolla en dirección sureste-noroeste, coincidiendo con el sentido de flujo del río Duero, principal corriente superficial de la región.

En la región del acuífero de Cotija, el desnivel topográfico regional se orienta en dirección noroeste-sureste, coincidiendo con el curso predominante de los drenajes y

escurrimientos superficiales. Dentro de esta zona se encuentra el Valle de la Magdalena, cuyo relieve es predominantemente plano. Sin embargo, este paisaje es interrumpido por la presencia de conos cineríticos, como el Cerro de Tingüindín, los cuales en ciertos casos alteran la morfología del terreno y provocan desvíos en el flujo natural de las corrientes superficiales (Figura 60).

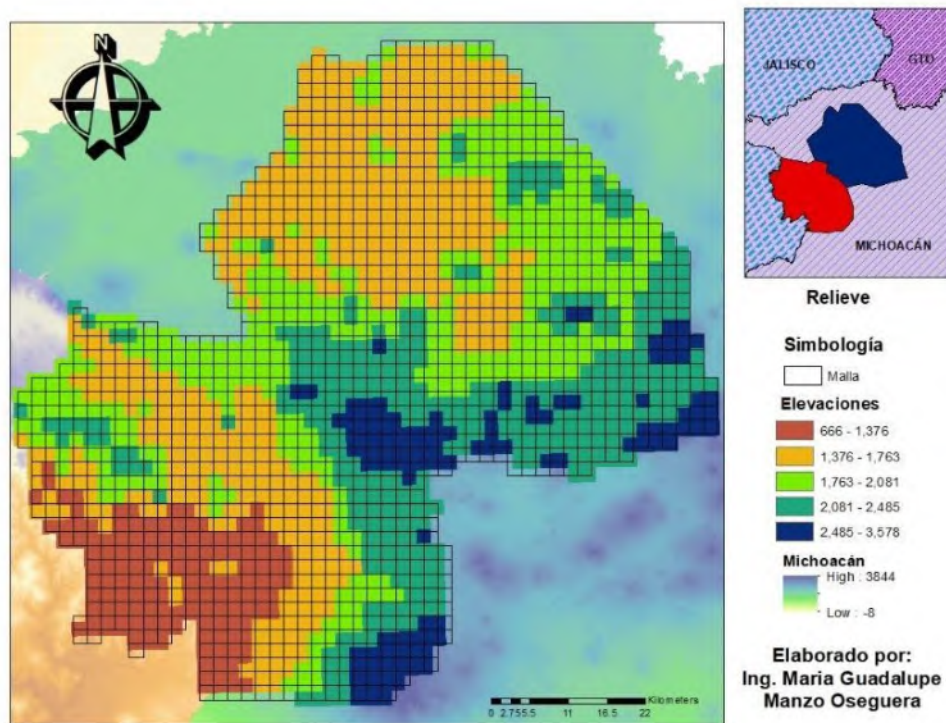


Figura 60. Ráster ajustado a la malla del relieve.

De acuerdo con el documento de Actualización de la Disponibilidad de los Acuíferos, elaborado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), los espesores geológicos en la región presentan una variabilidad, oscilando entre 3 y 300 metros, dependiendo de las características litológicas y estructurales locales. No obstante, para efectos del presente estudio y con fines de modelación hidrogeológica, se ha determinado utilizar un espesor uniforme de 500 metros, el cual representa una aproximación conservadora que permite integrar adecuadamente las condiciones geológicas. Cabe señalar que el espesor definido no representa necesariamente el total de material saturado, sino que establece un límite máximo de profundidad para el modelado del acuífero, el cual se ha fijado en 500 metros por debajo del nivel del terreno natural. Este valor se utiliza como una referencia estructural para acotar el alcance vertical del sistema acuífero dentro del modelo conceptual (Figura 61).

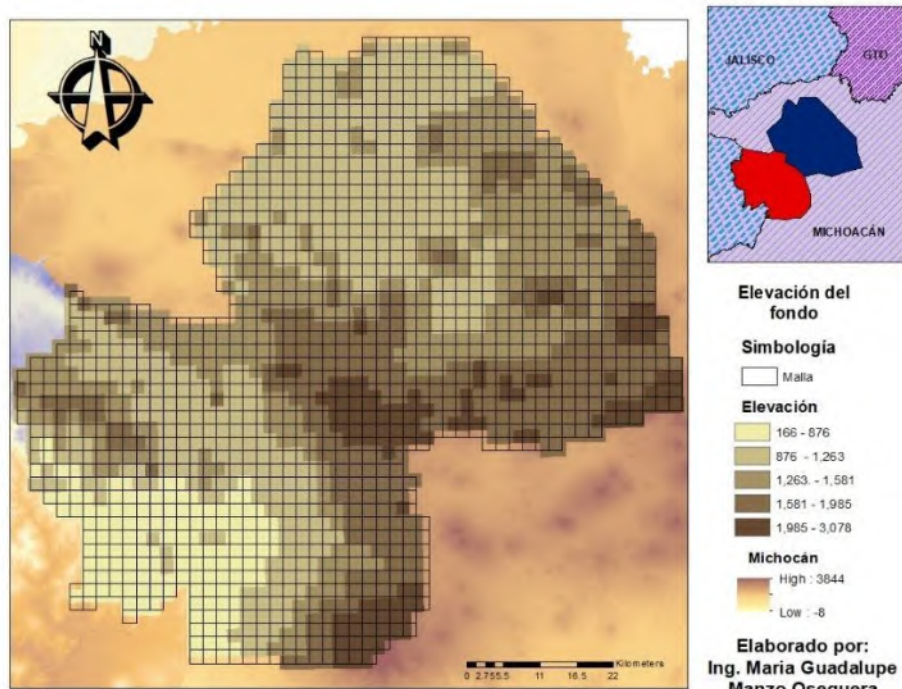


Figura 61. Elevación de fondo (Acuíferos de la zona).

La ubicación de los manantiales dentro del área de estudio, ubicado en celdas se ilustra en la figura 62, debido a su carácter somero, no representan condiciones del acuífero profundo, por lo que se infiere que su origen está asociado a un acuífero colgado.

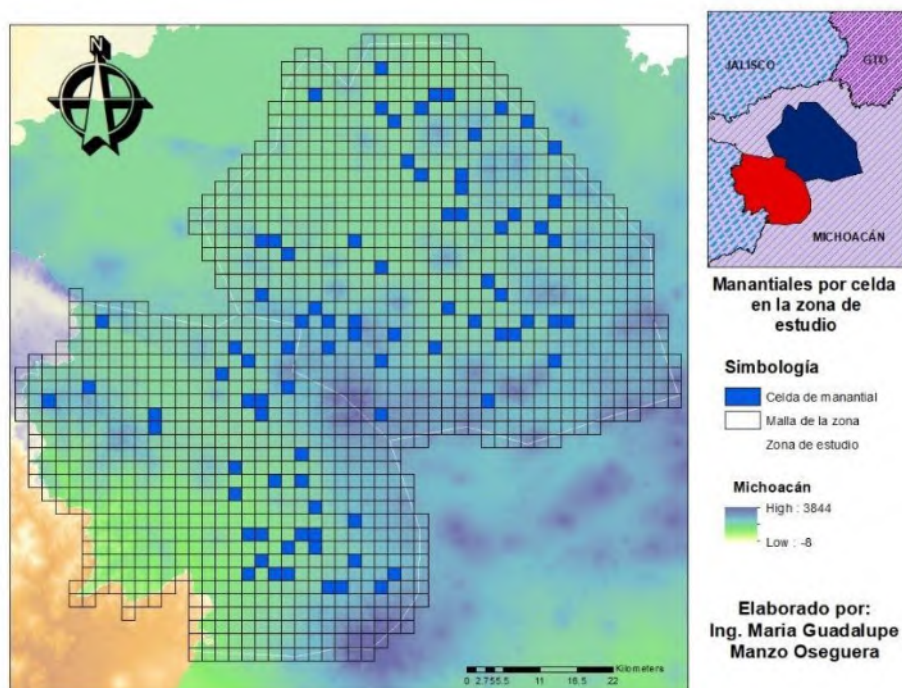


Figura 62. Manantiales por celda en la zona de estudio.

En el siguiente mapa (Figura 63) se representa las celdas de la malla que contienen pozos de extracción en la zona. La identificación de estas celdas permite visualizar la distribución de las extracciones de agua subterránea, cada celda resaltada en el mapa corresponde a una unidad espacial donde se ha ubicado al menos un pozo destinado a la extracción.

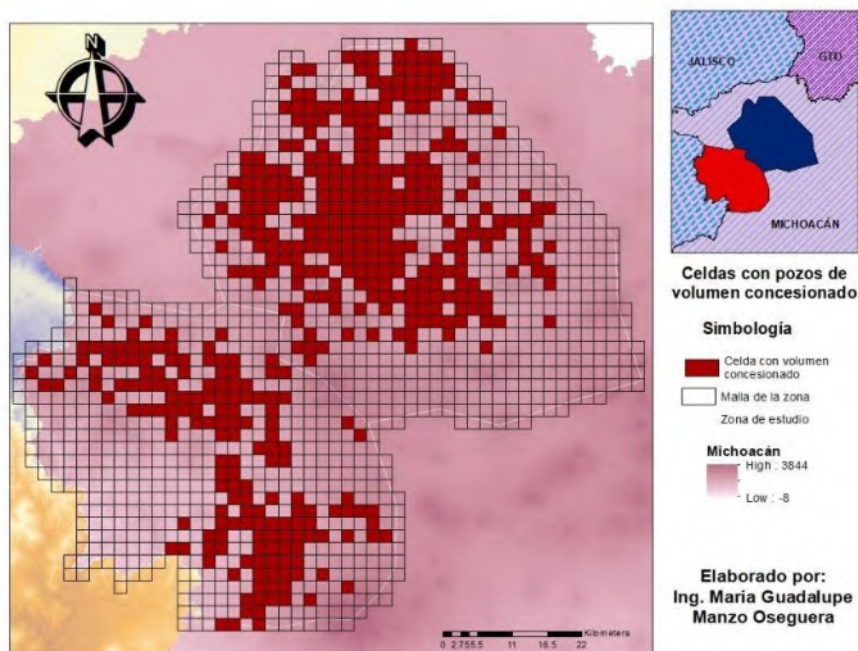


Figura 63. Celdas con pozos de extracción.

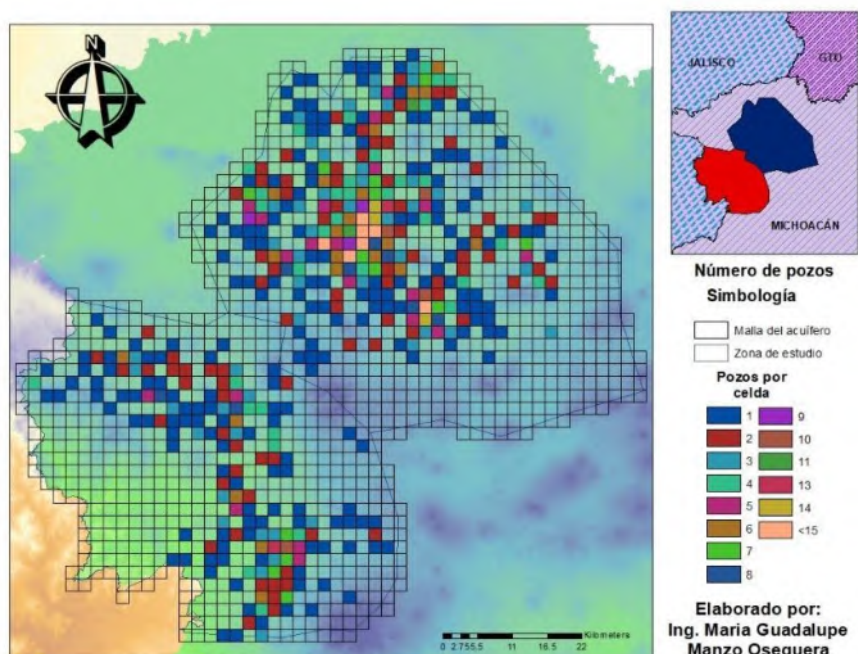


Figura 64. Numero de pozos de extracción por celda.

En la siguiente figura 64 se representa la distribución espacial del número de pozos de extracción por celda dentro de la zona de estudio. Esta información permite identificar las áreas con mayor densidad de aprovechamiento subterráneo. Se observa que la mayor concentración de pozos se localiza en el Valle de Zamora, específicamente en la zona agrícola, donde la demanda de agua para riego es significativamente alta.

Por otra parte, en la figura siguiente (Figura 65) se muestra por código de colores el volumen extraído de los acuíferos en la zona de estudio, claramente se observa que en el acuífero de Zamora se extrae mayor volumen que en el de Cotija, por lo regular la mayoría de las extracciones son para uso agrícola.

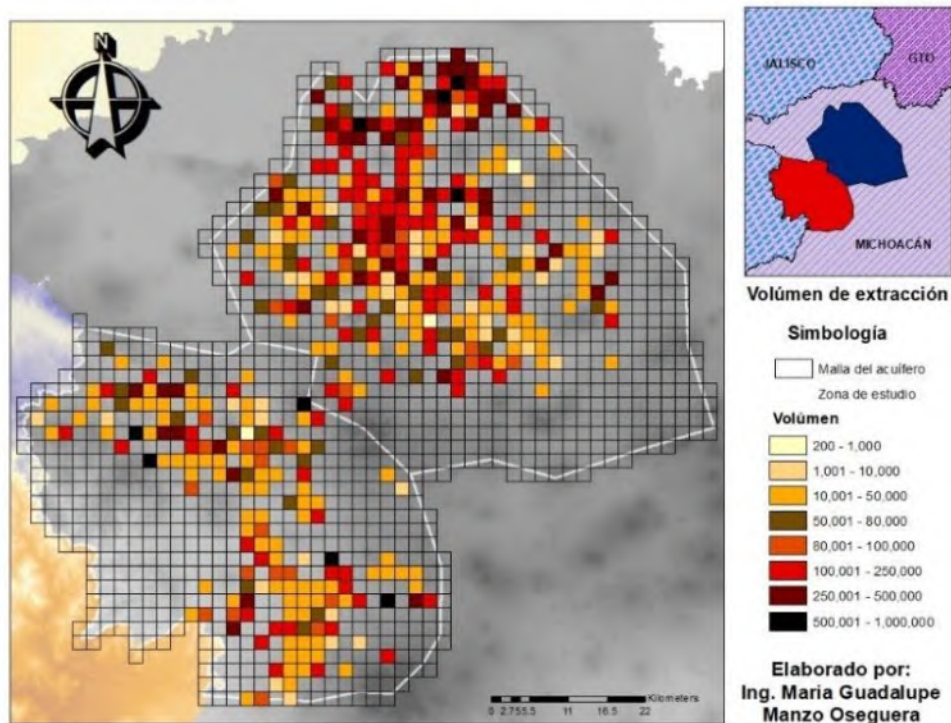


Figura 65. Volúmenes de extracción en la zona de estudio en m³/año.

El retorno de riego agrícola es importante tomarlo en cuenta ya que esto se refiere a la porción del agua aplicada al riego agrícola que no es consumida completamente por los cultivos, ya que, en lugar de perderse, se infiltra nuevamente al subsuelo, contribuyendo así a la recarga natural. En México, la eficiencia del riego agrícola es baja, por lo que se estima que entre el 15% y 30% del agua aplicada retorna al acuífero. El volumen considerado como retorno por riego se ha calculado como el 20% del volumen concesionado, de acuerdo al REPDA, exclusivamente para aquellos pozos destinados al uso agrícola.

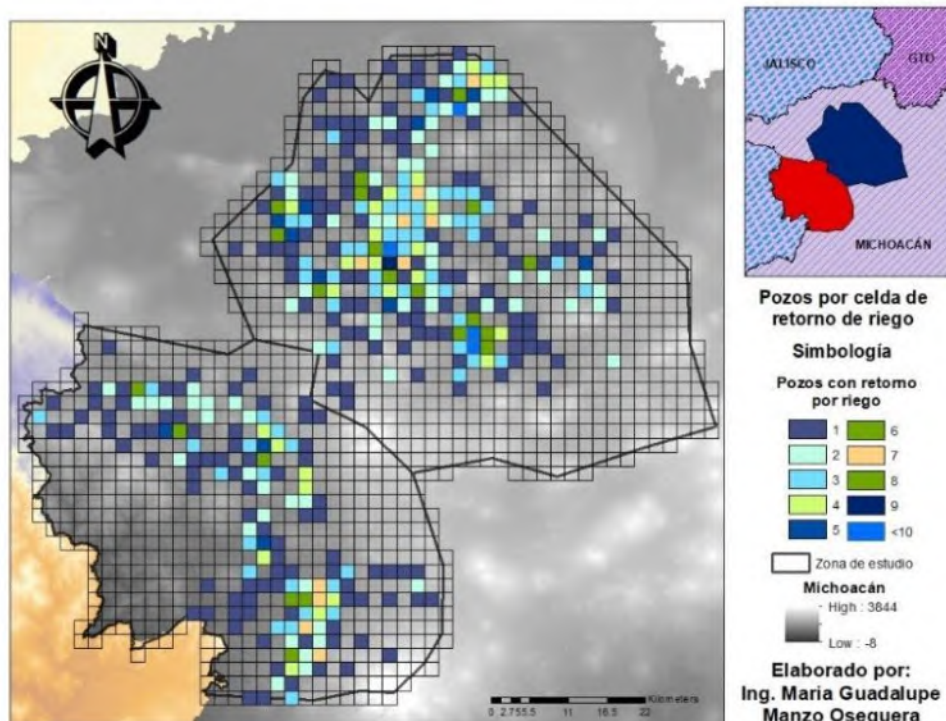


Figura 66. Numero de pozos por celda con retorno de riego.

La figura 63 se presenta la distribución, por celda, del número de pozos de extracción destinados al uso agrícola dentro de la zona que estudiamos. En total, se identifican 943 pozos que generan retorno de riego en el área, como (Navarro Farfán et al., 2019), para estimar el porcentaje del volumen que retorna al acuífero como consecuencia del uso agrícola, es necesario considerar la variedad de sistemas de riego empleados en la zona de estudio, entre los cuales destacan los métodos por gravedad, aspersión y goteo. Cada uno de estos sistemas presenta diferentes niveles de eficiencia, con un rango que va del 40% al 95%, lo que implica pérdidas de entre el 5% y el 60%. Dado lo anterior, y con base en un valor promedio de dichas pérdidas, se asume que no la totalidad de estas se traduce en recarga al acuífero. Por lo tanto, se considera razonable establecer que aproximadamente el 20% del volumen concesionado para uso agrícola representa el retorno efectivo al sistema acuífero.

Con base en la geología del acuífero en estudio se determinaron dos parámetros de suma importancia para el funcionamiento del acuífero; la conductividad hidráulica la cual se representa en la figura 67 y sus valores se determinaron basándonos en la tabla de (Sanders, 1998), cabe mencionar que la conductividad hidráulica es el parámetro con el cual se calibra el modelo, al cambiar el valor de la conductividad, se generan distintos escenarios y el segundo parámetro importante es el coeficiente de almacenamiento (Figura 68).

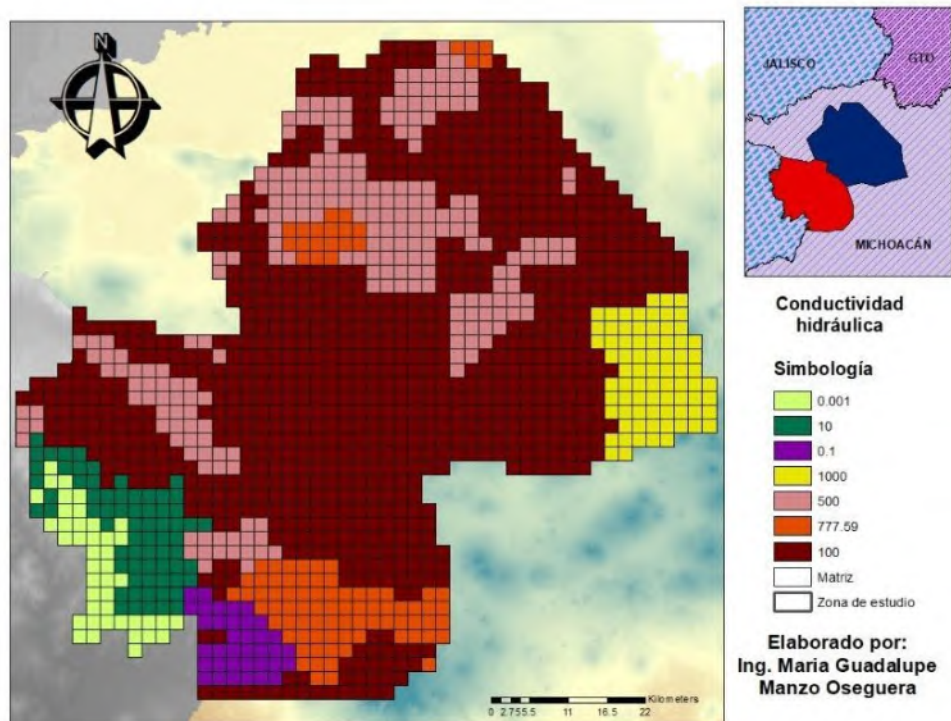


Figura 67. Conductividad hidráulica inicial para el acuífero.

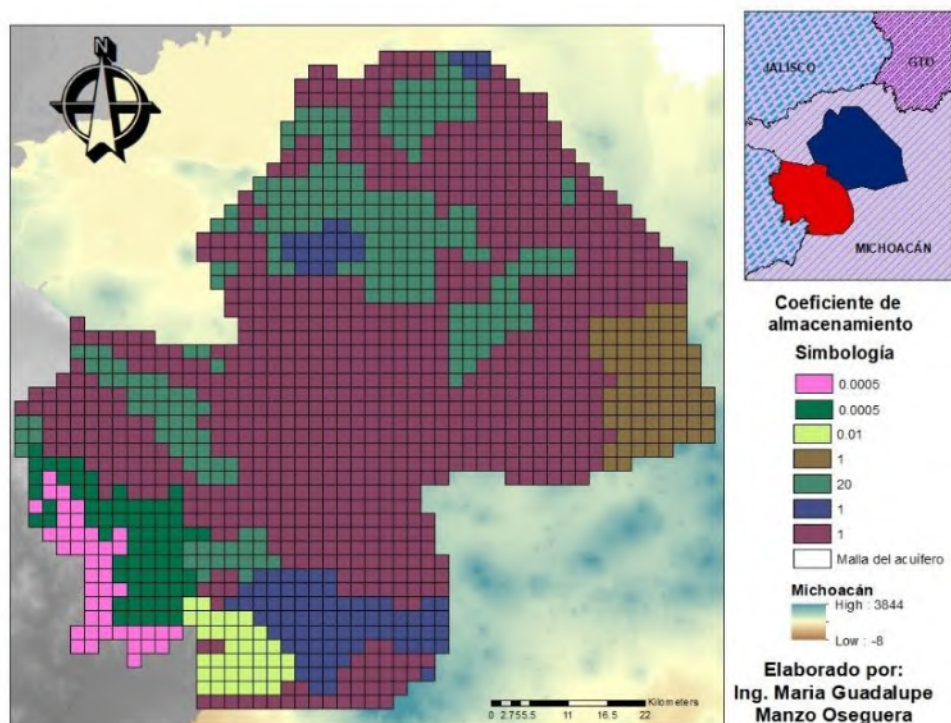


Figura 68. Coeficiente de almacenamiento para el acuífero.

La calibración del modelo se ve limitada debido a la escasa disponibilidad de datos. En este caso particular, únicamente se cuenta con registros de nivel estático

correspondientes a 3 años específicos. Para el año 2001 se dispone de información en 75 celdas de la malla, mientras que para el año 2008 se cuenta con datos en 64 celdas y para el año 2023, solo se cuenta con dato en 15 celdas. Esta restricción en la cantidad de puntos con observaciones reduce el nivel de detalle con el que puede evaluarse el ajuste del modelo a las condiciones reales del acuífero.

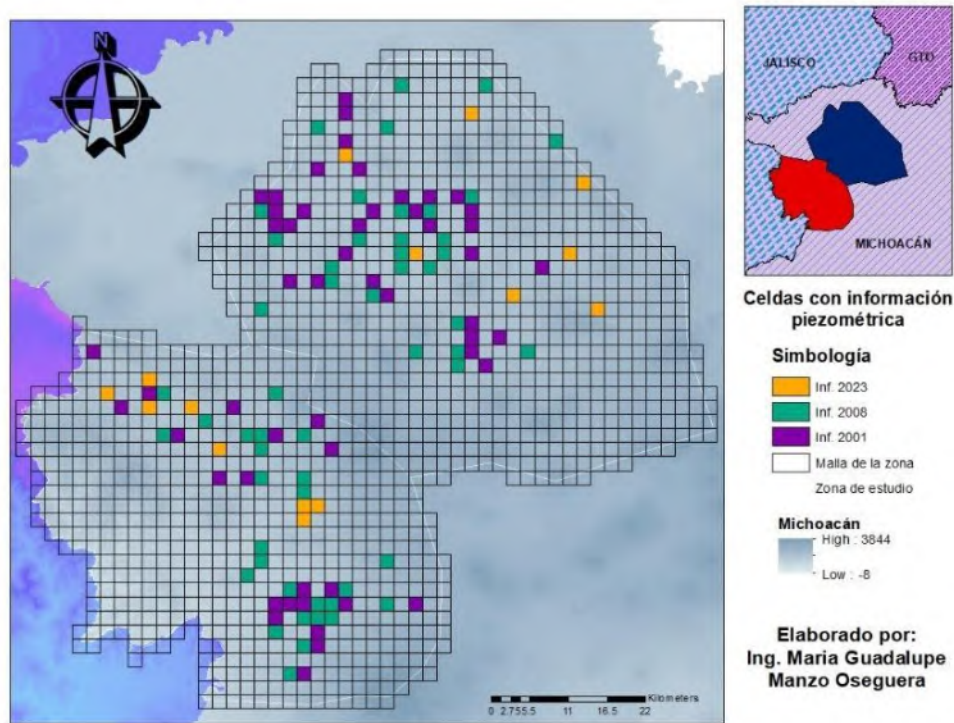


Figura 69. Celdas con información de niveles estáticos.

La calibración del modelo subterráneo en MODFLOW se realiza a partir del parámetro de la conductividad hidráulica, es el parámetro clave que determina la capacidad del medio geológico para transmitir agua subterránea. Modificando este valor, es posible simular diversos escenarios, cuyas variaciones se encuentran dentro de un rango definido entre un valor mínimo y uno máximo. Según la geología de la zona, se tienen distintos valores de conductividad, de esta manera se delimitan escenarios con diferentes combinaciones de valores.

La siguiente figura (Figura 70), representa todas las acciones elementales que ayudaran a generar las simulaciones en Modflow.

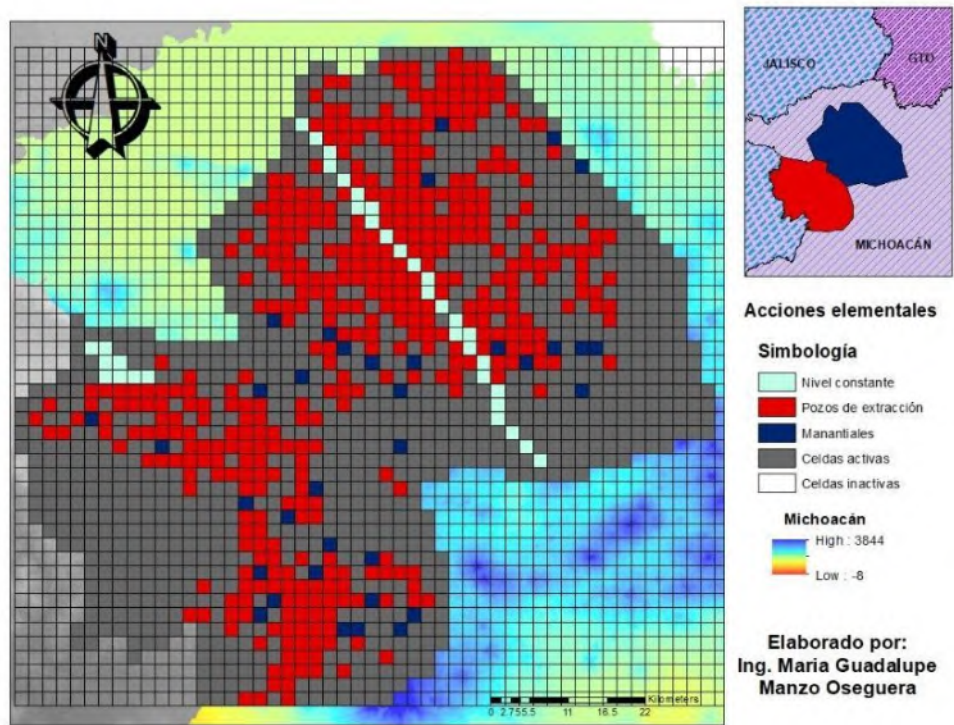


Figura 70. Mapa de representación de acciones elementales por las que estará sometido el modelo.

En la figura 71 se presenta la configuración del modelo de flujo subterráneo en PMWIN-MODFLOW, en la cual se representan las condiciones en el sistema acuífero.

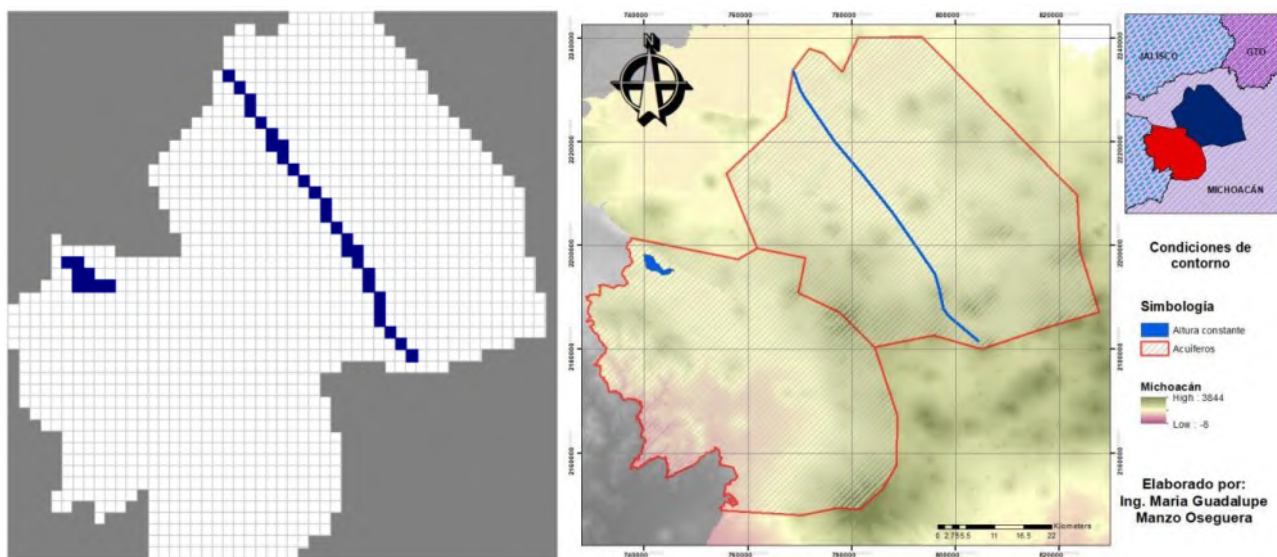


Figura 71. Configuración de los acuíferos en PMWIN – MODFLOW.

En la figura 72 se presenta la distribución de la altura piezométrica inicial obtenida tras la ejecución del modelo en Modflow y obtener la primera simulación. Esta imagen

representa el estado inicial del sistema acuífero modelado, reflejando las condiciones hidrológicas y geológicas actuales, para posteriormente realizar su calibración.

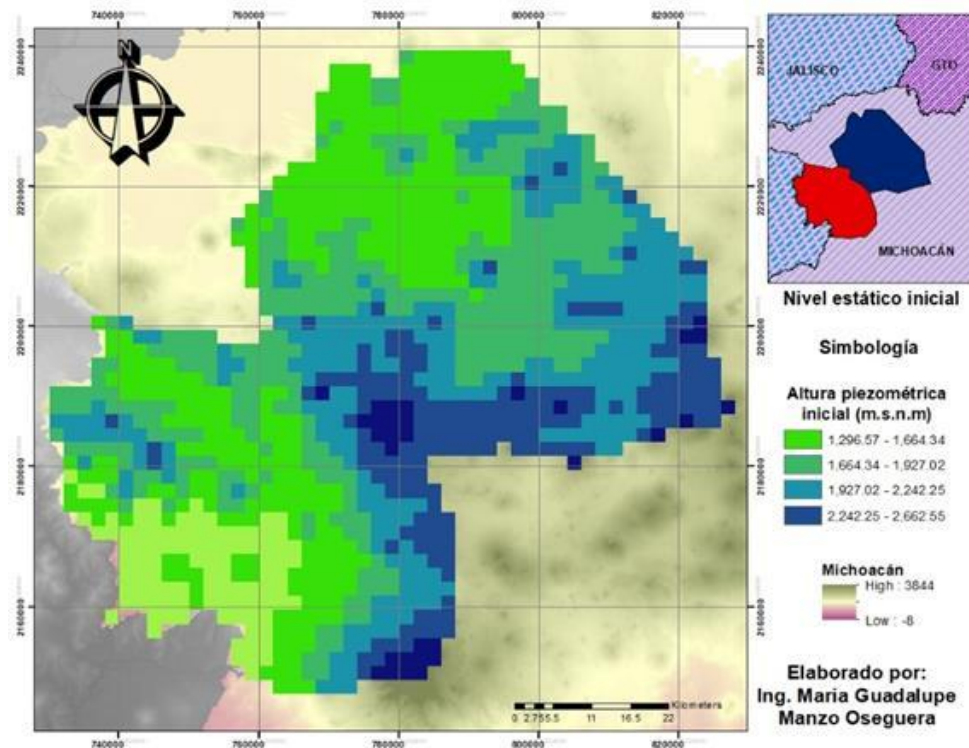


Figura 72. Altura Piezométrica inicial para el año 2001.

5.8 Trabajo de campo.

5.8.1 Colecta de muestras.

Para llevar a cabo el presente estudio, se realizaron dos muestreos en diferentes periodos con el objetivo de analizar las condiciones hidrogeológicas y la calidad del agua en el área de estudio.

El primer muestreo se realizó en el mes de julio de 2023, con el objetivo principal de registrar los niveles piezométricos de los pozos de extracción que se encontraban dentro de la red de monitoreo. Durante esta campaña, se logró medir los niveles piezométricos de varios puntos, lo cual permitió generar un panorama inicial sobre las condiciones del acuífero. Además, se recolectaron también cinco muestras de agua para determinar su calidad.

El segundo muestreo se llevó a cabo en el mes de julio de 2024. En esta ocasión, el enfoque se centró exclusivamente en la recolección de muestras de agua con el fin de realizar un análisis detallado de su calidad. No se llevaron a cabo mediciones de niveles

piezométricos, ya que el objetivo principal en el muestreo del 2024 era complementar el estudio químico del agua.

Ambos muestreos proporcionaron información para evaluar las condiciones del acuífero cambios en la calidad del agua, constituyendo así una base fundamental para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Como resultados obtenidos en la campaña de muestreo, llevada a cabo el 17 y 18 de julio del 2024, en las zonas de los municipios ubicados dentro de los acuíferos “Zamora y Cotija”, se incluyen los siguientes datos tomados en campo: nombre de la zona de muestreo, coordenadas UTM y elevación, tipo de zona de muestreo, fecha de muestreo y tipo de muestra tomada. Otros parámetros tomados en campo fueron la temperatura, la conductividad eléctrica (C. E.), cantidad de sólidos disueltos totales (S. D. T.) y el pH de cada muestra de agua recolectada.

En la figura siguiente se encuentra la localización de los puntos muestreados (Figura 73); así mismo, en las tablas se registran los datos de las muestras recolectadas, considerando también algunos de los parámetros que se obtuvieron con las pruebas de laboratorio.

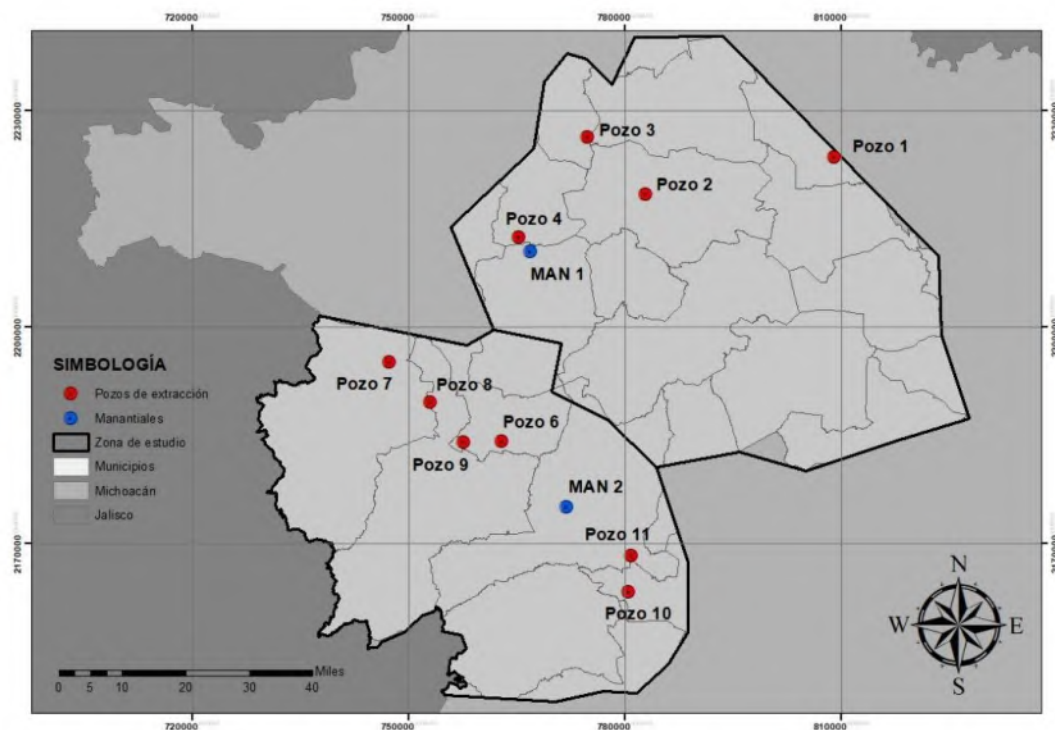


Figura 73. Pozos y manantiales muestreados (Julio 2024).

En las tablas 32 y 33 se presentan los resultados obtenidos de los parámetros medidos en campo durante los recorridos realizados en los años 2023 y 2024. Estas mediciones

forman parte del trabajo de monitoreo y caracterización de las condiciones hidrogeológicas de la zona de estudio.

Cada tabla contiene los valores registrados de los parámetros fisicoquímicos relevantes obtenidos directamente en sitio, con el propósito de evaluar las condiciones actuales del recurso hídrico. La información ha sido organizada por año de campaña, permitiendo así una comparación clara entre los resultados obtenidos en ambos periodos.

Tabla 32. Parámetros medidos en campo, muestreo (2023).

Sitio	Id	Clave	Nombre	Tipo de aprov	Fecha	T amb (°C)	T muestra (°C)	pH	C.E (ms/cm)	STD (ppm)	Nitrato en campo
1	1	CNA08458	Changuitiro	Urbano	03/07/23	22.6	24.4	8.7	0.57	400	20
10	2	CNA08447	Tlazazalca	Urbano	03/07/23	26.6	30.7	9.5	0.26	190	N/D
6	3	CNA08424	Purépero	Urbano	03/07/23	29.0	22.6	8.7	0.19	139	10
7	4	DLMIC1603	Sapaz Zamora	Urbano	03/07/23	24.5	33.4	9.3	0.32	212	N/D
9	5	Atapan A.P	Comunidad	Urbano	04/07/23	18.6	20.4	7.9	0.08	63	N/D
8	6	CNA0857	Rincón del Tepetate	Urbano	04/07/23	26.2	23.7	9.0	0.25	184	N/D
2	7	CNA08400	Comité Ixtlán	Urbano	04/07/23	34.0	35.4	8.8	0.26	188	N/D
3	8	CNA1622-226	El paso	Urbano	05/07/23	26.9	26.0	8.5	0.30	216	N/D
5	9	CNA1622-193	Tacatzcuaro	Urbano	05/07/23	28.5	26.1	8.1	0.13	98	N/D
4	10	La magdalena	Los manguitos	Agrícola	05/07/23	25.4	28.3	9.2	0.19	137	N/D

Tabla 33. Parámetros medidos en campo, muestreo (2024).

Sitio	Id	Clave	Nombre	Tipo de aprov	Fecha	T amb (°C)	T muestra (°C)	pH	C.E (ms/cm)	STD (ppm)	Nitrato en campo
1	P-1	Ecuandureo	Changuitiro	Urbano	17/07/24	23.4	25.3	5.7	0.53	375	<10
6	P-2	Zamora	La rinconada	Urbano	17/07/24	32.7	29.0	6.1	0.46	325	N/D
2	P-3	Comité Ixtlán	“La estanzuela”	Urbano	17/07/24	31.7	33.5	5.8	0.27	195	N/D
7	P-4	Chavinda	El gasolín	Urbano	17/07/24	27.3	27.7	6.2	0.29	211	N/D
8	M-1	Tangamandapio	El telonzo	Urbano	17/07/24	28.8	24.7	5.7	0.12	90	N/D
9	P-6	Tingüindín	OOSAPA	Urbano	18/07/24	24.7	21.5	5.1	0.08	64	N/D
3	P-7	Cotija	El paso	Urbano	18/07/24	30.3	29.0	6.4	0.23	171	N/D
4	P-8	La magdalena	Los manguitos	Agrícola	18/07/24	30.6	30.2	6.3	0.17	125	N/D
5	P-9	Tingüindín	Tacatzcuaro	Urbano	18/07/24	27.9	25.6	6.2	0.12	95	N/D
10	P-10	Uruapan	Santa Ana Ziostto	Agrícola	18/07/24	24.9	22.0	5.7	0.15	113	N/D
11	P-11	Los reyes	San José de Gracia	Urbano	18/07/24	18.6	19.5	6.5	0.09	69	N/D
12	M-2	Los reyes	Atapan	Urbano	19/07/24	18.3	18.4	5.4	0.07	60	N/D

El monitoreo de la zona de estudio fue realizado a lo largo de dos años, se logró recolectar muestras de cinco sitios comunes en ambos periodos, mientras que los otros monitoreos corresponden a diferentes ubicaciones. Esta variación en los pozos de monitoreo en los distintos periodos se atribuyó a que algunos de los sitios fueron inaccesibles.

5.9 Análisis de parámetros in si tu.

5.9.1 Temperatura.

La temperatura fue el primer parámetro medido en campo, tanto temperatura ambiente como la temperatura de la muestra, mostraron diversas variaciones. El grafico de temperatura de la muestra tiene una tendencia similar, pero con variaciones en sus valores de medición, la temperatura más alta encontrada fue en el sitio 2, corresponde al pozo con clave (CNA08400) que pertenece al comité de agua potable y se ubica en Ixtlán de los Hervores con una temperatura de 33.5°C y la más baja se observó en el sitio 1 pozo que pertenece al comité de agua potable de la localidad de Changuitiro, municipio de Ecuandureo con clave (CNA08458) con una temperatura de 24.4°C. En la visita a campo de Julio del 2023 se presentó la temperatura máxima y mínima en los pozos ya mencionados anteriormente. Sin embargo, en el sitio 5 se encuentran temperaturas muy similares en los dos periodos de visita, en 2023 este sitio tubo una temperatura de 26.1°C mientras que en 2024 la temperatura de la muestra fue de 25.6 este pozo pertenece a el comité de agua potable de la localidad de Tacatzcuaro, perteneciente al municipio de Tingüindín. La temperatura del agua subterránea está influenciada por varios factores del entorno. Depende del tipo de suelo y roca por donde se filtra, ya que algunos materiales retienen el calor mejor que otros, además, el clima de la región juega un papel importante, ya que en zonas frías el agua subterránea tiende a ser más fresca, mientras que en áreas cálidas puede ser más templada. En estos acuíferos se considera que existe una “zona neutra” de temperatura constante.

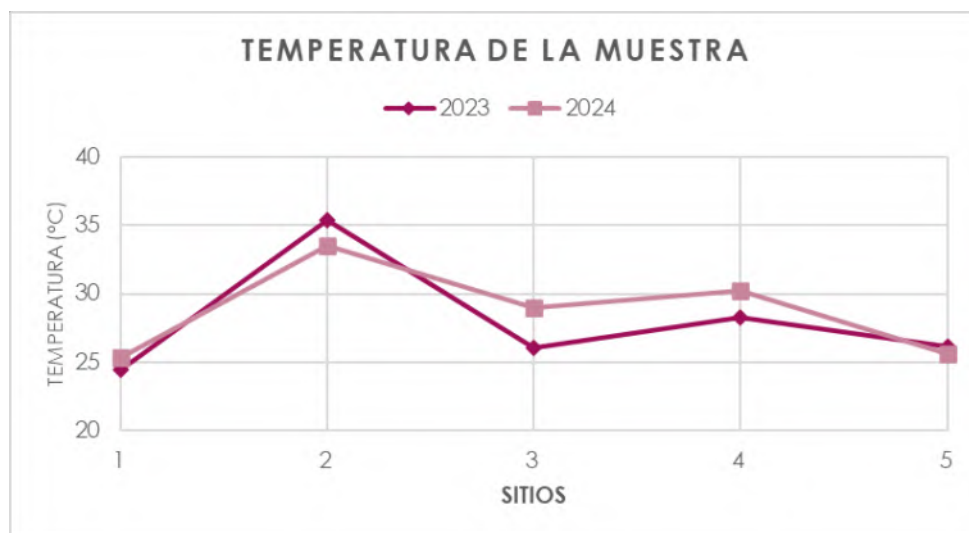


Figura 74. Valores de Temperatura de las muestras en (°C) de los sitios de muestreo.

La temperatura ambiente registrada durante los años 2023 y 2024 presentó una variación en un rango que oscila entre los 22 °C y los 30 °C. En ambos años, el sitio 2, correspondiente a Ixtlán de los Hervores, fue el que alcanzó las temperaturas más elevadas. Es importante destacar que el año 2024 registró las temperaturas más altas del periodo analizado, evidenciando un incremento de varios grados centígrados en comparación con el año anterior. Esta variación interanual sugiere un posible comportamiento de calentamiento en la zona, lo cual debe ser considerado en futuros análisis climáticos y ambientales.

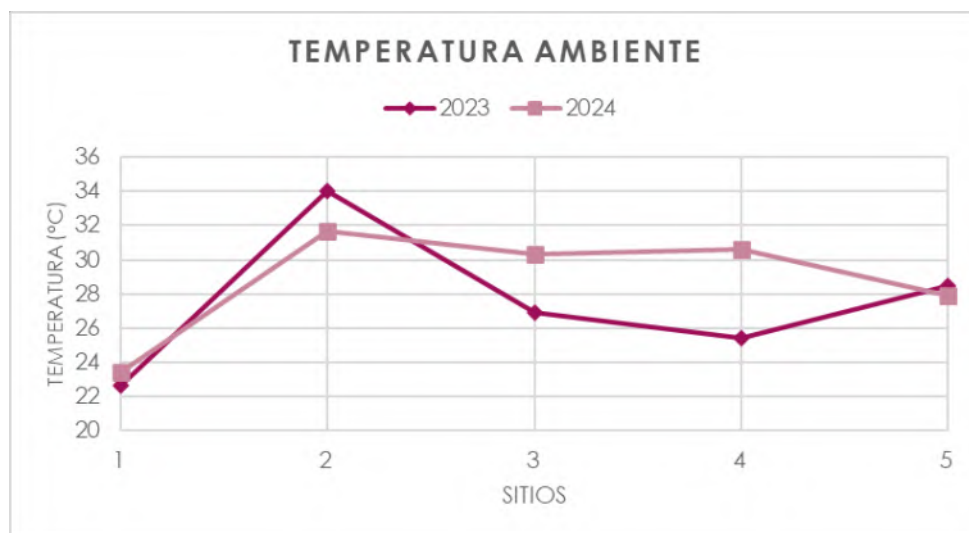


Figura 75. Valores de Temperatura del ambiente en la toma de muestra en (°C).

5.9.2 Conductividad eléctrica.

La conductividad eléctrica es el siguiente parámetro evaluado en campo. Esta propiedad indica la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica y está directamente relacionada con la concentración de iones disueltos. Su representación se muestra en la figura siguiente. Se aprecia una tendencia similar en el comportamiento de ambas campañas de medición, a excepción del sitio 3 del 2023, este pozo es llamado “El paso” y se ubica en el municipio de Cotija. La mayor conductividad eléctrica fue presentada en el sitio 1 en ambos muestreos, este es un pozo que se encuentra ubicado en la localidad de Changuitiro perteneciente al municipio de Ecuandureo, mientras que la conductividad más baja se encuentra en el sitio 5, pozo ubicado en el municipio de Tingüindín. Los niveles de conductividad en el agua subterránea oscilan entre 100 y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cabe destacar que, en la mayoría de los casos, estas aguas corresponden a soluciones altamente diluidas, por lo que su conductividad está directamente relacionada con la concentración de minerales disueltos, esto significa que, si en un lugar hay más minerales disueltos en el agua, la conductividad será más alta, en el sitio 1, fue donde se midió la

mayor conductividad, también hubo más sólidos disueltos, lo que indica que el agua contiene una mayor cantidad de sales y minerales.

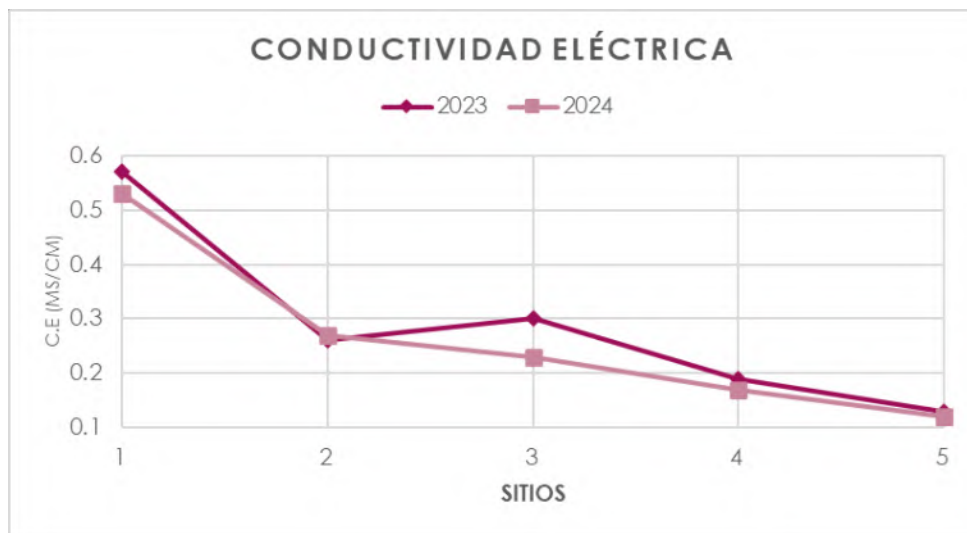


Figura 76. Valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) de los sitios de muestreo.

5.9.3 Sólidos disueltos totales.

Los sólidos disueltos totales (SDT) están relacionados directamente con la conductividad eléctrica y dureza, y miden la cantidad de distancias disueltas en el agua, sean o no volátiles. Los resultados obtenidos de la medición de solidos disueltos totales se muestran en la figura 77. La NOM-127-SSA1-1994 tiene un límite permisible de 1000 mg/L, por lo cual en la gráfica se observa que todos los sitios cumplen con este límite. Además, el sitio que presento mayor concentración de SDT fue el número 1 en ambas campañas de muestreo con un valor de 400 mg/L en 2023 y 375 mg/L en 2024. Por otro lado, el sitio con menor concentración de SDT en ambas campañas fue el numero 1 con 98 mg/L en 2023 y 95mg/L en 2024, al igual que la conductividad eléctrica, incluso ambos gráficos tienen una tendencia similar, por lo que se confirmando la relación entre la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales.

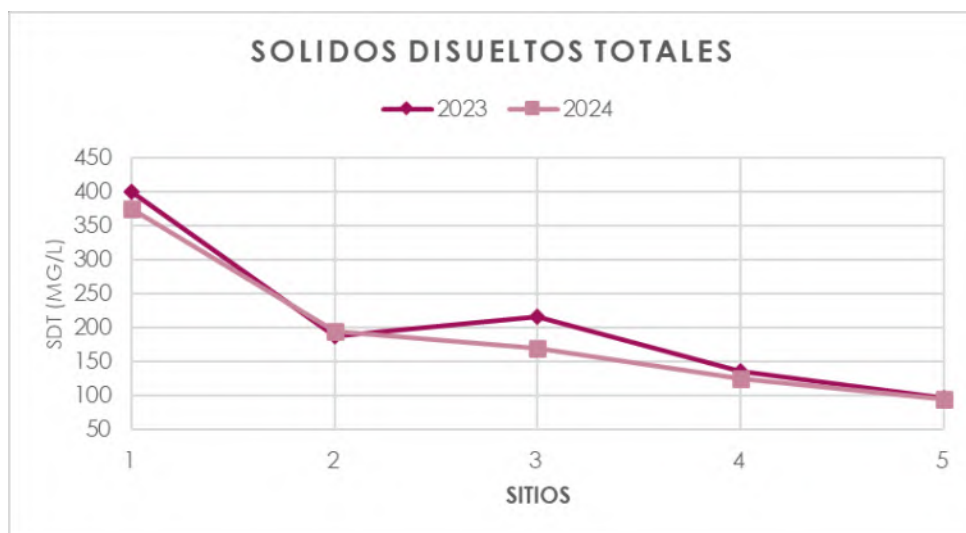


Figura 77. Valores de solidos disueltos totales (mg/L) de los sitios de muestreo.

5.9.4 Dureza.

La dureza total del agua hace referencia a la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas en forma equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3) (DOF 2004). En el agua subterránea la dureza varía entre 10 y 300 mg/L, pero se puede alcanzar hasta 2000 mg/L o más (Toscano Reyes et al., n.d.).

Los resultados de dureza obtenidos en este estudio, está representado en la figura siguiente:

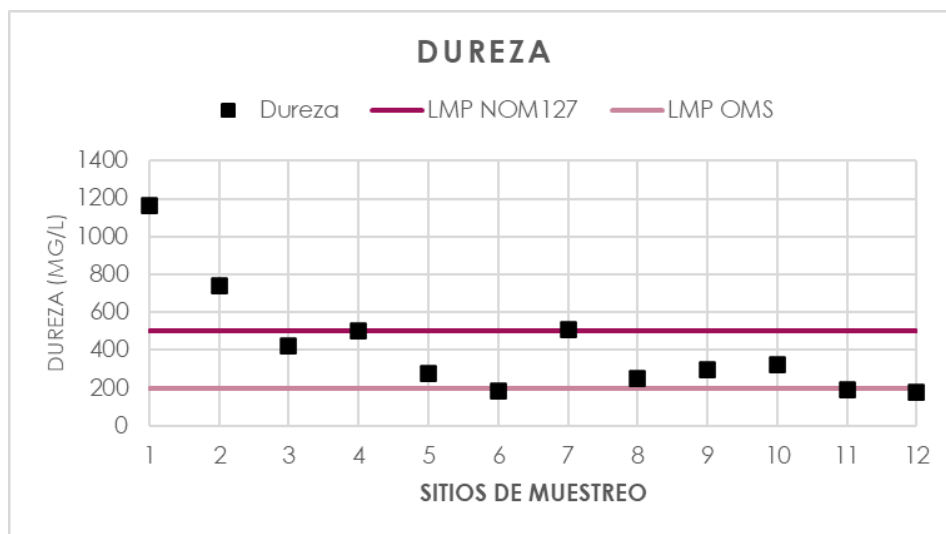


Figura 78. Valores de dureza (mg/L) en la zona de estudio.

De las 12 muestras de agua subterránea analizadas, se determinó la dureza total, obteniéndose valores que oscilan entre 181.2 mg/L y 1161 mg/L como CaCO_3 . Estos resultados muestran una amplia variabilidad (Figura 78), lo cual es común en zonas donde las características hidrogeoquímicas están influenciadas por el tipo de roca, o el tiempo de residencia del agua en el acuífero. Todas las muestras se clasifican como agua muy

dura, ya que superan los 180 mg/L. La muestra con mayor dureza es de 1161 mg/L, lo que representa una dureza extremadamente elevada, posiblemente asociada a una alta presencia de calcio y magnesio por disolución de calizas o yesos en el acuífero. Aunque la dureza no representa un riesgo directo para la salud, estos niveles elevados requieren medidas de manejo o tratamiento si se destina el recurso al consumo humano sobre todo porque 2 sitios están por fuera de los límites permisibles por las normas.

5.10 Análisis de iones mayoritarios.

La mayoría de las sustancias disueltas en el agua subterránea están en forma de iones, es decir, partículas con carga eléctrica. Algunos de estos iones están casi siempre presentes y representan la mayor parte de los compuestos disueltos en el agua.

Los principales cationes (iones con carga positiva) son: Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^+), Potasio (K^+). Mientras que los principales aniones (iones con carga negativa) incluyen: Bicarbonato (HCO_3^-), Nitrato (NO_3^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Cloruro (Cl^-).

Los principales iones presentes definen la composición química del agua y desempeñan un papel fundamental en su calidad y propiedades. Las concentraciones de los cationes y aniones predominantes se presentan en la tabla siguiente.

Cabe mencionar que los análisis de iones mayoritarios solo se llevaron a cabo en el muestreo de campo realizado en 2024 ya que el muestreo de 2023, no se incluyó este análisis, debido a que en ese momento no formaba parte del alcance del estudio ya que solo se enfocó en la medición de niveles piezométricos y no se cuenta con los datos para dicho periodo (2023).

Tabla 34. Resultados de iones analizados y balance iónico.

Sitio	Id	Campaña	NO_3^- (mg/L)	PO_4^{3-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	Balance iónico (%)
1	P-1	Julio 24	15.39	<0.88	29.78	34.041	312.00	120.00	210.00	115.00	18.59%
6	P-2	Julio 24	0.098	<0.88	15.89	18.794	360.00	100.00	120.00	110.40	8.46%
2	P-3	Julio 24	0.098	<0.88	14.89	26.163	170.00	50.00	72.00	147.20	34.91%
7	P-4	Julio 24	1.145	<0.88	7.94	6.341	230.00	52.00	90.00	101.20	19.42%
8	M-1	Julio 24	1.206	<0.88	6	7.739	102.00	28.00	50.00	48.30	21.43%
9	P-6	Julio 24	0.657	<0.88	6	5.15	78.00	22.00	32.00	36.80	19.10%
3	P-7	Julio 24	0.273	<0.88	13.90	10.153	216.00	88.00	70.00	96.60	20.66%
4	P-8	Julio 24	0.326	<0.88	6.98	5.15	134.00	38.00	38.00	43.70	7.45%
5	P-9	Julio 24	0.273	<0.88	6.95	5.15	118.00	44.00	46.00	41.40	16.73%
10	P-10	Julio 24	1.813	<0.88	29.78	7.612	76.00	40.00	54.00	46.00	21.12%
11	P-11	Julio 24	1.649	<0.88	6	6.341	66.00	24.00	32.00	32.20	21.60%
12	M-2	Julio 24	1.141	<0.88	6	5.15	68.00	20.00	32	29.9	17.97%

5.10.1 Calcio (Ca^{2+}).

El calcio (Ca^{2+}) generalmente representa el catión dominante, ya que se encuentra ampliamente distribuido en formaciones ígneas, sedimentarias y metamórficas. De acuerdo con Donaldo (2009), su concentración en este tipo de aguas puede fluctuar considerablemente, desde 10 hasta 250 mg/L ya que son en aguas dulces.

En este estudio, el Ca^{2+} fue un catión predominante, como se muestra en la tabla 34 y en la siguiente figura (Figura 79), las concentraciones de este ion en la zona de estudio oscilan entre 20 mg/L y 120 mg/L, lo que indica que esta variabilidad se encuentra dentro de los rangos típicos para aguas subterráneas, donde el calcio suele ser uno de los cationes predominantes, principalmente debido a la disolución de minerales como calcita y dolomita presentes en las formaciones geológicas. El sitio que tuvo la mayor concentración de este parámetro fue el sitio 1, el pozo que corresponde a Changuitiro, municipio de Ecuandureo, este alto contenido es asociado posiblemente a una intensa disolución de carbonatos y la menor concentración se ubicó en el sitio 12, con 20 mg/L que corresponde al manantial de la localidad de Atapan, municipio de Los reyes Michoacán y esta última concentración se ubica en el límite inferior de la categoría de Ca^{2+} .



Figura 79. Concentraciones de Calcio (Ca^{2+}) de las 12 muestras analizadas.

5.10.2 Magnesio (Mg^{2+}).

El magnesio (Mg^{2+}) es un catión menos abundante que el calcio (Ca^{2+}) en las aguas subterráneas. Se origina principalmente de la disolución de rocas carbonatadas, evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos. En la mayoría de las aguas subterráneas, su concentración generalmente no excede los 40 mg/L, y según (Emilio Custodio Gimena, 2001) Su concentración puede estar entre 1 y 100 mg/L en aguas dulces.

En la figura siguiente (Figura 80) se muestra los resultados de las concentraciones de Mg^{2+} que oscila entre 32 mg/L y 210 mg/L elevando el rango de concentraciones catalogado por (Custidio 2001), la NOM-127-SSA1-2021 no establece un límite máximo para el magnesio, dado que no representa un riesgo sanitario, aun así el 50% de las muestras presentan valores aceptables, 33% se encuentran en un rango moderado y 2 de las 12 muestras superan los 125 mg/L con 210 mg/L en el sitio 1 que pertenece al pozo del municipio de Ecuandureo y con 120 mg/L en el sitio 6, pozo perteneciente al municipio de Zamora.

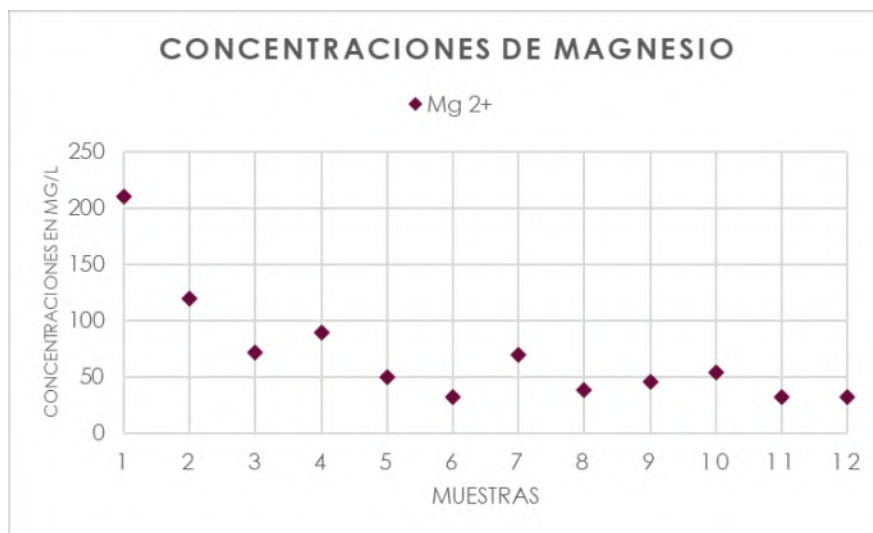


Figura 80. Concentraciones de Magnesio (Mg^{2+}) de las 12 muestras analizadas.

5.10.3 Sodio (Na^+).

Las sales de sodio (Na^+) son muy solubles en el agua y tienden a permanecer disueltas, ya que no forman compuestos insolubles que precipiten, como ocurre con el calcio (Ca^{2+}). Sin embargo, el Na^+ puede ser retenido por ciertos tipos de arcillas con alta capacidad de intercambio catiónico. En este proceso, el sodio puede ser reemplazado por calcio (Ca^{2+}), lo que resulta en una reducción de la dureza del agua, las concentraciones en aguas subterráneas suelen estar entre 1 y 150 mg/L, aunque no es raro encontrar contenidos mayores.

Las concentraciones de sodio en las muestras de la zona de estudio oscilan entre 29.9 mg/L y 147.20 mg/L (Figura 81), lo que significa que todos los sitios se encuentran dentro del límite estipulado este catión es común en aguas subterráneas y su concentración se ve influida por la interacción agua-roca. Este parámetro no representa un riesgo directo para la salud. Aun así, el 58% de las muestras presentan bajas concentraciones, y el 33% resultan con concentraciones elevadas. El sitio 3, referente al pozo ubicado en el municipio de Ixtlán de los hervores, en una localidad llamada “La estanzuela” coincide en ser el pozo que presenta la mayor concentración de este catión con 147.20 mg/L y la

concentración mínima se ubicó en el sitio 12, que corresponde al manantial de la localidad de Atapan Michoacán.



Figura 81. Concentraciones de Sodio (Na^+) de las 12 muestras analizadas.

5.11 Análisis de iones minoritarios.

5.11.1 Bicarbonatos (HCO_3^-).

En aguas con un pH menor a 8.3, como ocurre en la mayoría de las aguas subterráneas, el ion bicarbonato es la especie carbonatada predominante. En cambio, el ion carbonato comienza a aparecer en concentraciones significativas cuando el pH supera este valor. En este tipo de aguas, la concentración de bicarbonatos (HCO_3^-) suele oscilar entre 50 y 400 mg/L, aunque en algunas ocasiones puede alcanzar hasta 800 mg/L. Las concentraciones de bicarbonatos es un parámetro clave en la calidad del agua ya que afecta procesos de corrosión y también sus concentraciones varían según la geología del acuífero y la interacción del agua con minerales como la calcita y la dolomita.

El HCO_3^- se encontró en un rango de 66 mg/L a 360 mg/L (Figura 82), especificando que la mayor concentración se presentó en el sitio 6 que es el pozo ubicado en el municipio de Zamora, dentro de la localidad de “La rinconada” mientras que la concentración mínima se encontró en el sitio 11, perteneciente a el pozo ubicado en la localidad de San José de Gracia, municipio de Los Reyes Michoacán, por lo que concluimos que las concentraciones presentadas se encuentran de una manera “normal” ya que las muestras analizadas se encuentran dentro de los rangos comúnmente observados en aguas subterráneas, aunque en dos casos se identificaron niveles elevados (>300 mg/L), que podrían estar relacionados con una mayor residencia del agua en el acuífero o con una composición litológica rica en carbonatos. Dado que la NOM-127-SSA1-2021 no establece un límite normativo para bicarbonatos, los resultados no indican un incumplimiento regulatorio.

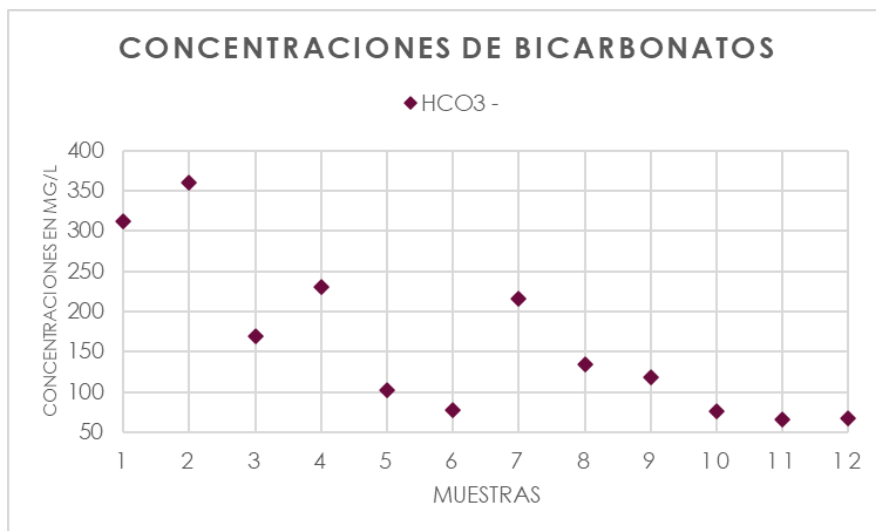


Figura 82. Concentraciones de Bicarbonatos (HCO_3^-) de las 12 muestras analizadas.

5.11.2 Sulfatos (SO_4^{2-}).

El ion sulfato (SO_4^{2-}) se origina principalmente por la disolución de minerales como el yeso, aunque también proviene de la oxidación bacteriana de compuestos sulfurosos y de aportes de aguas volcánicas o termales con alto contenido de azufre.

Su concentración en aguas subterráneas puede variar significativamente, situándose entre 2 y 150 mg/L. Según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, el límite máximo permitido para sulfatos en el agua potable es de 400 mg/L, y según la OMS tiene como límite permisible 500 mg/L.

Los resultados obtenidos al evaluar este anión (Figura 83) se encuentran en un rango de valores que oscilan entre 5.15 mg/L y 34.04 mg/L, esto indica concentraciones notablemente bajas todas muy por debajo del límite máximo permisible de 400 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021. Por lo tanto, desde el punto de vista de calidad para consumo humano, no existe ningún riesgo ni afectación relacionada con este parámetro. Estos resultados sugieren un entorno hidrogeológico con escasa influencia de minerales sulfatados y probablemente con un grado bajo de mineralización general, la mayor concentración se ubicó en el sitio 1, ubicado en la localidad de Changuitiro, municipio de Ecuandureo Michoacán, mientras que el menor se ubica en el sitio 9, 5 y 12, que según la tabla del muestreo de Julio 2024, pertenecen a los poblados de Tingüindín, Tacatzcuaro y el Manantial de Atapan.

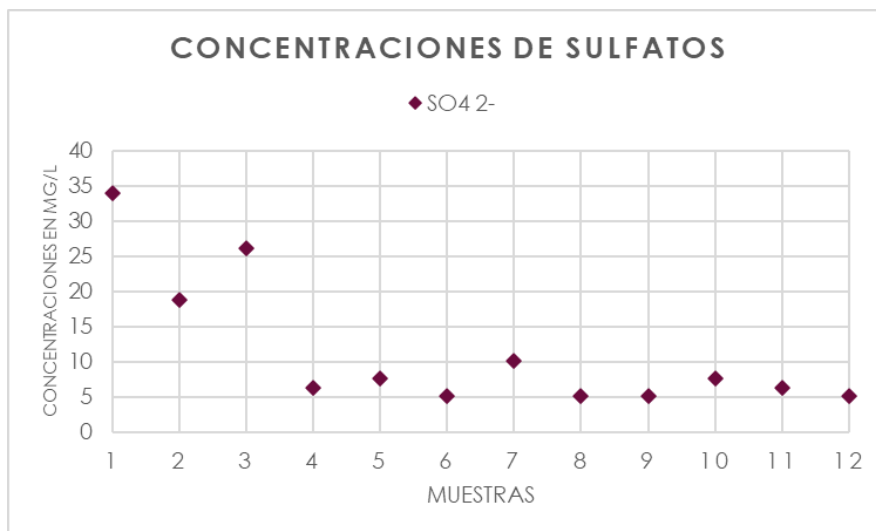


Figura 83. Concentraciones de Sulfatos (SO_4^{2-}) de las 12 muestras analizadas.

5.11.3 Cloruros (Cl^-).

Las rocas por lo general presentan escasa proporción de cloruros. Además, este ion se disuelve en el agua fácilmente por lo que no forma sales de baja solubilidad, en aguas subterráneas su estado químico permanece estable, no se oxida ni se reduce. También su absorción en el suelo y sedimentos es mínima, y no interviene de manera significativa en reacciones bioquímicas. La concentración de cloruros para aguas subterráneas se encuentra entre 10 y 2000 mg/L.

Los resultados de este parámetro se muestran en la figura 84 y varían entre 6 y 29.78 mg/L en este caso una baja concentración de cloruros se asocia a que ambos acuíferos son alimentados por precipitación directa o infiltración de agua de lluvia con escasa mineralización, todas las muestras están muy por debajo del límite normativo de 250 mg/L, la concentración máxima observada que fue de 29.78 mg/L ubicada en el sitio 1, representa apenas el 12% del valor límite permisible, lo cual es considerado excelente desde el punto de vista de calidad del agua y con estas concentraciones de resultado no se observa presencia significativa de contaminación por sales ni aguas residuales. Este comportamiento es típico de acuíferos bien protegidos, con buena calidad química y bajo impacto de actividades humanas, aunque la agricultura es la principal actividad en ambos acuíferos.

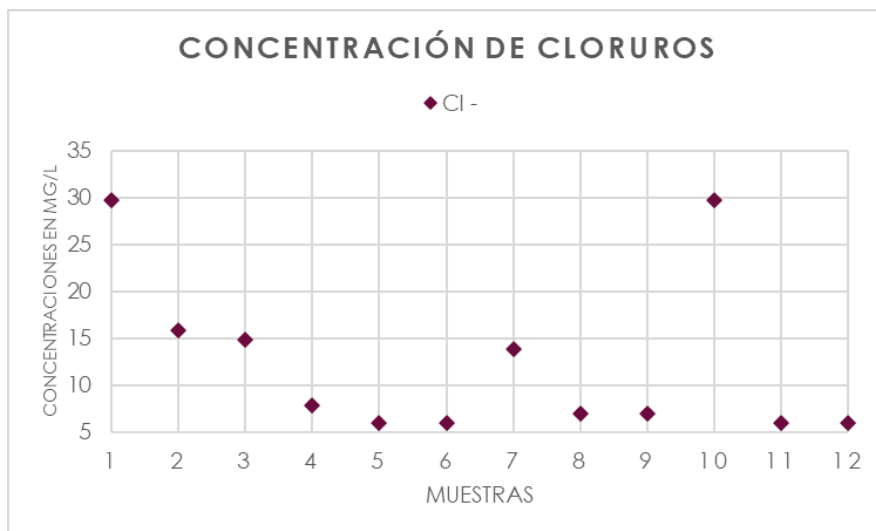


Figura 84. Concentraciones de Cloruros (Cl⁻) de las 12 muestras analizadas.

5.11.4 Nitratos (NO₃⁻).

Los nitratos pueden encontrarse en aguas subterráneas debido a la disolución de formaciones geológicas que los contienen. En condiciones no contaminadas, su concentración generalmente no supera los 10 mg/L, aunque puede variar considerablemente. La medición de N-NO₃ (nitrato) y N-NH₃ (amoníaco) es significativa, ya que son indicadores clave de contaminación, permitiendo distinguir entre fuentes antiguas (NO₃⁻) y recientes (N-NH₃). Además, su presencia indica el grado de oxidación que ha tenido lugar en el agua (Toscano Reyes et al., 2019).

Los resultados de nitratos (Figura 85) se mantuvieron en concentraciones muy bajas en la mayoría de los sitios cuyos valores de nitratos varían entre 0.098 mg/L y 15.39 mg/L, por lo que los valores no rebasaron lo mencionado de aguas subterráneas no contaminadas (10 mg/L) a excepción del sitio 1, pozo ubicado en la localidad de Changuitiro, con 15.39 mg/L, rebasando el límite permisible por la NOM-127-SSA1-1994 que es de 11 mg/L este valor podría estar relacionado con influencia puntual de actividades humanas, aunque sin representar riesgo sanitario se encuentra en una clasificación de “contaminación moderada”, es una clasificación que indica una contaminación por fertilizantes, aguas residuales o lixiviados.. Omitiendo el sitio 1, el rango de concentraciones de los 11 sitios más se mantuvo entre 0.098 y 1.813 mg/L indicando un nivel natural de nitratos, y refiriéndose a aguas no afectadas por lo que reflejan, en general, una buena calidad química del agua respecto a la presencia de nitratos, aunque se recomienda mantener monitoreo preventivo.

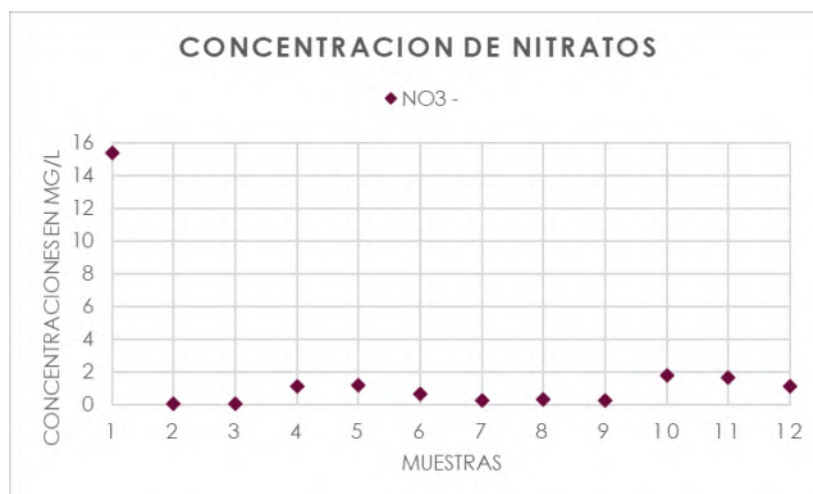


Figura 85. Concentraciones de Nitratos (NO₃⁻) de las 12 muestras analizadas.

5.12 Balance iónico

Se calculó el porcentaje de error utilizando la fórmula del balance iónico, con el propósito de verificar el equilibrio de cargas en 12 muestras recolectadas durante la campaña de muestreo de Julio 2024. Los límites comúnmente aceptados para el error del balance iónico son <5%, que rara vez es alcanzado, <10% es un error muy bueno, de 10-15% es un error aceptable, de 15-20% es dudoso y mayor a 20% hay que hacer una revisión necesariamente. En el 40% de las muestras se presenta un error mayor al 20% lo que indica que el balance iónico no cierra adecuadamente, lo cual requiere una revisión detallada, sin embargo en estudios de preliminar, errores del balance iónico de hasta un 20-25% pueden considerarse tolerables, siempre que se reconozcan sus limitaciones, en este caso se tribuyen estos porcentajes posiblemente a la completitud del análisis, mediciones inexactas, posibles errores de laboratorio o incluso que las condiciones de muestreo y/o análisis no fueron óptimas.

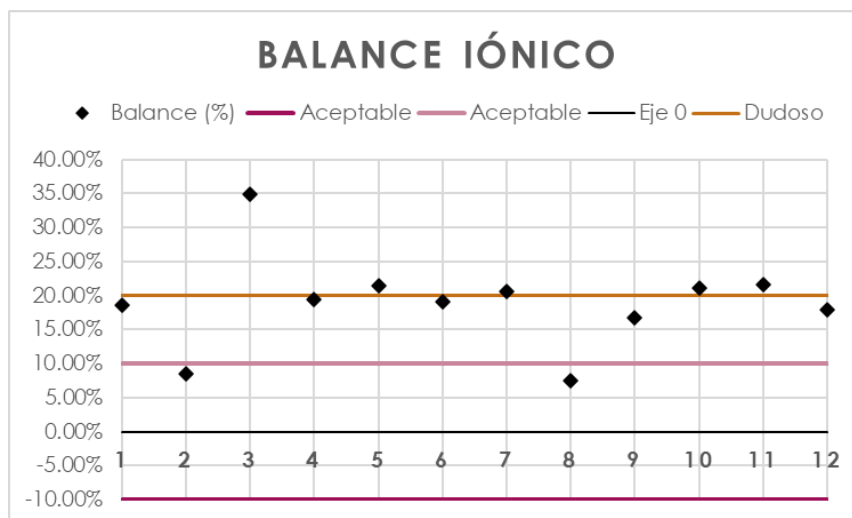


Figura 86. Representación gráfica del Balance iónico.

5.13 Arsénico (As).

El elemento traza determinado en esta investigación fue el arsénico (As), ya que es un elemento tóxico que puede encontrarse de manera natural en acuíferos, especialmente en zonas volcánicas, pero también por actividades antropogénicas, la NOM-127-SSA1-2021 establece un límite máximo permisible (LMP) de 0.025 mg/L de arsénico en agua destinada para consumo humano. Este límite está basado en el riesgo que representa su toxicidad crónica. Todas las muestras, incluida la más alta que fue de 0.0063 mg/L, se encuentran muy por debajo del límite máximo permitido, ya que es un valor que representa apenas el 25% del límite, lo cual indica una muy baja presencia de arsénico en el agua. Las otras 11 muestras muestran una concentración <0.0021 mg/L, lo que significa que el agua en todas las muestras es apta para consumo humano en cuanto a este parámetro, sin representar riesgo toxicológico.

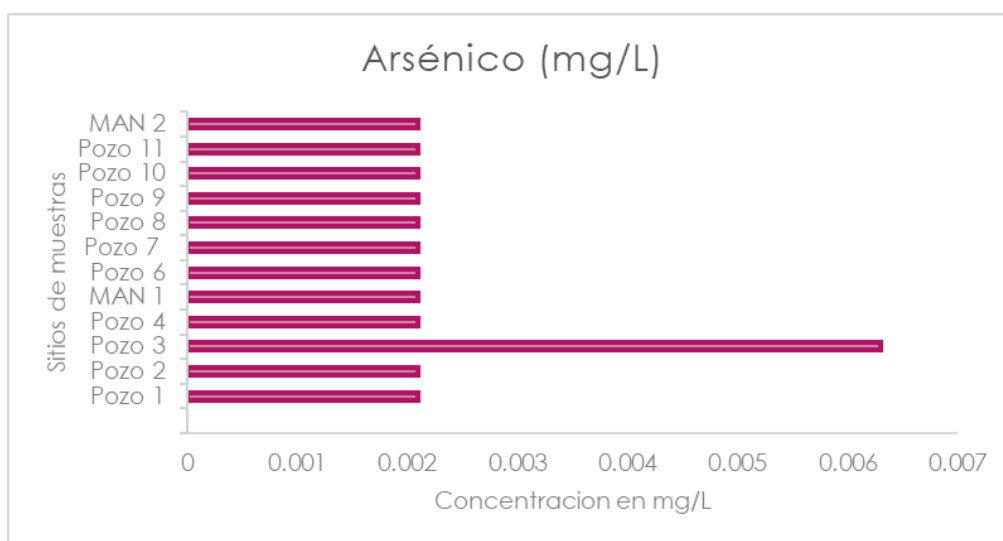


Figura 87. Concentración de As (mg/L) en los sitios de muestreo (Julio 2024).

5.14 Distribución espacial de los parámetros analizados del agua subterránea.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) tienen múltiples usos y resultan fundamentales en áreas como la gestión de recursos naturales (Toscano Reyes et al., n.d.) Para interpolar los datos sobre la calidad del agua se empleó el método "IDW" utilizando el software ArcMap 10.5. A continuación, se presentan los mapas generados mediante esta técnica, que reflejan la distribución espacial de algunos parámetros evaluados en la calidad del agua subterránea de la zona estudiada.

Tabla 35. Simbología de los pozos de extracción muestreados.

Sitio	Julio 2024	Julio 2023
1	P-1	P-1
2	P-3	P-2
3	P-7	P-3
4	P-8	P-4
5	P-9	P-5
6	P-2	P-6
7	P-4	P-7
8	M-1	P-8
9	P-6	P-9
10	P-10	P-10
11	P-11	-
12	M-2	-

5.14.1 Parámetros de campo.

▪ Temperatura

En las siguientes dos figuras mostradas consecutivamente, se observa la distribución de las temperaturas a lo largo de toda la zona ubicada entre los dos acuíferos estudiados, donde se aprecia que las temperaturas más bajas se prevalecieron en la zona sur del acuífero de Cotija abarcando completamente el municipio de Los reyes, y las orillas de los municipios, Peribán, Tocumbo, y Tingüindín. Por otra parte, las temperaturas más altas se encontraron en la zona norte de ambos acuíferos, abarcando municipios de Cotija, Chavinda, Ixtlán y parte del municipio de Ecuandureo.

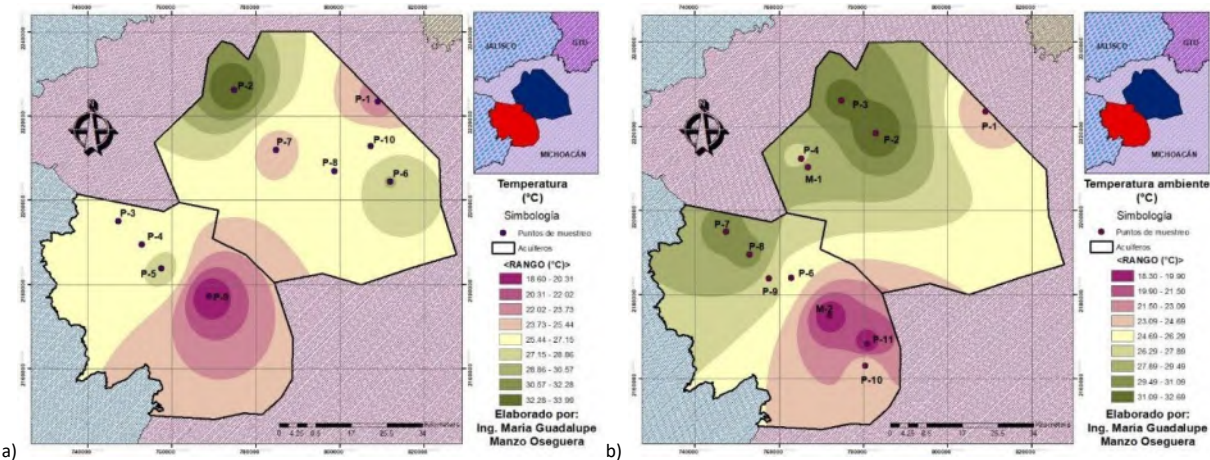


Figura 88. Mapas de distribución espacial de temperatura.

a) Julio 2023 b) Julio 2024

El análisis de temperaturas registradas en los sitios de estudio durante los años 2023 y 2024 muestra variaciones moderadas entre ambos periodos, en general, se observa una tendencia leve al aumento de temperatura en algunos puntos, siendo los municipios de Cotija Tocumbo y Tingüindín los que presentaron el incremento más notable, pasando de aproximadamente de 28.3°C a 30.2°C en el sitio 4, el sitio 2, que registró la temperatura más alta en ambos años es el pozo ubicado en Ixtlán, muestra una ligera disminución en 2024 (de 35.4°C a 33.5°C), aunque sigue destacándose como el punto más cálido de la zona.

▪ Conductividad eléctrica.

Los mapas presentados en las siguientes figuras corresponden a la distribución espacial de la conductividad eléctrica, donde es muy similar en las dos campañas de colectas, únicamente se diferencian en los rangos, estableciendo que en el 2023 se presentaron mayores conductividades, concretamente en el noroeste del acuífero de Zamora, mientras que las conductividades más bajas se encuentran en un rango entre 60 y 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alrededor del acuífero de Cotija, lo que indica que con aguas con pocos minerales disueltos, de baja salinidad y adecuada para el consumo humano, y en el acuífero de Zamora, el cual tiene una conductividad moderada, indica una presencia de minerales naturales que son comunes en aguas subterráneas, y de igual manera es apta para consumo humano y riego.

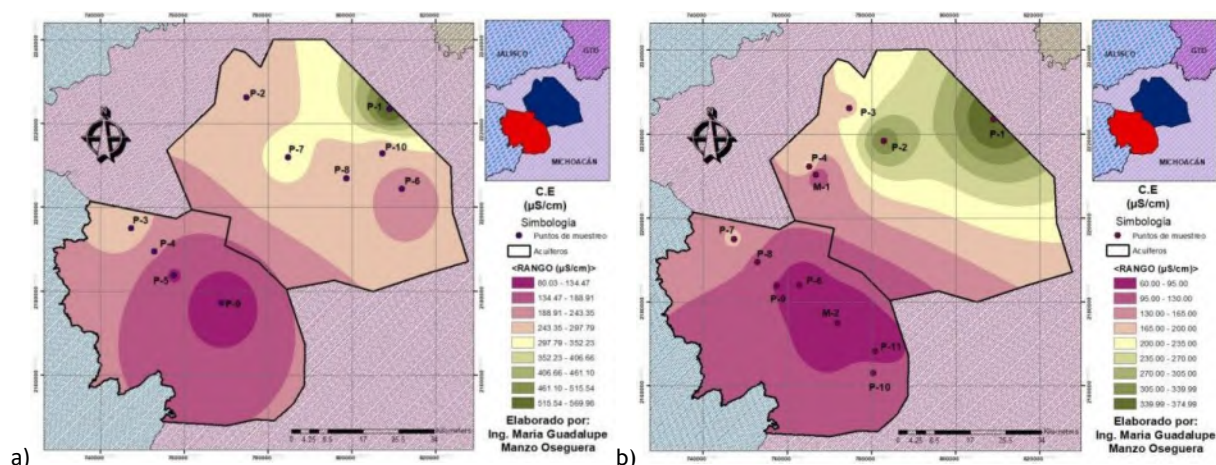


Figura 89. Mapas de distribución espacial de la conductividad eléctrica.
a) Julio, 2023 b) Julio, 2024

▪ Sólidos Disueltos Totales (SDT).

La representación de los sólidos disueltos totales se muestra en las siguientes dos figuras, donde de muestra una tendencia similar en los dos periodos, los valores oscilan entre 95 mg/L y 400 mg/L, lo cual indica que el agua evaluada se encuentra dentro del rango de

baja a moderada mineralización, según criterios hidrogeoquímicos y donde la mayor concentración de estos sólidos se encontró en la zona noreste del acuífero de Zamora en el municipio de Ecuandureo y las menores en el acuífero de Cotija, en términos generales, se observa una ligera disminución en las concentraciones de SDT en la mayoría de las muestras de 2023 a 2024, lo que podría estar relacionado con procesos de dilución natural por recarga o variaciones estacionales, todos los valores registrados están muy por debajo del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-2021, por lo que el agua puede considerarse adecuada para consumo humano en cuanto a este parámetro.

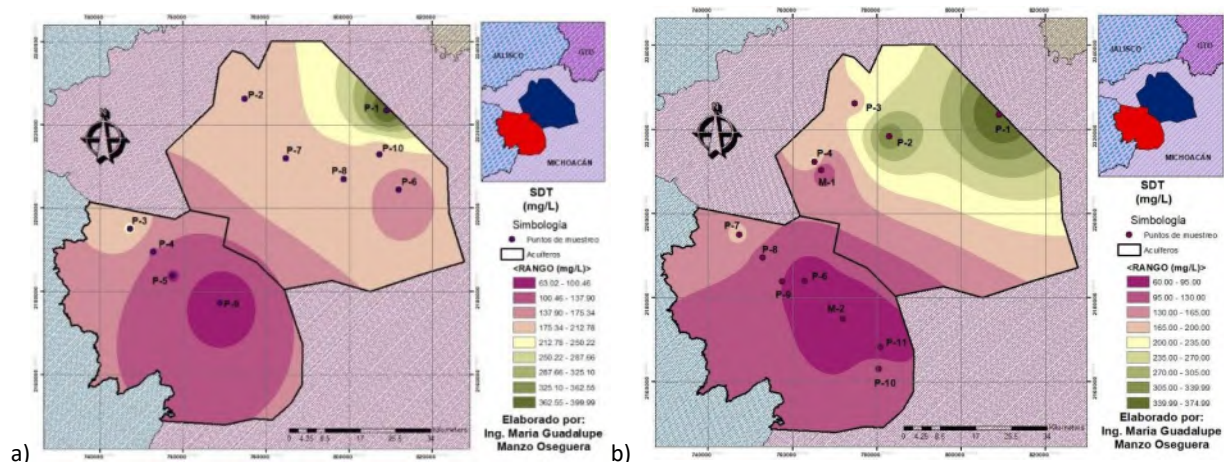


Figura 90. Mapas de distribución espacial de Sólidos Disueltos Totales (SDT).
a) Julio, 2023 b) Julio, 2024

5.14.2 Iones mayoritarios.

A partir de los iones mayoritarios y los elementos analizados en las muestras de agua, los mapas de distribución espacial únicamente se presentarán los resultados correspondientes al muestreo realizado en el año del 2024. Esto se debe a que, como ya lo hemos explicado anteriormente, en la campaña de muestreo anterior (Julio, 2023), el enfoque principal fue la medición de los niveles piezométricos, por lo que no se llevaron a cabo análisis de los siguientes parámetros químicos.

- Calcio (Ca^{2+}).

La distribución de las mayores concentraciones del ion Ca^{2+} se presentó en la zona noroeste del acuífero de Zamora, donde se encuentran los municipios de Churintzio, Ecuandureo, Zamora, Tlazazalca, Purépero y una pequeña parte de Chilchota. Mientras que las concentraciones más bajas en la zona sureste del acuífero de Cotija, principalmente en el municipio de Los Reyes.

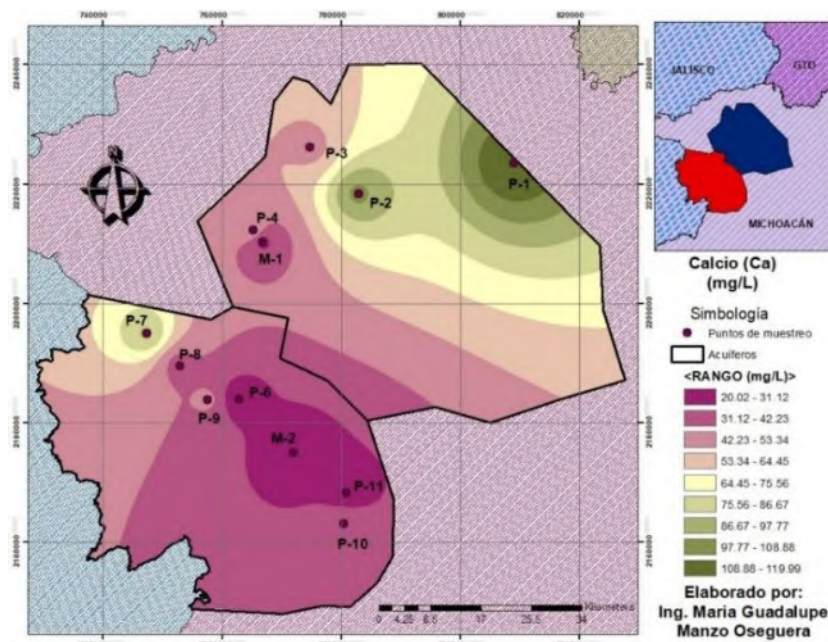


Figura 91. Mapa de distribución espacial de Ca^{2+} en la zona de estudio (Julio, 2024).

■ Magnesio (Mg^{2+}).

La distribución del ion Mg^{2+} (Magnesio) se observa en la siguiente figura, en donde las concentraciones se distribuyen de Este-Oeste en la zona de estudio, ocupando las mayores en el noreste del acuífero de Zamora específicamente en el municipio de Churintzio y Tlazazalca, mientras que las concentraciones menores en casi la totalidad del acuífero de Cotija.

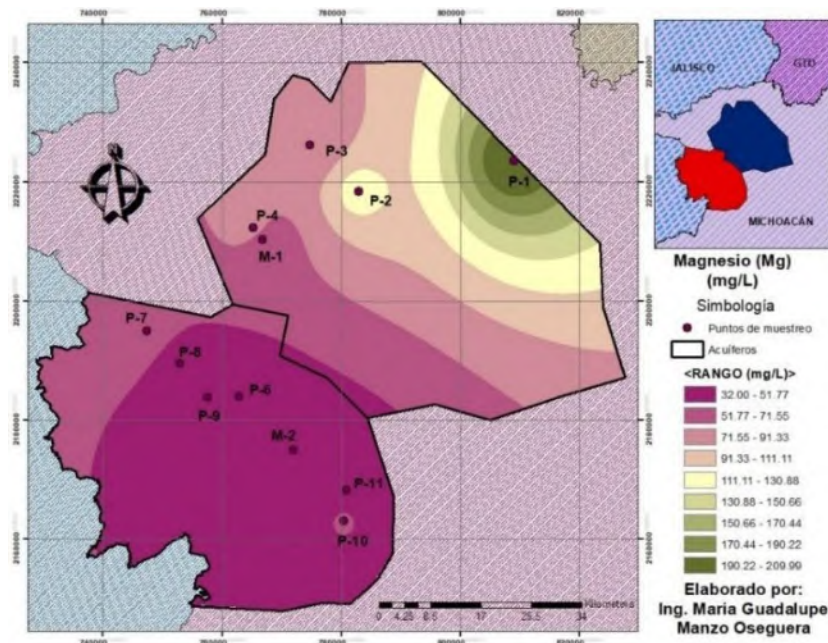


Figura 92. Mapa de distribución espacial de Mg^{2+} en la zona de estudio (Julio, 2024).

- Sodio (Na^+).

El mapa que se encuentra a continuación, representa la distribución espacial de Na^+ , en estas imágenes se aprecia que en el norte y noreste del acuífero de Cotija se encuentran las mayores concentraciones de Sodio, mientras que las menores se encuentran en el acuífero de Cotija, en el municipio de Los Reyes específicamente.

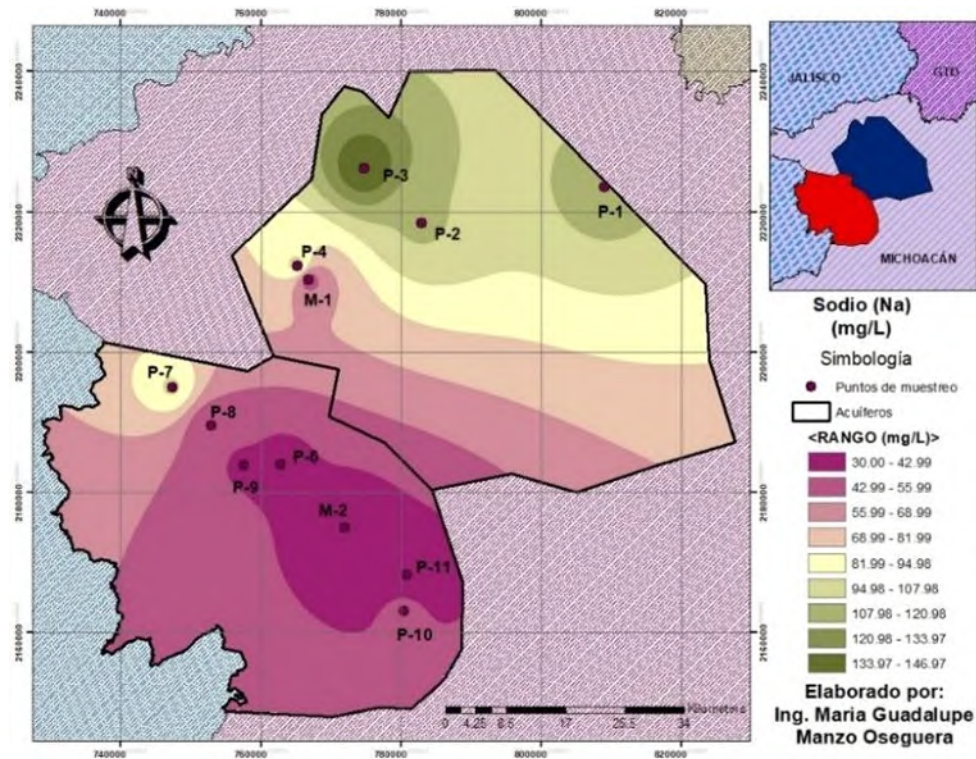


Figura 93. Mapa de distribución espacial de Na^+ en la zona de estudio (Julio, 2024).

5.14.3 Iones minoritarios.

- Bicarbonatos (HCO_3^-)

La siguiente figura, se aprecia en la imagen siguiente, la cual muestra que la mayor concentración se ubica en la parte noreste del acuífero de Zamora, principalmente en los municipios de Churintzio, Tlazazalca y Zamora, mientras que las concentraciones menores se localizan en los municipios de los reyes, Peribán y una pequeña porción de Uruapan y Tancítaro, pertenecientes al acuífero de Cotija.

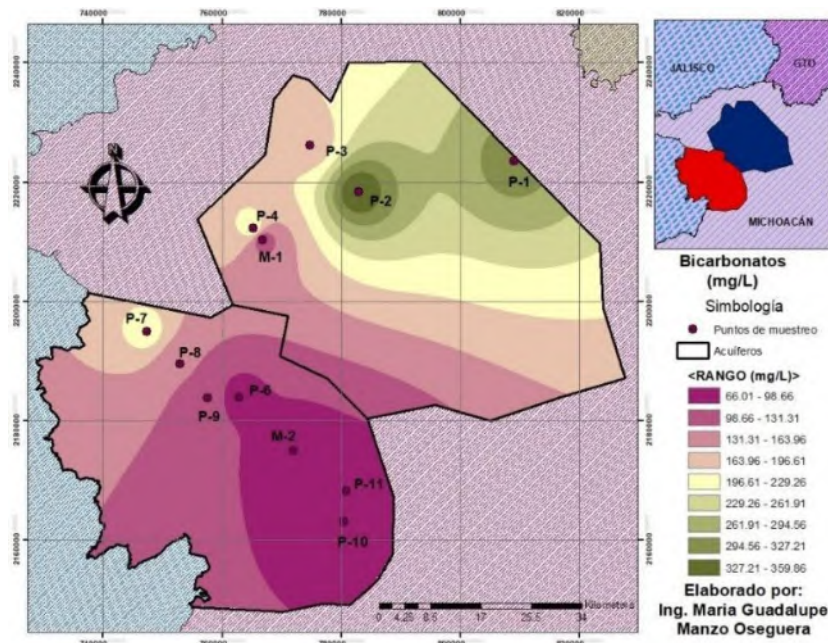


Figura 94. Mapa de distribución espacial de HCO_3^- en la zona de estudio (Julio, 2024).

■ Sulfatos (SO_4^{2-}).

El mapa siguiente muestra la distribución espacial de sulfatos en la zona de estudio, donde las concentraciones mayores se encuentran en el municipio de Churintzio, perteneciente al acuífero de Zamora, y las menores en el acuífero de Cotija, teniendo un comportamiento similar a los elementos mencionados anteriormente.

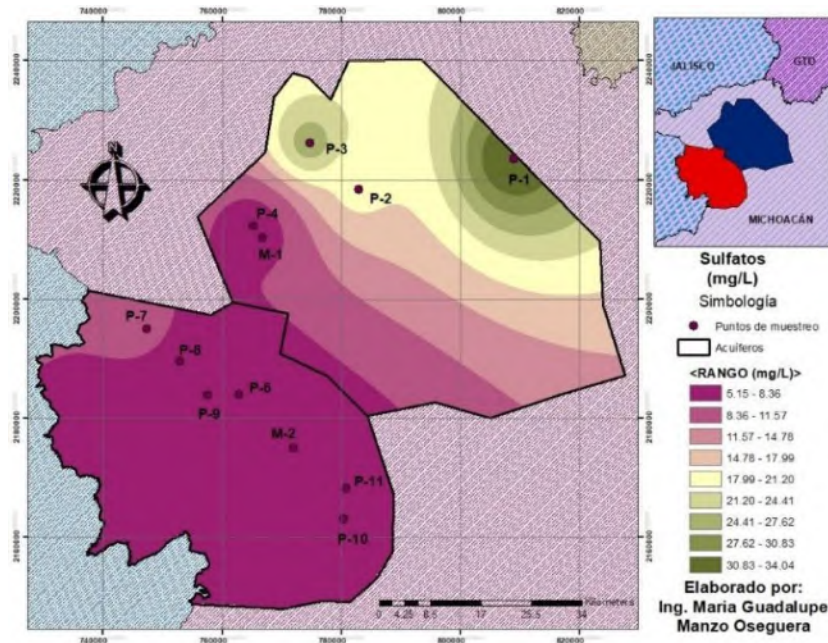


Figura 95. Mapa de distribución espacial de SO_4^{2-} en la zona de estudio (Julio, 2024).

- Cloruros (Cl^-).

La distribución espacial de este anión se visualiza en la figura siguiente, donde las concentraciones mayores se localizaron en 3 municipios del acuífero de Zamora (Churintzio, Tlazazalca, y parte de Zamora) y 3 municipios del acuífero de Cotija (Peribán, Uruapan y Tancítaro). Y las concentraciones menores en todo el centro de la zona de estudio principalmente en los municipios de Tocumbo, Tingüindín y Los reyes.

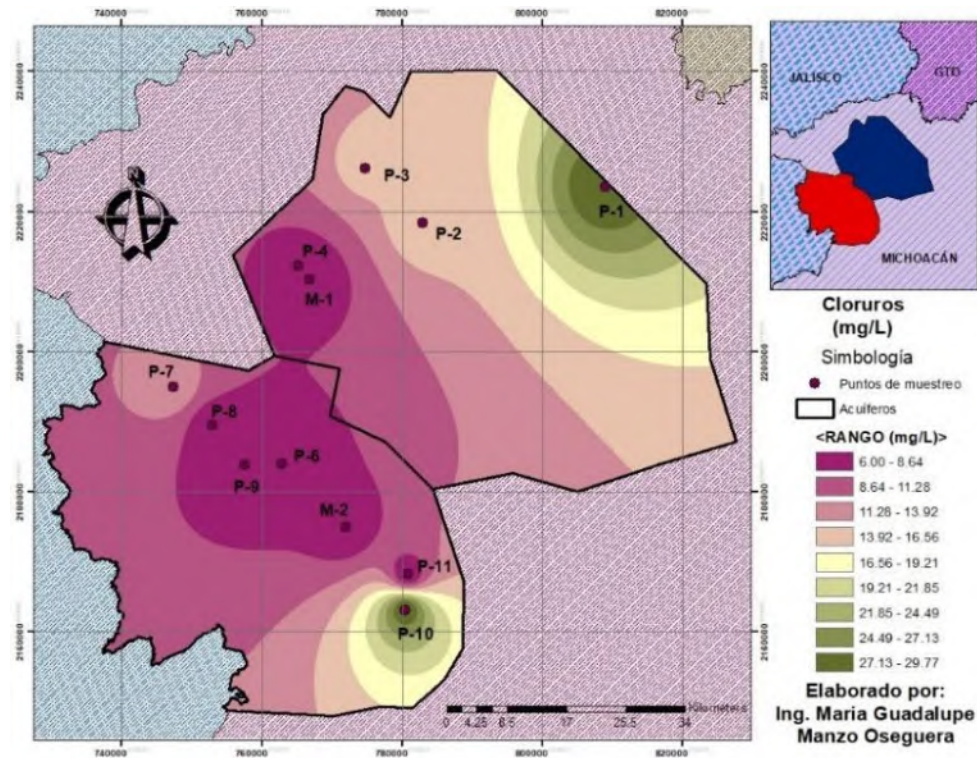


Figura 96. Mapa de distribución espacial de Cl^- en la zona de estudio (Julio, 2024).

- Nitratos (NO_3^-).

La representación de nitratos se observa en la figura siguiente, donde solo en 1 pozo se registró una concentración alta de nitratos, ubicado en el municipio de Churintzio y en toda la zona de estudio se mantuvieron concentraciones por debajo del límite permisible y en estabilidad.

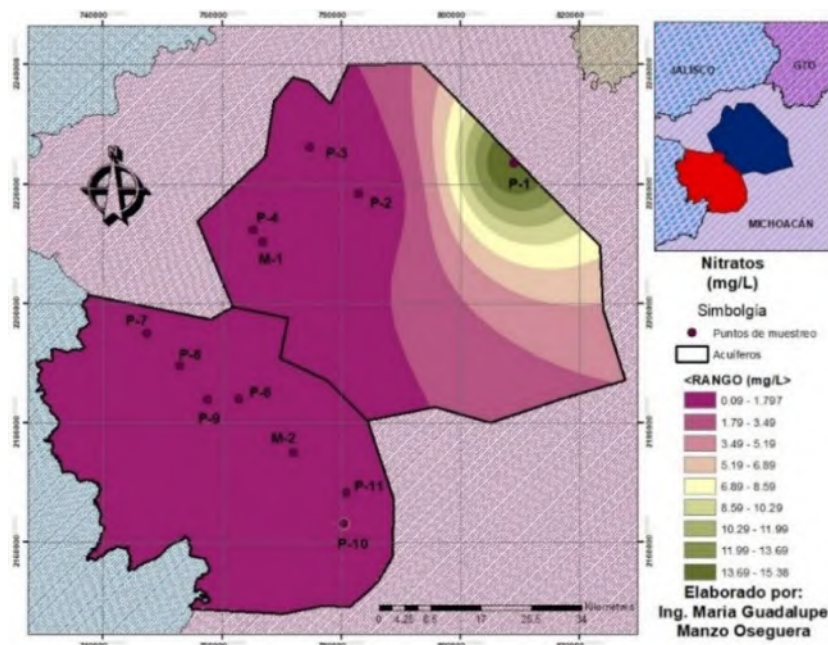


Figura 97. Mapa de distribución espacial de nitratos en la zona de estudio (Julio, 2024).

Fluoruros (F-).

En la zona de estudio, la presencia de fluoruros en las aguas subterráneas es generalmente baja. Sin embargo, en un único pozo de muestreo se detectó la presencia de fluoruros, aunque en una concentración inferior al límite permisible establecido por la normativa vigente, el pozo se ubica en el municipio de Zamora.

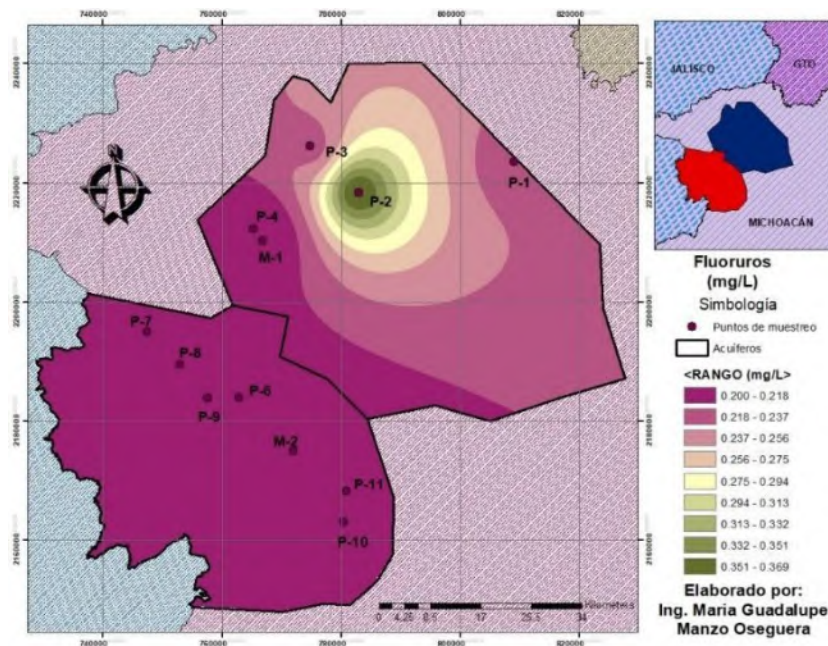


Figura 98. Mapa de distribución espacial de F- en la zona de estudio (Julio, 2024).

5.14.4 Arsénico (As).

El mapa siguiente muestra la distribución espacial del As en toda la zona de estudio, pero únicamente se muestra concentración en el norte del acuífero de Zamora, destacando principalmente el municipio de Ixtlán de los Hervores.

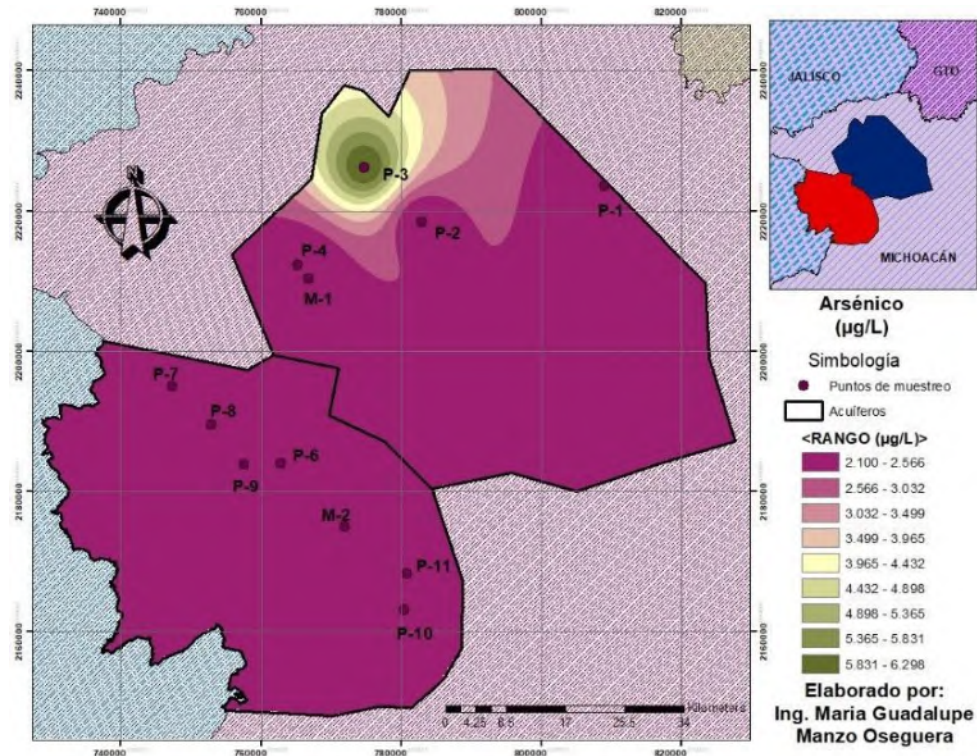


Figura 99. Mapa de distribución espacial de As en la zona de estudio (Julio, 2024).

5.15 Análisis hidrogeoquímico.

Para dar inicio a este apartado, se presenta a continuación la tabla que contiene la simbología utilizada para identificar los pozos de extracción que fueron muestreados durante el año 2024.

Tabla 36. Simbología de muestreos.

POZO	CLAVE	LUGAR
Pozo 1	P-1	Changuitiro, Ecuandureo.
Pozo 2	P-2	La rinconada, Zamora.
Pozo 3	P-3	La estanzuela, Ixtlán de los Hervores.
Pozo 4	P-4	El gasolín, Chavinda.
MAN 1	M-1	Manantial, el Telonzo, Tangmandapio.
Pozo 6	P-6	OOSAPA, Tingüindín.
Pozo 7	P-7	El paso, Cotija.
Pozo 8	P-8	La magdalena, Tocumbo.
Pozo 9	P-9	Tacatzcuaro, Tingüindín.
Pozo 10	P-10	Santa Ana, Nuevo Zirosto.
Pozo 11	P-11	San José de Gracia, Los Reyes.
MAN 2	M-2	Manantial Atapan, Los Reyes.

5.15.1 Diagrama de Piper.

Este diagrama fue creado utilizando el software Grapher. La figura 100 muestra los tipos de agua correspondientes a los 12 puntos de muestreo durante la campaña realizada en julio de 2024.

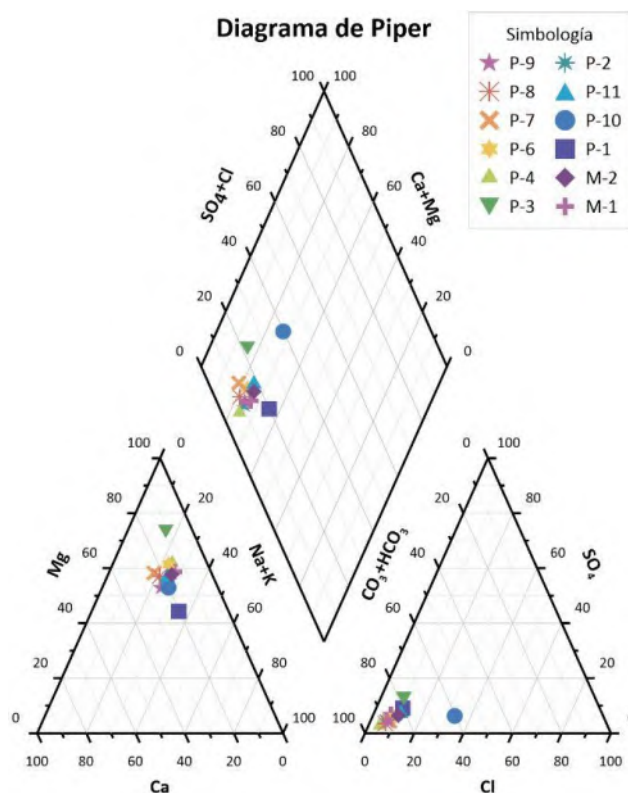


Figura 100. Diagrama de Piper de la zona de estudio (colecta Julio, 2024).

El tipo de agua encontrada en la zona de estudio fue la bicarbonatada cálcica y/o magnésica (familia magnesiana – bicarbonatada, cálcica – bicarbonatada), estas aguas son aguas típicas de zonas de recarga, e indica que son aguas jóvenes y con poca interacción con el medio geológico, o sea que tienen un corto tiempo de permanencia en el acuífero, esto es debido a que se está extrayendo continuamente para el uso humano, en los acuíferos existen 3 zonas de profundidad en este caso particular, el agua extraída permanece a la zona superior, por esa razón el agua está poco en el acuífero.

Las aguas con características bicarbonatadas indican que han circulado a través de formaciones geológicas compuestas principalmente por rocas carbonatadas, como la caliza o la dolomía, o que han estado en contacto con minerales ricos en carbonatos. Debido a la alta solubilidad de estos minerales en presencia de agua subterránea con un alto contenido de CO_2 , los bicarbonatos se convierten en los iones predominantes, lo que define este tipo de composición química en el agua.

De acuerdo con el triángulo de cationes, se observa que la totalidad de las muestras de agua analizadas presentan una tendencia a agruparse en la región correspondiente a

aguas con predominancia de magnesio, sodio y potasio, pero más inclinadas al magnesio, lo cual indica un comportamiento hidroquímico consistente entre las muestras en cuanto a la composición catiónica. Por otra parte, el triángulo de aniones está el predominio de bicarbonato, este predominio es típico del agua de lluvia, donde el proceso químico predominante ha sido la absorción de dióxido de carbono, y mientras el aumento de sales no sea significativo, el bicarbonato seguirá siendo el ion predominante.

5.15.2 Diagrama de Stiff.

Los diagramas de Stiff, se presentan a continuación en las próximas 13 figuras, fueron elaboradas con ayuda del software Grapher, en estos diagramas, visualizamos y comparamos la composición iónica del agua de las diferentes muestras recolectadas en Julio 2024, en la figura general todos los diagramas muestra una forma de “T” invertida, a excepción del P-1, que presenta más una forma de punta de flecha donde apunta la predominancia del magnesio, lo anterior, indica que la mayoría de los puntos de muestreo muestran una tendencia y comportamiento consistentes, característicos de un agua de tipo natural, como es el caso del agua subterránea en este estudio.

Además, tiene una coincidencia con el diagrama de Piper explicado anteriormente, ya que todos los sitios presentan una mayor concentración de bicarbonatos por parte de los aniones.

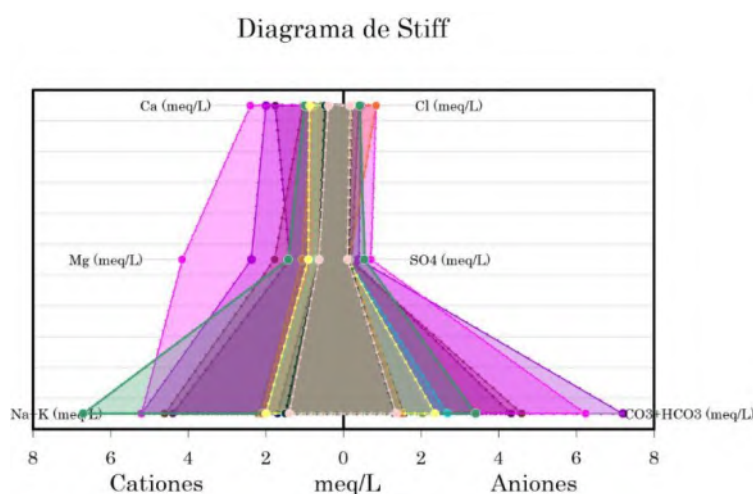


Figura 101. Recopilación de diagramas de Stiff de la zona de estudio (Colecta, Julio 2024).

Las siguientes imágenes representan los diagramas de Stiff correspondientes a cada uno de los pozos muestreados durante la campaña de colecta realizada en julio de 2024.

Diagrama de Stiff
P-1

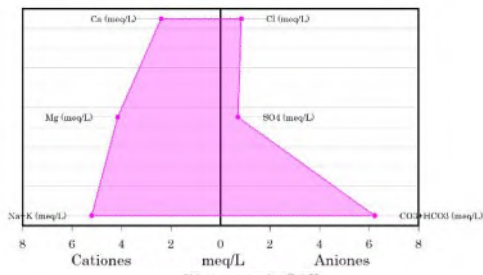


Diagrama de Stiff
P-2

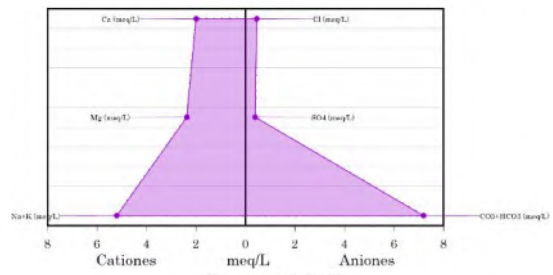


Diagrama de Stiff
P-3

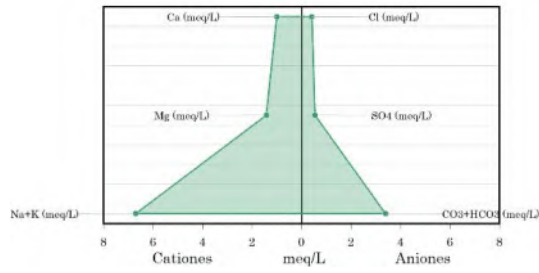


Diagrama de Stiff
P-4

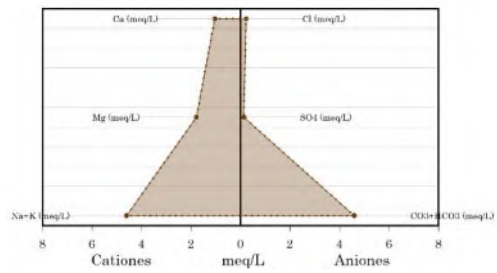


Diagrama de Stiff
M-1

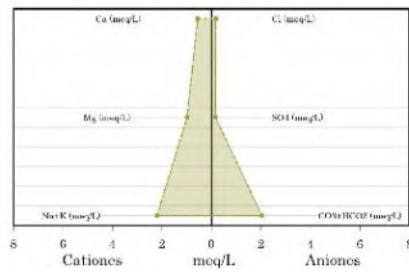


Diagrama de Stiff
P-6

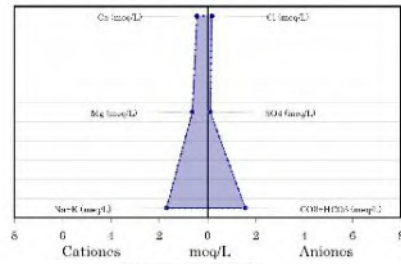


Diagrama de Stiff
P-7

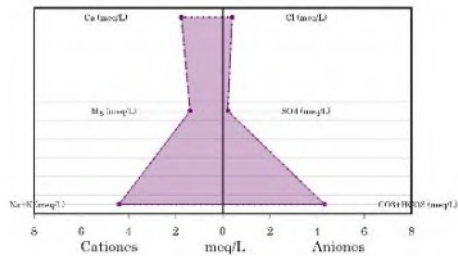


Diagrama de Stiff
P-8

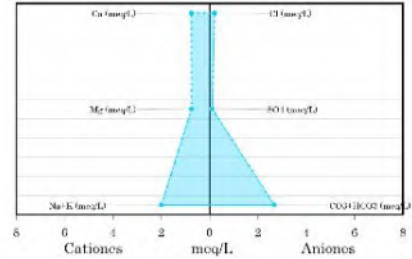


Diagrama de Stiff
P-9

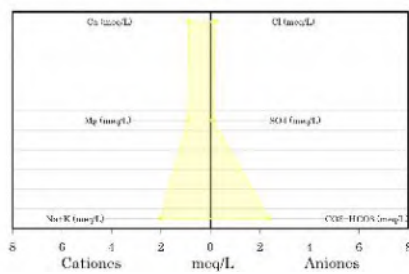
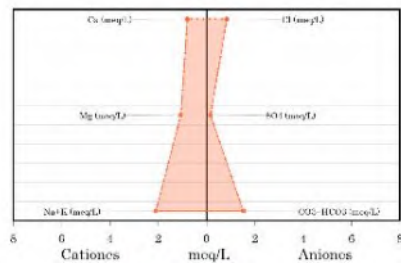
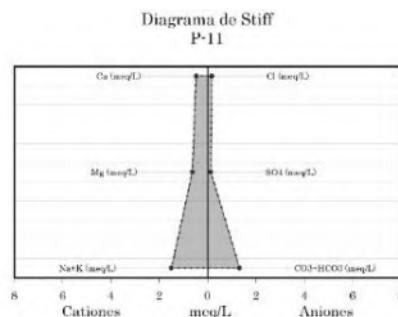
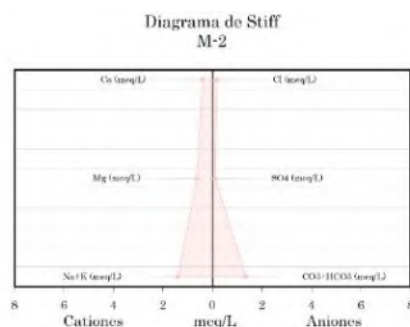


Diagrama de Stiff
P-10





5.15.3 Diagrama de Durov.

La siguiente figura (Figura 102), muestra el diagrama de Durov, el cual establece la correlación que existe entre diversos parámetros y las características hidro químicas del agua subterránea, la mayoría de las muestras se encuentra entre 50 y 250 mg/L de SDT, a excepción del M-2 y P-1, y como anión principal está el HCO_3^- , con excepción del P-10 y las concentraciones de aniones son cercanas entre sí para el agua salobre. El contenido de TDS en el agua freática varía espacialmente y esto está relacionado con las condiciones de evaporación y estrechamente con la calidad de agua de recarga en la zona de estudio.

De acuerdo al diagrama de Durov, el agua subterránea en el área de estudio es principalmente de los tipos $\text{HCO}_3\text{-CaMg}$ (Bicarbonatada cálcico-magnésica) es el agua rica en carbonatos y con predominancia de Calcio y Magnesio, es agua de infiltración reciente y de buena calidad, hubo un excepción en el P-10, donde el agua está más inclinada a aguas sulfatadas sódicas, donde hay un contenido más alto de sulfatos lo que quiere decir que ese sitio está relacionado con procesos de evaporación y muchas veces se asocia también a contaminación industrial o agrícola, en este caso el P-10, está ubicado en Santa Ana Zirosto y pertenece a un predio privado donde el uso es de “uso agrícola” en un huerto de aguacate.

Diagrama de Durov

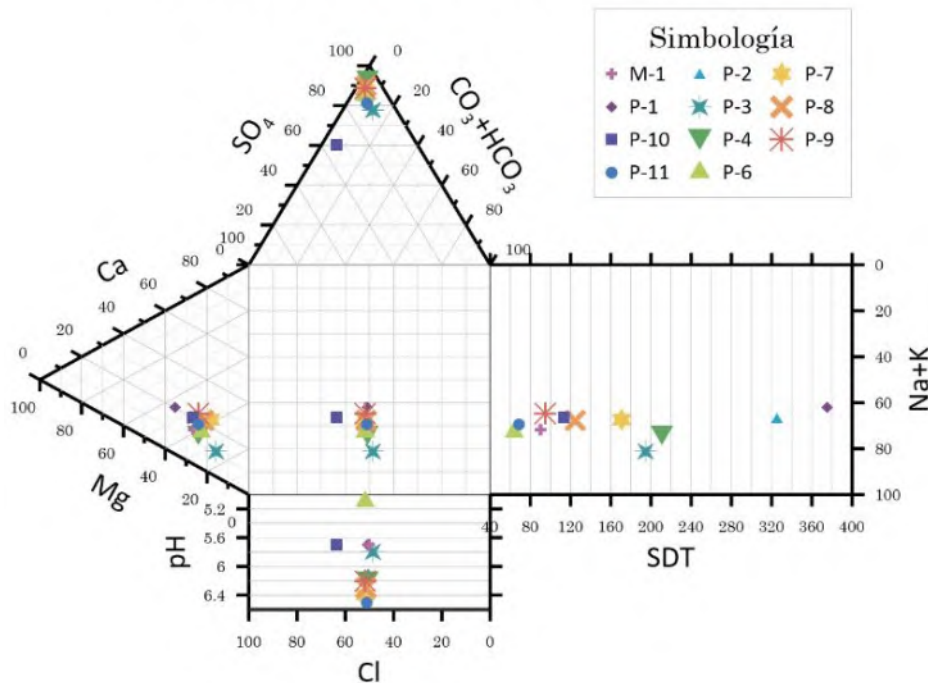
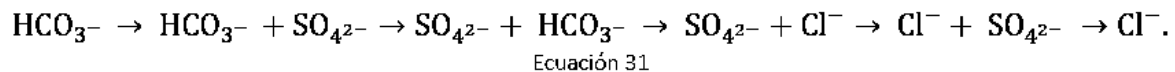


Figura 102. Diagrama de Durov para la zona de estudio (Colecta, Julio 2024).

Como ya mencionamos anteriormente Chevorateb encontró que los aniones principales en un sistema regional de aguas subterráneas siguen la secuencia:



La cual indica que la evolución del agua inicia desde una composición bicarbonatada (agua joven y poco mineralizada) hasta una clorurada (agua más antigua y mineralizada). Este proceso puede estar influenciado por la disolución de minerales, la mezcla con otras aguas también por la dinámica del flujo subterráneo.

5.15.4 Diagrama de Schoeller.

Este gráfico permite comparar la composición química de diferentes aguas subterráneas, mostrando en un eje logarítmico las concentraciones de los principales cationes y aniones en meq/L, el gráfico plasma el comportamiento de los mismos 10 pozos y 2 manantiales de esta investigación. Este diagrama es una herramienta sencilla y visual que permite identificar rápidamente las características químicas del agua en un área de estudio, comparando las concentraciones de los principales iones presentes, al estar este diagrama en escala logarítmica quiere decir que un pequeño cambio en la altura representa una gran variación en la concentración.

En el diagrama se muestra el predominio de HCO_3^- , Mg^{2+} y Na^+ , el Ca^{2+} se muestra en concentraciones más bajas que lo anterior mencionado, por lo que se habla que pertenece y predominan más las aguas bicarbonatadas magnésicas. El Na^{2+} y Mg^{2+} en niveles más elevados es el característico de aguas jóvenes en zonas de recarga. Sin embargo, la tendencia en aguas bicarbonatadas sódicas puede estar más acercadas a la relación de procesos de intercambio iónico, en acuíferos con arcillas. En la campaña se observa que la mayoría de los sitios tienen tendencia de los meq/L por lo que los sitios se comportan de manera similar destacando los iones ya mencionados. Sin embargo, el P-10 es el único que se muestra diferente en esta tendencia.

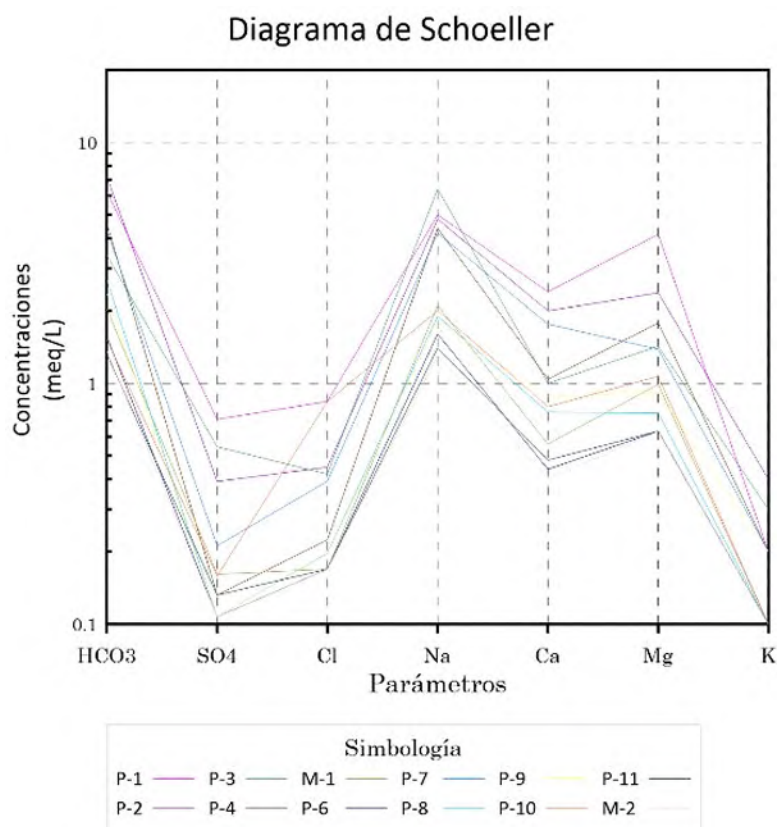


Figura 103. Diagrama de Schoeller de la zona de estudio (Colecta Julio, 2024).

5.15.5 Diagrama de Gibbs

Este diagrama en hidro geoquímica se utiliza para determinar los principales procesos que controlan la composición química del agua subterránea, donde se determina si el agua está influenciada por la precipitación [10 – 100], la interacción con las rocas [100 – 1000] o la evaporación [1000 – 10000].

La mayoría de las muestras de agua subterránea analizadas en este estudio se ubican dentro del ámbito de la interacción agua-roca, lo que sugiere que la meteorización y la disolución de los minerales presentes en las rocas constituyen el principal proceso

responsable de la liberación de iones en el agua, estableciendo así un equilibrio parcial con los materiales del acuífero, fueron mínimas las muestras que se localizaron en el dominio de precipitación, lo que quiere decir que en estas zonas el agua proviene principalmente de la precipitación (recarga) el agua tiene baja salinidad.

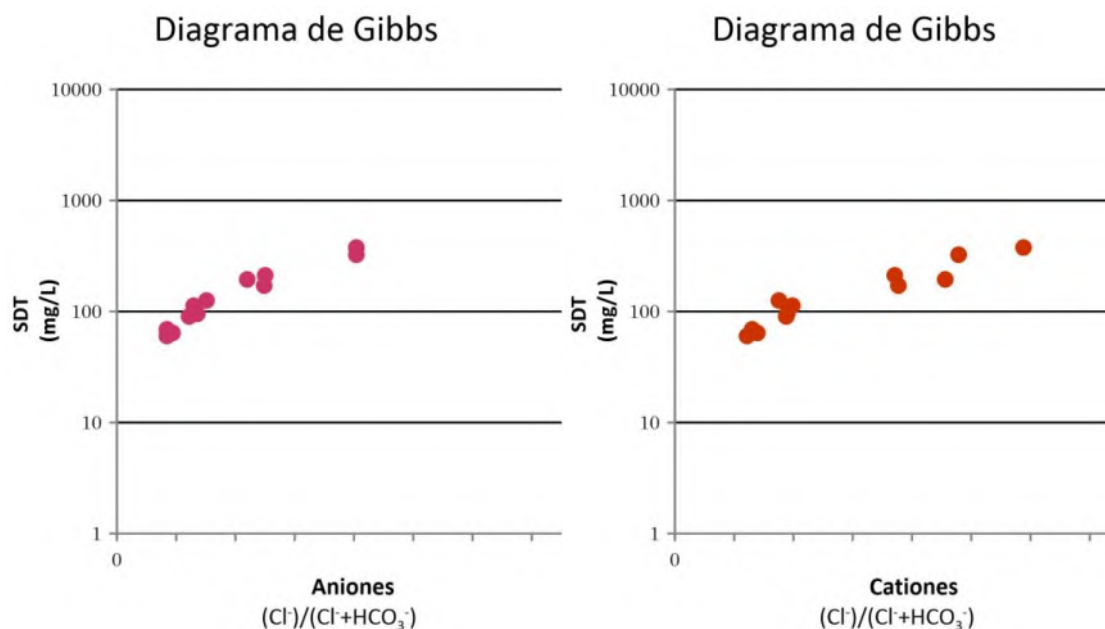


Figura 104. Diagrama de Gibbs para Aniones y Cationes.

5.16 Relaciones Hidrogeoquímicas.

Las relaciones hidrogeoquímicas son proporciones entre concentraciones de iones disueltos en el agua, utilizadas para interpretar la evolución química del agua subterránea y comprender los procesos que controlan su composición. Son cálculos simples que comparan entre sí los iones mayoritarios presentes en el agua, ya sea en meq/L o en mg/L, en el estudio se usan meq/L.

Estas relaciones son útiles para identificar procesos geoquímicos, clasificar el tipo de agua, y detectar posibles fuentes de contaminación.

5.16.1 Relación rNa^+/rCl^- .

La gráfica presentada (Figura 105) muestra que en todos los sitios analizados la relación rNa^+/rCl^- es mayor a 1, lo que se interpreta es que existe un exceso de sodio, este puede originarse del producto de estos dos procesos principales, el primero es la meteorización de silicatos es cuando algunos de minerales que están presentes en las rocas liberan sodio cuando se descomponen debido a la acción del agua y el CO_2 y el segundo proceso es el intercambio iónico, este se lleva a cabo cuando, el sodio se reemplaza con calcio y magnesio en arcillas.

Asimismo, la disolución de silicatos, que probablemente aporta sodio, está directamente vinculada con la concentración del ion HCO_3^- , tal como se mencionó previamente en el diagrama de Piper.

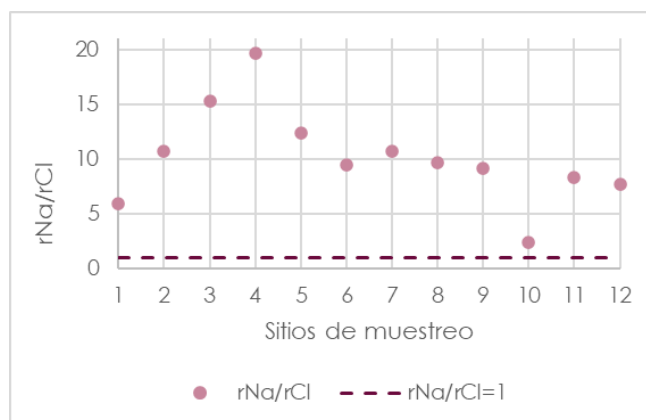


Figura 105. Representación gráfica de la relación $r\text{Na}^+/\text{rCl}^-$ en los sitios de muestreo.

5.16.2 Relación $r\text{Na}^+/\text{rK}^+$.

Esta relación representa la proporción entre sodio (Na^+) y potasio (K^+) y se presenta en la siguiente figura gráficamente, en la cual todos los sitios se muestran por encima de 1, y eso es típico en agua subterránea, esta relación comprende el comportamiento geoquímico entre el sodio (más móvil) y el potasio (más retenido), también las posibles fuentes antrópicas (como fertilizantes ricos en K). Los valores de esta relación están entre 9.03 y 25.07 meq/L, indican que en las muestras existe el dominio de sodio ya que está en concentraciones mayores que el potasio, esta tendencia es común en acuíferos donde predominan procesos naturales de meteorización de minerales sódicos, así como en ambientes donde el potasio tiende a retenerse en arcillas, limitando su concentración en solución. En conjunto, los resultados son coherentes con un sistema hidrogeoquímico controlado por condiciones geológicas naturales, posiblemente en contextos volcánicos o con presencia de materiales arcillosos.

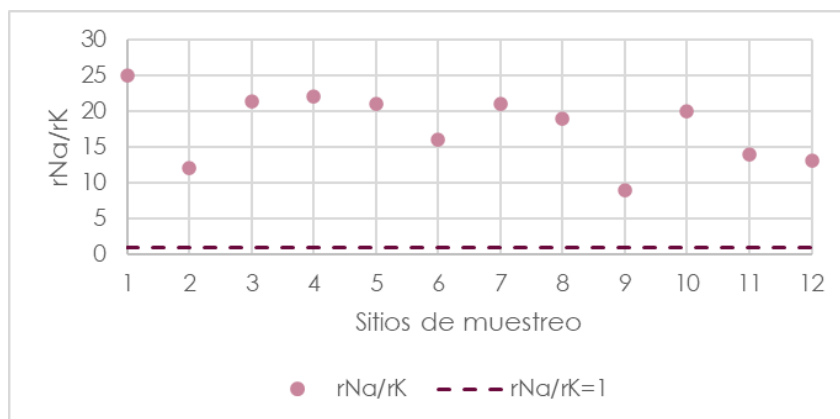


Figura 106. Representación gráfica de la relación $r\text{Na}^+/\text{rK}^+$ en los sitios de estudio.

5.16.3 Relación rMg^{2+}/rCl^- .

Esta relación compara las concentraciones de magnesio y cloruros en el agua, se utiliza para evaluar el origen del magnesio en el agua subterránea, su interacción con los minerales del acuífero y contaminación antrópica por cloruros y se encuentra representado en la siguiente figura. El cloruro es un ion conservativo (no se precipita ni reacciona fácilmente) mientras que el magnesio puede precipitarse fácilmente. En el gráfico se observa que todas las muestras en esta relación se mantuvieron por encima de 1, lo que resalta el efecto de interacción agua-roca, la mayoría de las muestras presentan una mayor proporción de magnesio respecto a los cloruros, sugiere que la composición catiónica está dominada por fuentes naturales de magnesio. La única muestra con una relación baja se observa en el sitio 10, con un valor de 1.27 meq/L y este corresponde al pozo agrícola de Santa Ana Zirosto, este sitio podría estar influenciada por una fuente puntual de cloruros, asociado a las actividades agrícolas. En general los datos reflejan un sistema poco afectado por salinización o contaminación clorurada, manteniendo un control geoquímico natural.

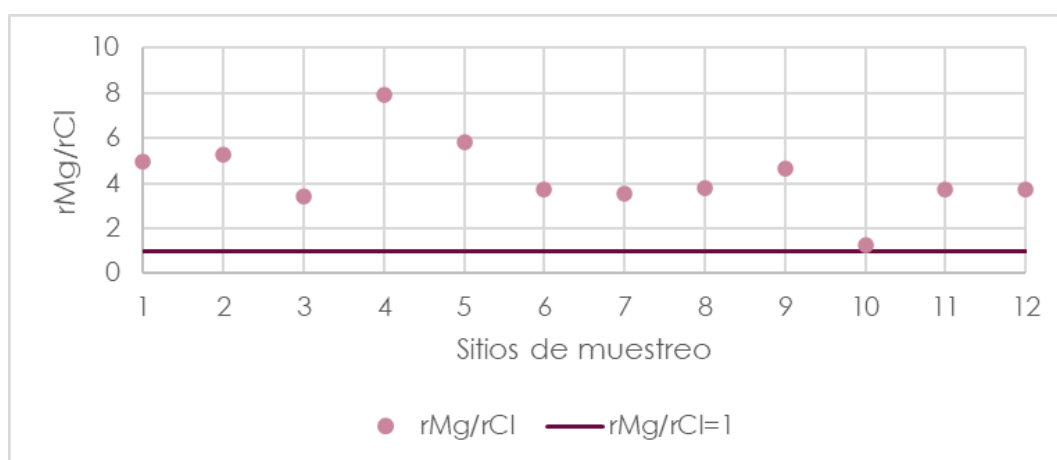


Figura 107. Representación gráfica de la relación rMg^{2+}/rCl^- en los sitios de estudio.

5.16.4 Relación rCa^{2+}/rMg^{2+} .

Esta relación se utiliza para determinar el origen de los cationes divalentes en el agua, y evaluar la influencia de rocas carbonatadas como la calcita, que generalmente tiende a elevar la relación y la dolomita tiende a mantenerla cercana a 1. La mayoría de las muestras tienen valores inferiores a 1, lo que indica que el magnesio predomina ligeramente sobre el calcio, o que ambos están en proporciones similares, y esto sugiere un posible origen dolomítico del agua, y escasa influencia de calcita pura. Una muestra presenta una relación significativamente mayor, con un valor de 1.27 meq/L, perteneciente al sitio 7, pozo ubicado en el Paso, Cotija donde existe una dilución de Mg en el agua por procesos de mezcla o adsorción.

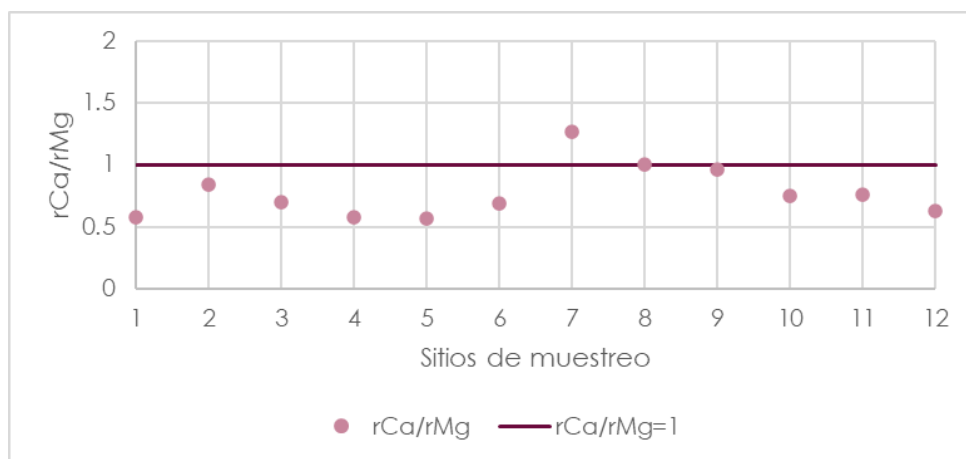


Figura 108. Representación gráfica de la relación rCa^+/rMg^{2+} .

5.16.5 Relación rCa^{2+}/rSO_4^{2-} .

Esta relación permite evaluar la proporción relativa entre calcio y el sulfato en el agua subterránea. Esta relación es útil para identificar la fuente de calcio y sulfato, evaluar procesos de disolución mineral o detectar fuentes externas de calcio o sulfato sobre todo si la relación se aleja significativamente de 1. Esta relación indica que en las 12 muestras de agua subterránea varía entre 1.83 y 8.32, con un promedio de 5.00, estos resultados indican que el calcio presente en el agua no se encuentra en equilibrio con el sulfato, y que la disolución de minerales carbonatados es la principal fuente de calcio. Las concentraciones relativamente bajas de sulfato en relación con el calcio pueden reflejar una disponibilidad limitada de minerales sulfatados en el medio geológico o una posible atenuación de sulfatos por procesos de reducción. La relación más baja se sitúa en el pozo número 3 (P-3), ubicado en Ixtlán de los Hervores con una relación de 1.83 meq/L, aunque es una relación que sigue siendo mayor a 1, es una muestra que se aproxima a una disolución tipo yeso, sugiriendo una posible mezcla de fuentes (yeso + calcita).

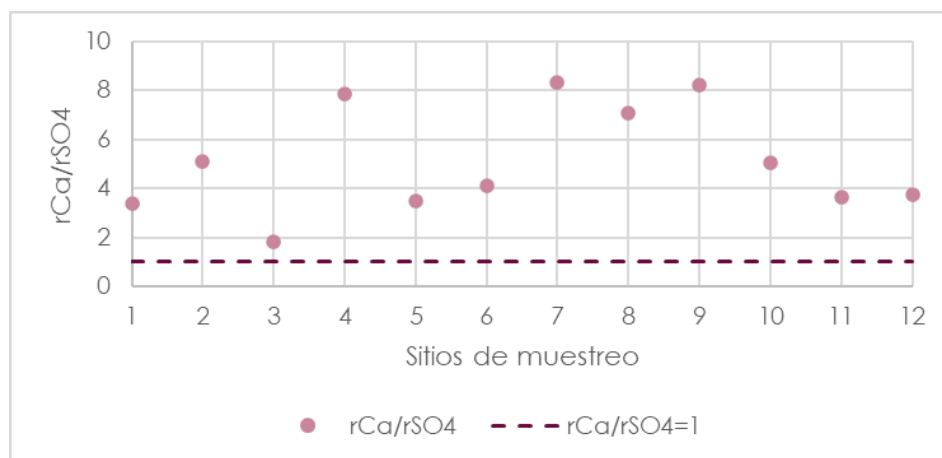


Figura 109. Representación gráfica de la relación rCa^{2+}/rSO_4^{2-} en los sitios de estudio.

5.16.6 Relación $\text{rHCO}_3^-/\text{rCl}^-$.

Esta relación se emplea comúnmente para evaluar el grado de mineralización y la naturaleza del agua subterránea, para determinar si el agua tiene un origen meteórico reciente o si está afectada por procesos de contaminación o salinización y para distinguir entre aguas dulces de tipo bicarbonatado (altas razones) y aguas salinas o contaminadas por cloruros (bajas razones).

Las 12 muestras de agua subterránea muestran un predominio de valores altos, con un promedio de 10.69, lo cual indica que la mayoría de las aguas presentan una composición bicarbonatada típica de origen meteórico, sin indicios significativos de salinización ni contaminación por cloruros. Esto sugiere que el agua tiene una evolución geoquímica temprana, asociada a la disolución de carbonatos y a una recarga reciente, con una mínima influencia de fuentes antrópicas o salinas. La única muestra con un valor notablemente bajo de 1.81 meq/L que podría estar influenciada por un aporte externo de cloruros y sería recomendable investigarla con mayor detalle, este sitio se ubica en Santa Ana Zirosto.

En conjunto, los resultados obtenidos en esta relación son consistentes con un acuífero de baja mineralización, controlado principalmente por condiciones naturales y esto indica que todas las aguas analizadas son frías, con un recorrido corto y rápido, ya que permanecen poco tiempo en el acuífero, lo que las relaciona con aguas subterráneas jóvenes y con escasa evolución.

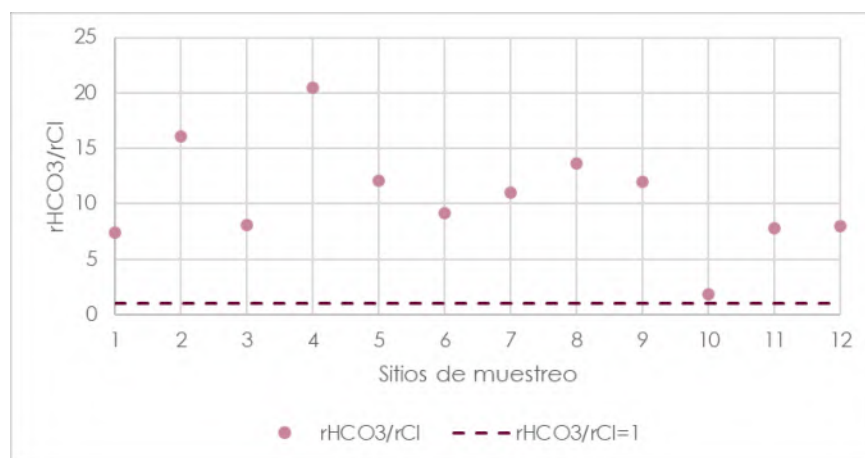


Figura 110. Representación gráfica de la relación $\text{rHCO}_3^-/\text{rCl}^-$ en los sitios de estudio.

5.17 Diagrama hidro químico binario.

El diagrama hidroquímico binario $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. HCO_3^- es una herramienta gráfica sencilla utilizada en hidrogeoquímica para visualizar relaciones entre cationes y aniones predominantes en muestras de agua subterránea. El análisis de este diagrama muestra que la mayoría de las aguas subterráneas presentan una relación química equilibrada ya

que la mayoría de los puntos están relativamente cerca de la línea $y = x$, lo que indica que su composición está dominada por procesos naturales de disolución de minerales carbonatados. Esto sugiere un origen meteórico reciente con una evolución hidrogeoquímica moderada a avanzada, influenciada por la interacción con rocas, solo existe una muestra (4.37 vs 7.19) sugiere exceso de bicarbonato, lo que puede deberse a un menor aporte de minerales cálcicos.

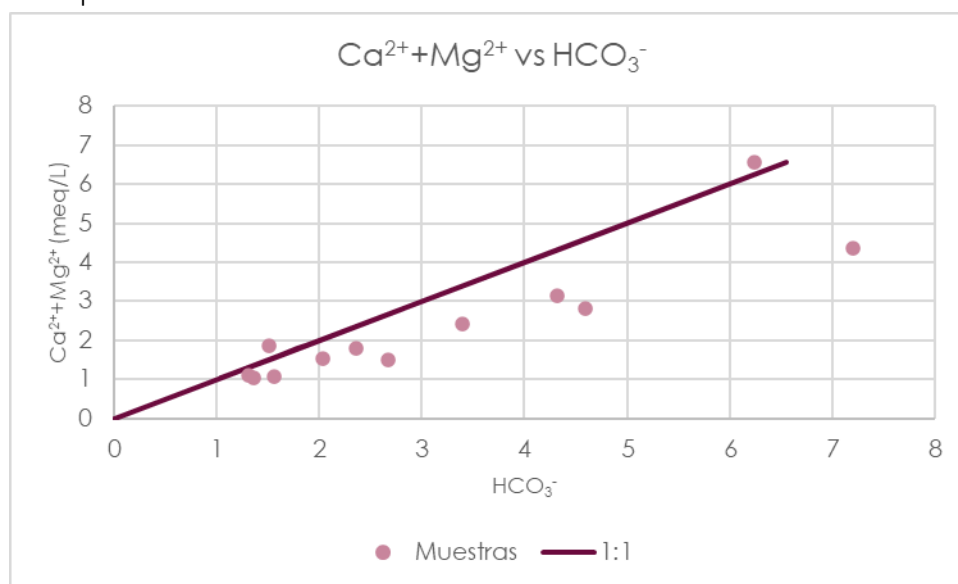


Figura 111. Diagrama hidroquímico binario $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- .

5.18 Intercambio iónico.

En 1977, Schoeller creó un índice para evaluar los procesos de intercambio iónico que tienen lugar entre el agua subterránea y su entorno mientras se encuentra o se mueve dentro del acuífero. Un valor positivo de CAI-1 señala un intercambio de Na^+ y K^+ del agua con Mg^{2+} y Ca^{2+} de las rocas, mientras que un valor negativo indica un intercambio inverso, es decir, de Mg^{2+} y Ca^{2+} del agua con Na^+ y K^+ de las rocas (Toscano Reyes et al., n.d.).

El análisis de los valores del Índice Cloro-Alcalino tipo 1 (CAI-1) muestra que todas las muestras presentan valores negativos, por lo que se cumple $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Cl}^-$, lo que sugiere que el sodio y potasio exceden al cloruro en todas las muestras analizadas. Este patrón es característico de acuíferos en los que predomina un proceso de intercambio iónico directo, en el cual Na^+ y K^+ son liberados desde las arcillas o minerales al agua, reemplazando a Ca^{2+} y Mg^{2+} . También puede reflejar la disolución de minerales silicatados ricos en alcalinos. La ausencia de un exceso de cloruro sugiere que estas aguas no están influenciadas significativamente por salinización ni contaminación antrópica.

Los valores negativos del CAI-1 apoyan la interpretación de que estas aguas subterráneas tienen un origen natural y meteórico, con evidencia clara de interacción geoquímica con el medio rocoso, especialmente con materiales ricos en sodio y potasio.

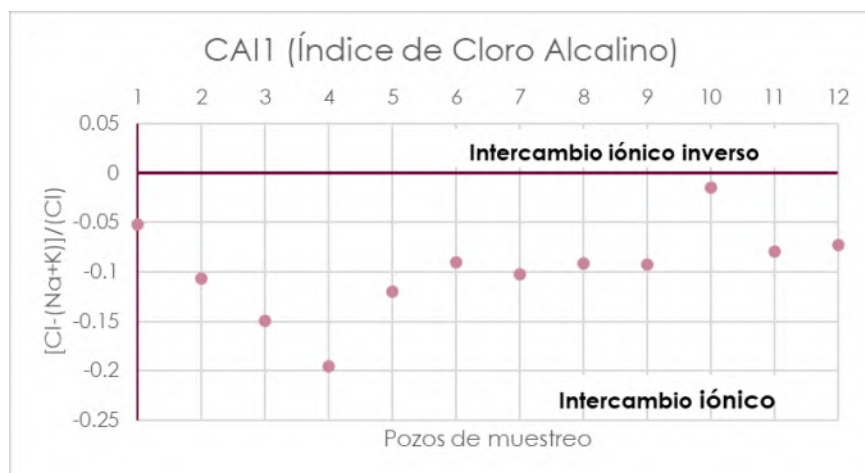


Figura 112. Índice de Cloro Alcalino (CAI-1).

El Índice Cloro-Alcalino tipo 2 (CAI-2) es un parámetro propuesto por Schoeller (1965) para identificar procesos de intercambio iónico entre el agua subterránea y el medio geológico.

Los resultados del Índice Cloro-Alcalino tipo 2 (CAI-2) muestran valores negativos en todas las muestras, con un promedio de aproximadamente -0.76. Esto evidencia de forma consistente que el agua subterránea analizada está influenciada por un proceso de intercambio iónico directo, en el cual los cationes alcalinos (Na^+ y K^+) son liberados desde el medio sólido hacia el agua, mientras que Ca^{2+} y Mg^{2+} son adsorbidos. Este comportamiento es típico de acuíferos en contacto con rocas arcillosas o silicatadas, que permiten el intercambio de cationes como parte del proceso natural de evolución geoquímica del agua. También indica que las aguas tienen un origen meteórico reciente, con una evolución moderada a avanzada en su tránsito por el medio geológico.

En el sitio 3, se observa un valor muy negativo, con -1.44 meq/L, en este sitio se indica un proceso de intercambio iónico muy intenso, probablemente en una zona con fuerte alteración de minerales o mayor interacción roca-agua, este es el pozo ubicado en El paso, Cotija.

La ausencia de valores positivos también sugiere baja influencia de procesos de salinización externa, y una evolución química determinada principalmente por condiciones naturales.

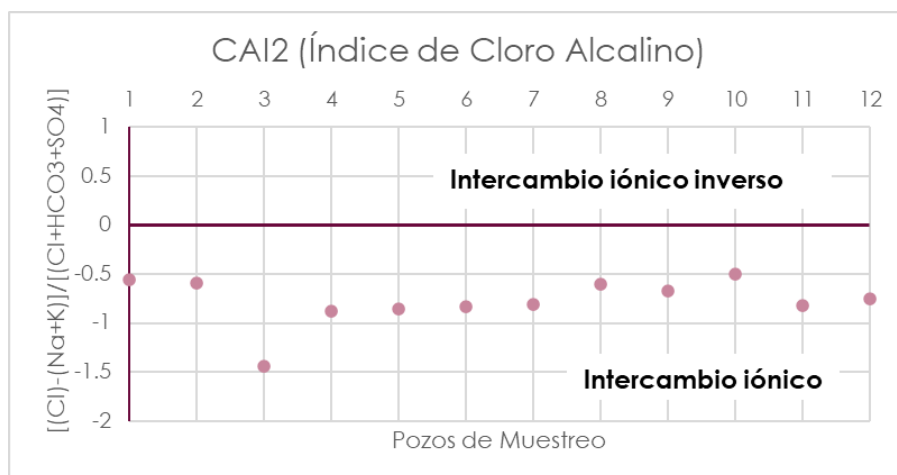


Figura 113. Índice de Cloro Alcalino 2 (CAI-2).

5.19 Índice de calidad del agua subterránea.

Los indicadores de calidad del agua son parámetros que permiten evaluar el estado de las aguas subterráneas en estudio. Son de fácil interpretación y reflejan tanto los cambios en el entorno como el impacto de las actividades humanas. Además, sirven como referencia para comparaciones a nivel nacional e internacional.

Los ICAs suelen ser desarrollados para abordar las problemáticas ambientales específicas de cada región. Sin embargo, en muchos países se opta por adoptar y aplicar metodologías externas en sus propios territorios.

El diseño apropiado de un ICA debe incluir los límites permitidos establecidos por la normativa, los criterios según el uso específico del agua y su potencial aplicación. Además, debe considerar un número limitado de parámetros, priorizando aquellos de mayor relevancia o los que el investigador determine esenciales para su estudio.

El presente estudio emplea el "Método del Promedio Aritmético Ponderado", el cual ofrece varias ventajas en comparación con otros ICA. Entre sus principales beneficios se encuentran su simplicidad y claridad, ya que su desarrollo es fácil de comprender y de aplicar. Además, también este método incorpora los límites máximos permisibles establecidos por distintas normativas, tanto nacionales (NOM-127-SSA1-1994) como internacionales (OMS, USEPA). Así mismo, proporciona un resumen general de los datos recopilados y puede ajustarse a los requerimientos específicos del estudio en cuestión.

No obstante, este método también presenta algunas limitaciones, entre las cuales se incluyen: la incapacidad de ofrecer una visión completa sobre la calidad del agua en la zona de estudio, la imposibilidad de evaluar todos los riesgos presentes en el recurso y la subjetividad en la asignación de ponderaciones a cada parámetro según su importancia, lo que depende del criterio de quien lo aplica. Debido a esto, algunos científicos

cuestionan y critican su uso como herramienta para la gestión del agua (Toscano Reyes et al., n.d.). El resultado del ICA en la Zona de estudio oscila entre el rango de 21.63 hasta 89.75 lo que se manifiesta que en toda la zona de estudio se encuentran 2 tipos de calidad de agua, que es excelente y buena calidad. La información de los resultados se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 37. Valor del ICA en la zona de estudio.

Id	POZO	LUGAR	ICA	CALIDAD DEL AGUA
1	P-1	Changuitiro, Ecuandureo.	89.754	"Buena Calidad"
2	P-2	La Rinconada, Zamora.	67.346	"Buena Calidad"
3	P-3	La Estanzuela, Ixtlán de los Hervores.	45.432	"Excelente"
4	P-4	El Gasolín, Chavinda.	47.299	"Excelente"
5	M-1	El Telonzo, Tangamandapio.	28.430	"Excelente"
6	P-6	OOSAPA, Tingüindín.	21.923	"Excelente"
7	P-7	El Paso, Cotija.	47.439	"Excelente"
8	P-8	La Magdalena, Tocuambo.	28.438	"Excelente"
9	P-9	Tacatzcuaro, Tingüindín.	31.507	"Excelente"
10	P-10	Santa Ana, Zirosto.	31.345	"Excelente"
11	P-11	San José de Gracia, Los Reyes.	23.632	"Excelente"
12	M-2	Atapan, Los Reyes.	21.630	"Excelente"

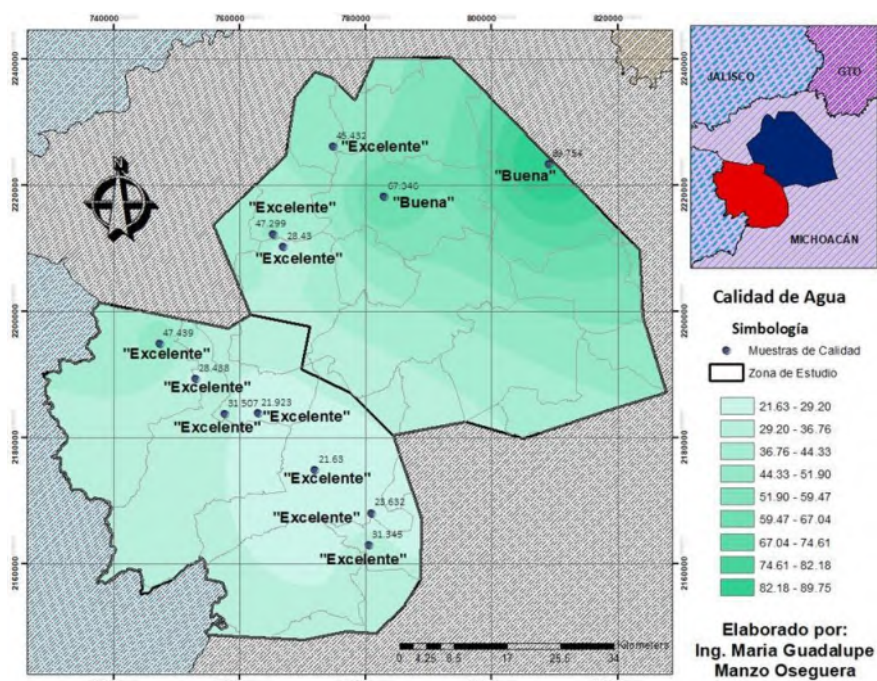


Figura 114. Mapa de calidad de agua de la zona de estudio (ICA).

6. Conclusiones

Conforme al análisis de los índices de calidad del agua propuestos en el presente proyecto, se concluye que, en términos generales, el agua subterránea de los acuíferos evaluados presenta una calidad favorable. Los valores obtenidos para los distintos parámetros fisicoquímicos se mantienen dentro de los rangos aceptables establecidos por la normativa vigente, lo que sugiere que el recurso hídrico es, en su mayoría, apto para los usos considerados.

No obstante, se identificaron ciertos sitios específicos en los que algunos parámetros muestran variaciones que podrían indicar procesos de alteración natural o impactos de origen antrópico. Estos casos particulares ameritan un análisis más detallado y profundo, con el fin de identificar las posibles fuentes de contaminación o desequilibrios geoquímicos, así como para establecer medidas de monitoreo y gestión adecuadas que aseguren la preservación de la calidad del agua a largo plazo.

A lo largo del proceso de modelación hidrológica superficial, se utilizaron herramientas del sistema WEAP mediante el método de humedad del suelo (Soil Moisture Method, SMM), logrando simular adecuadamente el comportamiento de las cuencas seleccionadas, a pesar de las limitaciones existentes en cuanto a la disponibilidad de información hidrométrica. Los indicadores estadísticos obtenidos durante la fase de calibración reflejan una buena calidad de ajuste entre los caudales simulados y los observados, lo cual confirma la validez y confiabilidad del modelo aplicado en este estudio.

Sin embargo, es importante señalar que para la cuenca correspondiente al acuífero de Cotija no se dispone de una estación hidrométrica directa que permita su calibración. Ante esta situación, se recurrió a la técnica de similitud hidrológica, comparando variables físicas y climáticas con una cuenca previamente calibrada (cuenca 5), para poder transferir sus parámetros y así generar las series de escurrimientos correspondientes en la zona de Cotija. Esta estrategia permitió extender el alcance de la modelación, garantizando una representación hidrológica coherente en toda el área de estudio.

Los balances hídricos muestran una dinámica hídrica dominada por la infiltración, lo cual es favorable para la recarga de los acuíferos. No obstante, el balance de la cuenca del acuífero de Cotija presenta condiciones aún más favorables, con una mayor precipitación y una eficiencia hídrica más alta, ya que hay un menor porcentaje de evapotranspiración y se aumenta el volumen infiltrado.

Esta diferencia entre ambos balances de los distintos acuíferos, puede explicarse por factores como un cambio en la cobertura vegetal y prácticas de uso del suelo, aun así,

hay que tomar en cuenta que debemos controlar la extracción y se promover la conservación de las zonas de recarga.

También debemos considerar que el uso agrícola debe tener técnicas de riego eficiente, ya que, aunque el sistema tiene buena capacidad de infiltración, las prácticas agrícolas inadecuadas podrían aumentar la escorrentía y disminuir la infiltración.

La modelación subterránea a diferencia de las modelaciones superficiales se complica un poco más debido a los escasos de información en México, pero esto no quiere decir que sean imposibles, a pesar de que el modelo subterráneo no alcanzó una calibración óptima, lo cual indica que existen discrepancias entre los valores observados y simulados que deben ser atendidas en futuras etapas del estudio, se procedió a realizar simulaciones con el objetivo de analizar tendencias generales del comportamiento del acuífero. Este enfoque permite avanzar en el entendimiento preliminar del sistema hidrogeológico, aunque se reconoce la necesidad de mejorar la representación del mismo mediante ajustes adicionales y una mayor validación con datos observacionales en fases posteriores del proyecto.

Los acuíferos están compuestos por zonas altas boscosas, donde existe un fracturamiento de rocas que tienen una permeabilidad y capacidad de infiltración muy alta, por lo que son excelentes receptores de recarga. Las principales zonas de recarga del acuífero se encuentran desde el noroeste hasta el sur en el acuífero de Cotija, recargando principalmente al este del municipio de Los reyes y Peribán por el Cerro de Tancítaro este mismo con una gran capacidad de recarga por lo que es de gran importancia, el cerro de la campana, ubicado en San Juan Parangaricutiro, por el municipio de Tingüindín tiene una aportación por el cerro de Patamban y unas pequeñas zonas de recarga en el municipio de Cotija, perteneciente a la presa San Juanico. Mientras que en el acuífero de Zamora se localizan varios cerros entre los más destacados La Beata ubicado en Zamora, La cruz ubicada entre Purépero y Tlazazalca, San Ignacio ubicado entre Chilchota y Tangancícuaro, La virgen, cerro el Grande, Tamándaro, El Alto ubicado en Chavinda, El Gordo y el Encinal ubicados en Ixtlán.

El presente estudio permitió caracterizar la hidrogeoquímica y evaluar la calidad del agua en la zona de estudio, proporcionando información valiosa para la población y futuras investigaciones, dado que actualmente existe poca documentación sobre la calidad del agua en la región.

Los resultados indican que las concentraciones de los elementos tóxicos analizados no superan los límites establecidos por normativas nacionales e internacionales, lo que confirma que el agua subterránea es apta para consumo humano. Se determinó que los cationes con mayor concentración son el calcio (Ca^{2+}) y el magnesio (Mg^{2+}), mientras que

en los aniones predominan los bicarbonatos (HCO_3^-), seguidos por los sulfatos (SO_4^{2-}) y los cloruros (Cl^-).

La clasificación hidrogeoquímica revela que el agua en la zona corresponde principalmente al tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica, característica de áreas de recarga. La presencia de HCO_3^- y Ca^{2+} sugiere que se trata de aguas de reciente infiltración, lo que, en conjunto con el contexto hidrogeológico, evidencia un proceso de sobreexplotación del acuífero que abastece a los pozos.

El análisis de las relaciones hidrogeoquímicas permitió determinar el origen de estas aguas subterráneas, así como la presencia de procesos de intercambio iónico directo, los cuales favorecen una mayor concentración de Ca^{2+} debido a mecanismos de dilución. Además, a través del modelo de Gibbs, se identificó que las aguas son relativamente jóvenes y se encuentran en un proceso activo de meteorización e interacción agua-roca.

Si bien la calidad del agua subterránea cumple con los estándares establecidos para su uso y su consumo, es fundamental monitorear de manera continua el estado del acuífero debido a su sobreexplotación. Asimismo, se recomienda regular el uso de fertilizantes en la zona agrícola para prevenir posibles afectaciones a la calidad del agua en el futuro.

7. Referencias

- Álvaro Can-Chulim, Ortega Escobar Héctor Manuel, García Calderón Norma Eugenia, Reyes Ortigoza Amada Laura, González Hernández Víctor Arturo, & Flores Román David. (2011). ORIGEN Y CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA ORIENTAL DE MÉXICO. *Terra Latinoamericana*, 29, 189–200.
- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *FUNDAMENTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE* (Limusa, S.A. de C.V.).
- Armas Vargas, F. de J., Escolero Fuentes, O., Herrera Zamarrón, G., González Morán, T., Prado Pano, B. L., & Rebolledo Vieyra, M. (2010). *Modelación y simulación hidrodinámica del sistema acuífero Zamora, en Michoacán México*.
- Arthur W. Hounslow. (1995). *Water Quality Data: Analysis and Interpretation* (Stillwater, USA). Lewis Publishers.
- Ayuba, R., Omonona, O. V., & Onwuka, O. S. (2013). Assessment of Groundwater Quality of Lokoja Basement Area, North-Central Nigeria. In *JOURNAL GEOLOGICAL SOCIETY OF INDIA* (Vol. 82).

- Busico, G., Cuoco, E., Kazakis, N., Colombani, N., Mastrocicco, M., Tedesco, D., & Voudouris, K. (2018). Multivariate statistical analysis to characterize/discriminate between anthropogenic and geogenic trace elements occurrence in the Campania Plain, Southern Italy. *Environmental Pollution*, 234, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.053>
- Campos Aranda. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*.
- Castro, G., Medina, P., & Peraza, C. V. (n.d.). *Artículo de Investigación Origen de los sulfatos en el agua subterránea del sur de la sierrita de Ticul, Yucatán*. www.skate.ky.us,
- Chakraborti, D., Rahman, M. M., Mukherjee, A., Alauddin, M., Hassan, M., Dutta, R. N., Pati, S., Mukherjee, S. C., Roy, S., Quamruzzman, Q., Rahman, M., Morshed, S., Islam, T., Sorif, S., Selim, M., Islam, M. R., & Hossain, M. M. (2015). Groundwater arsenic contamination in Bangladesh-21 Years of research. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 31, 237–248. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2015.01.003>
- Chow, V. Te. (1988). *Applied Hydrology*.
- CONAGUA. (2020a). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Zamora (1608)*.
- CONAGUA. (2020b). *Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero de Cotija (1622)*.
- Correa González, A., Martínez Cinco, M. A., & Sánchez Quispe, S. T. (2015). *Determinación de la concentración de nitratos en escorrentía superficial y mantos acuíferos con modelación matemática*.
- Correa González Alejandra, Martínez Cinco Marco Antonio, & Sánchez Quispe Sonia Tatiana. (2015). *Determinación de la concentración de nitratos en escorrentía superficial y mantos acuíferos con modelación matemática*.
- Cuoco, E., Verrengia, G., de Francesco, S., & Tedesco, D. (2010). Hydrogeochemistry of Roccamonfina volcano (Southern Italy). *Environmental Earth Sciences*, 61(3), 525–538. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0363-3>
- Dehghanipour, A. H., Zahabiyoun, B., Schoups, G., & Babazadeh, H. (2019). A WEAP-MODFLOW surface water-groundwater model for the irrigated Miyandoab plain, Urmia lake basin, Iran: Multi-objective calibration and quantification of historical drought impacts. *Agricultural Water Management*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105704>
- Díaz González Lorena, Santoyo Edgar, & Reyes Reyes Juan. (2008). *Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na K usando herramientas computacionales y*

geoquimiométricas, aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos.

Droubi, A., Al-Sibai, Abdallah, M., Zahra, A., & Obeissi, S. &. (n.d.). *A Decision Support System (DSS) for Water Resources Management, -Design and Results from a Pilot Study in Syria.* www.acsad.org

Emilio Custodio Gimena, M. R. L. (2001). *Hidrología Subterránea: Vol. Tomo I* (Segunda).

F. Javier Sánchez San Román. (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea* (Segunda).

Flores Lázaro, N., Saldivar Valdez, A., Manuel Hernández Madrigal, V., & Pérez Veyna, O. (2017). Núm.4 16 de mayo-29 de junio. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 8).

Flores Marin, M. A., & Sanvicente Sánchez, H. (2014). *Gestión integrada de los recursos hídricos, de la cuenca hidrológica del río Papagayo, estado de Guerrero.*

Fowler, A. C. (1997). *Mathematical Models in the Applied Sciences: Vol. (Vol. 17)* (Cambridge University).

Gaikwad, S., Gaikwad, S., Meshram, D., Wagh, V., Kandekar, A., & Kadam, A. (2020a). Geochemical mobility of ions in groundwater from the tropical western coast of Maharashtra, India: implication to groundwater quality. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 2591–2624. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00312-9>

Gaikwad, S., Gaikwad, S., Meshram, D., Wagh, V., Kandekar, A., & Kadam, A. (2020b). Geochemical mobility of ions in groundwater from the tropical western coast of Maharashtra, India: implication to groundwater quality. *Environment, Development and Sustainability*, 22(3), 2591–2624. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00312-9>

García Contreras, J. G., Sánchez Quispe. Sonia Tatiana, Pardo Loaiza, J., & Cázarez Rodríguez, S. E. (2021). *Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del lago de Cuitzeo.*

García Hidalgo Yoandris, Balmaseda Espinosa Carlos, & Vargas Rodríguez Heriberto. (2012). *Caracterización hidroquímica de las aguas de riego de la cuenca del río Naranjo, municipio Majibacoa, provincia Las Tunas.*

García, L., Directores, R., & Paredes Arquiola, J. (n.d.). *Propuesta y análisis de metodologías para la evaluación de recursos hídricos mediante modelos precipitación-escurrentía Tesis Doctoral.*

García Pérez, C. L., Sánchez Quispe, S. T., & Lucas Urbina, O. (2021). *Modelación del acuífero Ciénega Prieta-Moroleón en modflow.*

- Gómez Cruz Karina. (2020). *Estudio de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Cuitzeo*.
- Harbaugh, A. W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model - the Ground - Water Flow Process*.
- Héctor Piñeda, Nancy Reartes, Silvia del Carmen Sereno, S. Frangie, C. Bolonia, & Leonides Sereno. (1998). ELIMINACIÓN DE FLUORUROS UTILIZANDO HIDROXIAPATITA. *Actas Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*.
- Herrera Carbajal, S., Villalba Atondo, A. I., & Molinar Tabares, M. E. (2007). Modelación hidrogeológica y evaluación de la sustentabilidad del acuífero transfronterizo del Río San Pedro en Sonora, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 21–30.
- Hughes Lomelín, R. N.-H., Martínez Cinco, M. A., & Sánchez Quispe, S. T. (2023). *Implementación de un modelo matemático conjunto en el sistema hidrogeológico del acuífero valle de Aguascalientes para el transporte de fluoruro y arsénico*.
- Krishna Kumar, S., Chandrasekar, N., Seralathan, P., Godson, P. S., & Magesh, N. S. (2012). Hydrogeochemical study of shallow carbonate aquifers, Rameswaram Island, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(7), 4127–4138.
<https://doi.org/10.1007/s10661-011-2249-6>
- Kumar, M., Kumari, K., Singh, U. K., & Ramanathan, A. (2009). Hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Muktsar, Punjab: Conventional graphical and multivariate statistical approach. *Environmental Geology*, 57(4), 873–884.
<https://doi.org/10.1007/s00254-008-1367-0>
- Lambán, L. J., & Jódar, J. (2014). *Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (Pirineo Central, España)*.
<https://doi.org/10.13140/2.1.4713.9201>
- Le Page, M., Berjamy, B., Fakir, Y., Bourgin, F., Jarlan, L., Abourida, A., Benrhanem, M., Jacob, G., Huber, M., Sghrer, F., Simonneaux, V., & Chehbouni, G. (2012). An Integrated DSS for Groundwater Management Based on Remote Sensing. The Case of a Semi-arid Aquifer in Morocco. *Water Resources Management*, 26(11), 3209–3230.
<https://doi.org/10.1007/s11269-012-0068-3>
- Lucas Urbina, O., Martínez Herrera, G., & Hernández Hernández, M. A. (2018). *Análisis del transporte de nitratos mediante la modelación subterránea (Modflow-MT3D) en los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz (Michoacán)*.
- Luis, J., & Lozano, S. (2017). *MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA ACOPLADA DE LA CUENCA MEDIA Y BAJA DEL RÍO MAGDALENA*.

- MacHiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 174(1–4), 645–663. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1485-5>
- Manzo Oseguera, M. G., Sánchez Quispe, S. T., & García Romero, L. (2022). *Evaluación de los recursos hídricos de los acuíferos Zamora y Cotija*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología* (Mundiprensa).
- Mautner, M. R. L., Foglia, L., Herrera, G. S., Galán, R., & Herman, J. D. (2020). Urban growth and groundwater sustainability: Evaluating spatially distributed recharge alternatives in the Mexico City Metropolitan Area. *Journal of Hydrology*, 586. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124909>
- Merlos Villegas, F., Sánchez Quispe, S. T., & Almanza Campos, J. A. (2014). Creación de un sistema de información hidrológico para el cálculo de intensidades máximas y gestión de datos meteorológicos. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Mora, A., Mahlknecht, J., Rosales-Lagarde, L., & Hernández-Antonio, A. (2017). Assessment of major ions and trace elements in groundwater supplied to the Monterrey metropolitan area, Nuevo León, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(8). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6096-y>
- Morán-Ramírez, J., Ledesma-Ruiz, R., Mahlknecht, J., & Ramos-Leal, J. A. (2016). Rock-water interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling. *Applied Geochemistry*, 68, 79–94. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.03.008>
- Nas, B., & Berkay, A. (2010). Groundwater quality mapping in urban groundwater using GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160(1–4), 215–227. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0689-4>
- Natalia, A. S., & Aguad, H. (n.d.). *EVALUACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE FLUORURO Y ARSÉNICO EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL DOMO CENTRAL DE LA PROVINCIA DEL CHACO*.
- Navarro Arellano, L. D., Sánchez Quispe, S. T., & Navarro Farfán, M. del M. (2021). *MODELACIÓN DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERÉNDARO CON MODFLOW*.

- Navarro Farfán, M. del M., Martínez Cinco, M. A., & Sánchez Quispe, S. T. (2019). *Evaluación con cambio climático de escenarios de demanda para las masas subterráneas en los acuíferos asociados al campo geotérmico cerritos colorados.*
- Navarro Farfán, M. del M., Martínez Cinco, M. A., & Sánchez Quispe, S. T. (2024). *Transporte y destino de arsénico en el acuífero Morelia-Queréndaro por medio de Modelación Subterránea.*
- Navarro Farfán, M. del M., Sánchez Quispe, S. T., & Hernández Hernández, M. A. (2017). *Modelación del acuífero Apatzingán.*
- Paydar, Z., & Qureshi, M. E. (2012). Irrigation water management in uncertain conditions- Application of modern portfolio theory. *Agricultural Water Management*, 115, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.08.004>
- Pérez González, A., Sánchez Quispe, S. T., Lucas Urbina, O., & Navarro Farfán, M. del M. (2022). *“MODELACIÓN DEL ACUÍFERO SALVATIERRA-ACÁMBARO CON MODFLOW.”*
- Pérez Moreno Fidel, Prieto García Francisco, Rojas Hernández Alberto, Galán Vidal Carlos, Marmolejo Santillán Yolanda, Romo Gómez Caudia, Castañeda Ovando Araceli, Rodríguez Ávila José Antonio, & Barrado Esteban Enrique. (2013). *Caracterización química de aguas subterráneas en pozos y un distribuidor de agua de Zimapán Estado de Hidalgo, México.*
- Pizarro, R. T., Ramirez, C. B., & Pablo Flores, J. V. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales... Comparison analyses of five mean areal rainfall estimation methods in widely varying years. In *BOSQUE* (Vol. 24, Issue 3).
- Raúl MANCILLA-VILLA, Ó., Manuel ORTEGA-ESCOBAR, H., Ramírez-ayala, C., Uscangamortera, E., Ramos-bello, R., & Laura REYES-ORTIGOZA, A. (2012). METALES PESADOS TOTALES Y ARSÉNICO EN EL AGUA PARA RIEGO DE PUEBLA Y VERACRUZ, MÉXICO. In *Rev. Int. Contam. Ambie* (Vol. 28, Issue 1).
- Ríos, E., Avalos, H. C., Daniel González-Mora, I., & Pineda, R. (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión.* <https://www.researchgate.net/publication/280938710>
- Sadat-Noori, S. M., Ebrahimi, K., & Liaghat, A. M. (2014). Groundwater quality assessment using the Water Quality Index and GIS in Saveh-Nobaran aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 71(9), 3827–3843. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2770-8>
- Salcedo Sánchez, E. R., Garrido Hoyos, S. E., Esteller, M. V., Martínez Morales, M., & Ocampo Astudillo, A. (2017). Hydrogeochemistry and water-rock interactions in the urban area

- of Puebla Valley aquifer (Mexico). *Journal of Geochemical Exploration*, 181, 219–235.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.016>
- Salem, Z. E. S., & Osman, O. M. (2017). Use of major ions to evaluate the hydrogeochemistry of groundwater influenced by reclamation and seawater intrusion, West Nile Delta, Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3675–3704.
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-8056-4>
- Sánchez Joan Alberto, Álvarez Teresa, Pacheco Julia Guadalupe, Carrillo Laura, & González Roger Amílcar. (2016). *Calidad del agua subterránea acuífero sur de Quintana Roo*. 75–96.
- Sánchez-Quispe, S. T., Navarro-Farfán, M. del M., & García-Romero, L. (2021). *Chapter 7 Methodology for processing meteorological and hydrometric data at basin level*.
<https://doi.org/10.35429/H.2021.16.107.145>
- Saravanan, K., Srinivasamoorthy, K., Prakash, R., Gopinath, S., & Suma, C. S. (2015). An Evaluation of Hydrogeochemistry of Groundwater in Upper Vellar Sub – Basin Using Mineral Stability and Solute Transport Modelling. *Aquatic Procedia*, 4, 1119–1125.
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.142>
- Silva-García J.T, Ochoa-Estrada S., Cristobal-Acevedo D., & Estrada-Godoy F. (2005). *Calidad química del agua subterránea de la ciénega de Chapala como factor de degradación del suelo*.
- Singh, A. (2014). Simulation-optimization modeling for conjunctive water use management. In *Agricultural Water Management* (Vol. 141, pp. 23–29). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.003>
- Sojobi, A. O. (2016). Evaluation of groundwater quality in a rural community in North Central of Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(3), 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5149-y>
- Solera Solera, A., & Andréu Álvarez, J. (2004). *Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión sistemática de recursos hídrico. Aplicación a las cuencas de los ríos Tajo y Júcar*. Universitat Politècnica de València.
- Solís de la Paz, J. C., & Domínguez Sánchez, C. (2014). *Funcionamiento hidráulico del acuífero Morelia - Queréndaro, municipio de Acuitzio*.
- Stockholm Environment Institute. (2009). *GUÍA METODOLÓGICA MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y DE RECURSOS HÍDRICOS CON EL MODELO WEAP*.

- Teodoro Silva José, Moncayo Rodrigo, Ochoa Salvador, Estrada Francisco, Cruz-Cárdenas Gustavo, Escalera Carlos, Villalpando Fabián, & Nava Jaime. (2013). *Calidad química del agua subterránea y superficial en la cuenca del río Duero, Michoacán*. 127–146.
- Toscano Reyes, C. A., Cuevas Villanueva, R. A., & Buenrostro Delgado, O. (n.d.).
UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL FACULTAD DE BIOLOGÍA.
- Voutsis, N., Kelepertzis, E., Tziritis, E., & Kelepertsis, A. (2015). Assessing the hydrogeochemistry of groundwaters in ophiolite areas of Euboea Island, Greece, using multivariate statistical methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 159, 79–92.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2015.08.007>
- Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P., & Woods, R. (2007). Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*, 1(4), 901–931.
<https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2007.00039.x>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500. <https://doi.org/10.1080/02508060508691893>

8. Anexos

8.1 Registro fotográfico del trabajo en campo (2023).

Las siguientes imágenes forman parte del registro visual obtenido durante la ejecución del trabajo en campo del año 2023, donde el objetivo era medir los niveles piezométricos para la simulación subterránea. Su inclusión tiene como finalidad documentar de manera gráfica las actividades realizadas, las condiciones del entorno, los instrumentos utilizados, así como los sitios específicos de muestreo u observación.

Estas fotografías representan una fuente complementaria de información que permite corroborar y fortalecer la validez del proceso metodológico seguido en esta investigación, así como ofrecer un respaldo visual que contribuya a la comprensión del contexto físico y operativo en el cual se desarrolló el estudio.

- 1) Pozo de extracción en el municipio de Cotija.
- 2) Pozo de extracción “Los manguitos” ubicado en la localidad de La Magdalena perteneciente al municipio de Tocumbo Michoacán (uso agrícola).
- 3) Pozo de extracción en Tacátzcuaro, municipio de Tingüindín (Uso Público).
- 4) Pozo de extracción Cotija.
- 5) Pozo de extracción “Campo de futbol” en Cotija (Uso Público).
- 6) Pozo de extracción localidad “El paso” Cotija (Uso Público).
- 7) Brigada de trabajo en campo 2023 (Mar, Israel, Lupita).
- 8) Pozo de extracción en Ixtlán de los Hervores (Uso Público).
- 9) Río Duero.
- 10) Pozo de extracción ubicado en “Guadalupe Victoria” Ecuandureo, Michoacán (Uso Público).
- 11) Pozo de extracción en “San Antonio Ocampo” (Rincón del tepetate) perteneciente al municipio de Tangancícuaro (Uso público).
- 12) Pozo de extracción SAPAZ 1 ubicado en Zamora, Michoacán (Uso público).
- 13) Pozo de extracción a borde de carretera ubicado en Chilchota.
- 14) Pozo de extracción en Purépero Michoacán (Uso Público).
- 15) Medición de nivel piezométrico (Purépero).
- 16) Multiparamétrico para medir parámetros in si tu.
- 17) Pozo de extracción ubicado en Tlazazalca (Uso público).
- 18) Kit Hanna para prueba rápida de nitratos en campo.
- 19) Pozo de extracción ubicado den “Changuitiro” municipio de Churintzio.
- 20) Pozo de extracción ubicado en el municipio de Churintzio.



1)



2)



3)



4)



5)



6)



7)



8)



9)



10)



11)



12)



13)



14)



15)



16)



17)



18)



19)



20)

8.2 Registro fotográfico del trabajo en campo (2024).

El trabajo de campo realizado durante el año 2024 se enfocó principalmente en la recolección de muestras, con el objetivo de someterlas posteriormente a un análisis detallado en laboratorio. Esta etapa fue fundamental para obtener datos representativos de las condiciones actuales del recurso hídrico en la zona de estudio, permitiendo evaluar diversos parámetros fisicoquímicos y, en su caso, microbiológicos.

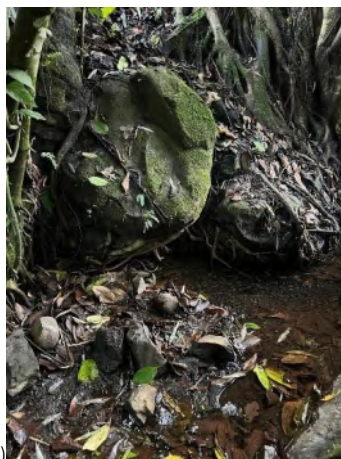
- 1) Brigada de trabajo en campo 2024, día 2 (Joel, Lupita, Liz, Diego).
- 2) Vegetación manantial municipio de Los Reyes Michoacán.
- 3) Afloramiento de agua subterránea, Atapan Michoacán.
- 4) Pozo de extracción "San José de Gracia" Municipio de Los Reyes (Uso Público).
- 5) Pozo de extracción ubicado en Peribán Michoacán (Uso agrícola).
- 6) Pozo de extracción "Los maguitos" 2024.
- 7) Muestra de agua Tacátzcuaro, 2024 (Uso Público).
- 8) Muestra de agua "Los manguitos" 2024 (Uso agrícola).
- 9) Estación meteorológica en la presa san Juanico (No está en operación actualmente).
- 10) Presa San Juanico 2024.
- 11) Multiparamétrico 2024.
- 12) Preservación de muestras antes de llevar a laboratorio.
- 13) Preservación de muestras en campo.
- 14) Brigada de trabajo en campo 2024, día 1 (Angel, Mar, Diego, Lupita).
- 15) Nacimiento de agua "El telonzo" ubicado en Tangamandapio.
- 16) Pozo de extracción Ixtlán de los hervores 2024.
- 17) y 18) Pozo de extracción ubicado en "La rinconada" localidad del municipio de Zamora.



1)



2)



3)



4)



5)



6)



7)



8)



9)



10)



11)



12)



13)



14)



15)



16)



17)



18)

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AMBIENTAL	
Título del trabajo	"ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS ZAMORA Y COTUA EN EL ESTADO DE MICHOACÁN"	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	MARIA GUADALUPE MANZO OSEGUERA	maria.oseguera@umich.mx
Director	SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE	quispe@umich.mx
Codirector	LILIANA GARCÍA ROMERO	liliana.romero@umich.mx
Coordinador del programa	HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA	hchavez@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	SÍ	Apoyo en la redacción para darle formalidad a la idea de lo que quería explicar.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	No se hicieron traducciones al español con IA.
Traducción a otra lengua	No	No se hicieron traducciones a otra lengua con IA.
Revisión y corrección de estilo	Sí	Se uso como apoyo en corregir de las ideas generales y explicarlas mejor.
Análisis de datos	No	No se analizaron datos con IA.
Búsqueda y organización de información	Sí	Se busco organizar la información y hacer la redacción de una manera más entendible.
Formateo de las referencias bibliográficas	No	Para el formateo de referencias se utilizo un gestor de referencias bibliográficas.
Generación de contenido multimedia	No	No se usó IA para multimedia.
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Maria Guadalupe Manzo Oseguera -
Lugar y fecha	Morelia Michuacán 04 de julio 2025

Maria Guadalupe Manzo Oseguera

ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS ZAMORA Y COTIJA EN EL ESTA

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:472536411

Fecha de entrega

8 jul 2025, 8:03 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

8 jul 2025, 8:11 a.m. GMT-6

Nombre de archivo

ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA Y CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS ZAMORA Y C....pdf

Tamaño de archivo

13.5 MB

208 Páginas

56.383 Palabras

332.795 Caracteres

24% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 24%  Fuentes de Internet
- 11%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.