



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

RIESGO POTENCIAL A LA SALUD POR AGUA
SUBTERRÁNEA.
REGIÓN SUR DEL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO.

TESIS

Que para obtener el título de
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

PRESENTA

Ing. Roxana Garcia Chávez



DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Luis Expósito Castillo

CODIRECTORES

Dra. Vicenta Esteller Alberich

Dr. Miguel Ángel Gómez Albores

RESUMEN

El Valle del Mezquital, en México, enfrenta un desafío significativo en términos de la calidad del agua subterránea. Estudios antecedentes revelan la presencia de contaminantes significativos que representan un riesgo potencial para la salud humana. La ubicación geográfica de la región, sus características geológicas, el desarrollo de la actividad agrícola y el empleo de aguas residuales en esta actividad la hacen particularmente vulnerable a la contaminación del agua subterránea.

La presente investigación se desarrolla en el marco del PRONAI-318998. Se centra en la identificación de contaminantes químicos como nitratos, fluoruro y arsénico, reconocidos por sus efectos adversos a la salud humana. Los nitratos pueden causar metahemoglobinemia, el fluoruro puede llevar a fluorosis dental y esquelética, y el arsénico está asociado con varios problemas de salud, incluido el cáncer. En respuesta a esta problemática, el estudio se propone evaluar el riesgo potencial a la salud humana que representa el consumo de las aguas subterráneas del acuífero mediante el análisis integrado de sus características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas para proponer medidas de gestión/mitigación.

La metodología adoptada para el cumplimiento del objetivo incluye una recopilación exhaustiva de datos bibliográficos, la realización de campañas de muestreo de agua y aplicación de encuestas con el fin de conocer el uso dado en los hogares, almacenamiento y tratamiento. Seguidamente se realiza la construcción del modelo hidrogeológico conceptual a partir de la integración de las características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas, el cual permite una comprensión detallada de la dinámica del agua subterránea en la región. Para evaluar el riesgo a la salud humana se emplean enfoques determinísticos y probabilísticos (análisis de Monte Carlo) según las pautas recomendadas por la US.EPA.

Los resultados muestran que la calidad del agua subterránea está comprometida y presenta un riesgo significativo para la salud humana, especialmente en niños menores de dos años. Se ofrecen medidas de gestión/mitigaciones basadas en las características del acuífero y la evaluación del riesgo. Estas estrategias buscan no solo mitigar los riesgos actuales, sino también establecer un marco sostenible para la gestión del recurso hídrico en la región, contribuyendo a la mejora de la salud pública y la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

ABSTRACT

The Mezquital Valley in Mexico faces a significant challenge regarding groundwater quality. Previous studies reveal the presence of significant contaminants that pose a potential health risk. The region's geographical location, geological characteristics, agricultural development, and the use of wastewater in this activity make it particularly vulnerable to groundwater contamination.

This research is conducted within the framework of PRONAI-318998. It focuses on identifying chemical contaminants such as nitrates, fluoride, and arsenic, which are known for their adverse effects on human health. Nitrates can cause methemoglobinemia, fluoride can lead to dental and skeletal fluorosis, and arsenic is associated with various health issues, including cancer. In response to this issue, the study aims to evaluate the potential health risk posed by the consumption of groundwater from the aquifer through an integrated analysis of its hydrodynamic and hydrogeochemical characteristics to propose management/mitigation measures.

The methodology adopted to achieve this objective includes an exhaustive collection of bibliographic data, water sampling campaigns, and surveys to understand household use, storage, and treatment. Subsequently, the construction of a conceptual hydrogeological model is carried out by integrating hydrodynamic and hydrogeochemical characteristics, allowing for a detailed understanding of groundwater dynamics in the region. Deterministic and probabilistic approaches (Monte Carlo analysis) recommended by the US EPA are employed to assess human health risk.

The results show that groundwater quality is compromised and presents a significant health risk, especially to children under two years of age. Management/mitigation measures based on the aquifer's characteristics and risk assessment are offered. These strategies aim not only to mitigate current risks but also to establish a sustainable framework for water resource management in the region, contributing to improved public health and long-term environmental sustainability.

ÍNDICE

LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	16
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	17
1.2 Justificación contextual y científica.....	20
1.3 Hipótesis	23
1.4 Objetivos.....	23
1.5 Organización de la tesis	24
Capítulo 2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	25
2.1 Ubicación geográfica de la región y el área de estudio	26
2.2 Características climáticas de la región y el área de estudio.	27
2.3 Características geomorfológicas de la región y el área de estudio	30
2.4 Características geológicas de la región y el área de estudio	31
2.5 Hidrología superficial de la región y el área de estudio.	33
2.6 Características hidrogeológicas	35
2.7 Uso de suelos y recursos naturales en la región y el área de estudio.....	38
2.8 Características demográficas de la región y el área de estudio.....	41
Capítulo 3. ANTECEDENTES	44
3.1 Estado del Arte.....	45
3.1.1 Generalidades	45
3.1.2 Síntesis de casos de estudio relacionados con NO ₃ ⁻ , F ⁻ y As.....	46
3.1.3 Síntesis de estudios en México relacionados con NO ₃ ⁻ , F ⁻ y As	51
3.1.4 Síntesis de estudios en el Valle del Mezquital	55
3.1.4.1 Características hidrodinámicas del acuífero	56

3.1.4.2 Características hidrogeoquímicas del acuífero	56
3.1.4.3 Estudios de riesgo a la salud humana en el Valle del Mezquital	58
3.2 Marco Teórico	59
3.2.1 Metodologías de Evaluación de Riesgo a la Salud Humana	59
3.2.2 Resumen de características del NO_3^-	61
3.2.2.1 Química del NO_3^-	61
3.2.2.2 Geoquímica del NO_3^-	62
3.2.2.3 Toxicología del NO_3^-	63
3.2.3 Resumen de características del F^-	64
3.2.3.1 Química del F^-	64
3.2.3.2 Geoquímica del F^-	65
3.2.3.3 Toxicología del F^-	66
3.2.4 Resumen de características del As	68
3.2.4.1 Química del As	68
3.2.4.2 Geoquímica del As	69
3.2.4.3 Toxicología del As	72
3.3 Marco conceptual	75

Capítulo 4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Confección de la base de datos	82
4.1.1 Recopilación de información bibliográfica	82
4.1.2 Campañas de muestreo	83
4.1.3 Aplicación y procesamiento de encuestas	86
4.2 Hidrodinámica del acuífero. Confección del Modelo Hidrogeológico preliminar	87
4.3 Hidrogeoquímica del acuífero. Confección del Modelo Hidrogeológico definitivo.	88
4.4 Evaluación del riesgo a la salud humana	89
4.4.1 Definición del problema	93
4.4.1.1 Selección de los Contaminantes Críticos	94
4.4.1.2 Caracterización de los Contaminantes Críticos	97
4.4.2 Evaluación de la exposición	98
4.4.2.1 Identificación y caracterización de las rutas de exposición	98

4.4.2.2 Clasificación de las rutas de exposición	99
4.4.2.3 Cálculo de las Dosis de Exposición. Método Determinístico.....	100
4.4.3 Caracterización del riesgo	104
4.4.3.1 Evaluación del riesgo no cancerígeno	105
4.4.3.2 Evaluación del riesgo cancerígeno	108
4.4.3.3 Método Probabilístico. Análisis de Monte Carlo.....	111
4.5 Análisis de la incertidumbre	114
4.6 Modelo Conceptual del Riesgo.....	117
4.7 Propuesta de medidas de gestión/mitigación	118

Capítulo 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 120

5.1 Confección de la Base de Datos	120
5.1.1 Recopilación de la información bibliográfica	121
5.1.2 Campañas de muestreo	123
5.1.3 Aplicación y procesamiento de encuestas	125
5.2 Hidrodinámica del acuífero. Confección del Modelo Hidrogeológico preliminar.	125
5.3 Hidrogeoquímica del acuífero	128
5.3.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio.	135
5.4 Evaluación del riesgo a la salud humana	136
5.4.1 Definición del problema	136
5.4.1.1 Selección de Contaminantes Críticos	137
5.4.1.2 Características de los Contaminantes Críticos	143
5.4.2. Evaluación de la exposición	143
5.4.2.1 Identificación de las rutas de exposición	144
5.4.2.2 Clasificación de las rutas de exposición	150
5.4.2.3 Cálculo de las Dosis de Exposición Estimadas por método determinístico	151
5.4.3 Caracterización del riesgo	153
5.4.3.1 Evaluación del riesgo no cancerígeno	153
5.4.3.2 Evaluación del riesgo cancerígeno	164
5.4.3.3 Método Probabilístico. Análisis de Monte Carlo.....	169
5.5 Análisis de la incertidumbre	179

5.6 Modelo Conceptual del Riesgo.....	186
5.7 Medidas para la gestión y mitigación del riesgo.....	194
 Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	197
6.1 Conclusiones.....	198
6.2 Recomendaciones	200
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	202
 ANEXOS.....	223

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de localización del acuífero del Valle del Mezquital (VM) y los municipios del área de estudio	27
Figura 2.2	Mapa de temperatura promedio anual del VM y los municipios del área de estudio.....	28
Figura 2.3	Mapa de precipitación promedio anual del VM y los municipios del área de estudio.....	29
Figura 2.4	Mapa geológico del VM y los municipios del área de estudio.....	32
Figura 2.5	Mapa hidrográfico del VM y los municipios del área de estudio.....	34
Figura 2.6	Mapa piezométrico del VM y los municipios del área de estudio.....	37
Figura 2.7	Mapa de uso del suelo del VM y de los municipios del área de estudio	39
Figura 2.8	Mapa de densidad demográfica del área de estudio	43
Figura 3.1	Fotografía del síndrome de bebe azul o metahemoglobinemia.....	63
Figura 3.2	Diagrama de procesos geoquímicos que controlan la solubilidad del fluoruro. a) La precipitación de fluorita. b) La influencia del pH.....	66
Figura 3.3	Fotografías de fluorosis dental (A) y esquelética (B)	67
Figura 3.4	Diagrama de Eh-pH de especies acuosas de As en el sistema As-O ₂ -H ₂ O a 25°C y 1 bar de presión total.	71
Figura 3.5	Diagrama de ocurrencia de especies acuosa de As. a) Especies de As (V) como función del pH. b) Especies de As (III) como función del pH.	72
Figura 3.6	Fotografías de ejemplos de cáncer de piel causados por la ingestión prolongada de aguas con As en Bangladesh	74
Figura 3.7	Fotografías de efectos en la piel por exposición al As en el agua potable.	75
Figura 3.8	Fotografías de efectos tóxicos del As	75
Figura 4.1	Diagrama de flujo metodológico de la Investigación	81
Figura 4.2	Collage de fotos tomadas durante las visitas a las instituciones para gestionar el acceso a los puntos en la red de muestreo.....	84
Figura 4.3	Collage de fotos tomadas durante la aplicación de las encuestas en la campaña desarrollada con fecha de junio del 2023.....	85
Figura 4.4	Diagrama metodológico para generar el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero del VM	88
Figura 4.5	Diagrama metodológico para la evaluación del riesgo a la salud humana.....	92
Figura 4.6	Diagrama de flujo metodológico para la selección de los CC.....	94
Figura 4.7	Diagrama de flujo metodológico para la selección de las vías, receptores y escenarios que requieren un análisis probabilístico del riesgo.....	111
Figura 4.8	Diagrama de flujo metodológico para el análisis de Monte Carlo.....	114
Figura 4.9	Diagrama de flujo metodológico para la confección del MCR esquemático.....	117
Figura 5.1	Mapa de localización de puntos de muestreo identificados en la literatura empleados en la investigación	121

Figura 5.2	Mapa de ubicación de los puntos de muestreo analizados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998	123
Figura 5.3	Modelo Hidrogeológico Conceptual preliminar	125
Figura 5.4	Diagrama de Piper para los resultados de análisis químicos obtenidos durante los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998.	128
Figura 5.5	Gráficos de dispersión de las concentraciones de As y F ⁻ en mg/L vs la temperatura en °C elaborado con los datos obtenidos de los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998.	133
Figura 5.6	Gráficos de dispersión de las concentraciones de As vs F ⁻ en mg/L elaborado con los datos obtenidos de los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998.	134
Figura 5.7	Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio.	135
Figura 5.8	Diagrama de Venn de los CC obtenidos a partir de los resultados de los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998.	138
Figura 5.9	Diagrama de cuerdas de CC determinados a partir de los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998 y los datos bibliográficos.	140
Figura 5.10	Diagrama de cuerdas de CC obtenidos durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998 y los datos bibliográficos, por municipios del área de estudio.	141
Figura 5.11	Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al N-NO ₃ ⁻ identificados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.	144
Figura 5.12	Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al F ⁻ identificados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.	144
Figura 5.13	Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al N-NO ₃ ⁻ identificados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.	145
Figura 5.14	Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al N-NO ₃ ⁻ identificados en la literatura.	146
Figura 5.15	Mapa de distribución espacial de puntos de exposición a F ⁻ identificados en la literatura.	147
Figura 5.16	Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al As identificados en la literatura.	148
Figura 5.17	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para el N-NO ₃ ⁻ por vía oral respecto a los umbrales de referencia (RfD, NOAEL y LOAEL) definidos para el efecto de metahemoglobina infantil por exposición crónica a N-NO ₃ ⁻ en el agua potable en el Escenario I.	153
Figura 5.18	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para el N-NO ₃ ⁻ por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al N-NO ₃ ⁻ en el agua potable por vía dérmica en el Escenario I.	154
Figura 5.19	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para los F ⁻ por vía oral respecto a los umbrales de referencia (RfD, NOAEL y LOAEL) definidos para el efecto de fluorosis dental en niños por exposición crónica a F ⁻ en el agua potable en el Escenario I.	155
Figura 5.20	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para F ⁻ por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica a los F ⁻ en el agua potable por vía dérmica en el Escenario I.	156

Figura 5.21	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para el As por vía oral respecto a los umbrales de referencia (RfD, NOAEL y LOAEL) definidos para posibles efectos de necrosis celular, hiperpigmentación y posibles complicaciones vasculares por exposición crónica a As en el agua potable en el Escenario I.	157
Figura 5.22	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para el As por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al As en el agua potable por vía dérmica en el Escenario I...	158
Figura 5.23	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para F ⁻ por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al F ⁻ en el agua potable por vía dérmica en el Escenario II.	159
Figura 5.24	Gráfico de columnas agrupadas de las DEE niños, adultos para el As por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al As en el agua potable por vía dérmica en el Escenario II.	159
Figura 5.25	Gráfico de columnas con eje doble del RIC, RIC/50 y RIC/100 para receptores infantiles en cada punto de exposición respecto al umbral de RIC admisible de 1 en 1 000 000 por exposición a As en la vía oral para el Escenario I.....	166
Figura 5.26	Gráfico de columnas con eje doble del RIC, RIC/50 y RIC/100 para receptores adultos en cada punto de exposición respecto al umbral de RIC admisible de 1 en 1 000 000 por exposición a As en la vía oral para el Escenario I.....	167
Figura 5.27	Diagrama de violines de las DEE niños, N-NO ₃ ⁻ por la vía oral en el Escenario I respecto al RfD.....	169
Figura 5.28	Diagrama de violines de las DEE niños, F ⁻ por la vía oral en el Escenario I respecto al RfD, NOAEL y LOAEL.....	171
Figura 5.29	Diagrama de violines de las DEE, As por la vía oral para niños y adultos en el Escenario I respecto al RfD.....	173
Figura 5.30	Gráfico de barras agrupadas de la distribución del RIC obtenido por método probabilístico para niños y adultos por vía oral dada la exposición al As en el agua potable del área de estudio.....	178
Figura 5.31	Gráficos de dispersión de las correlaciones obtenidas en el análisis de sensibilidad local entre las DEE y los parámetros de entrada del modelo (C, TC, FE y PC respectivamente).	180
Figura 5.32	Histogramas de distribución de las DEE para N-NO ₃ ⁻ de niños y adultos obtenidos con el análisis de Monte Carlo en cada punto de exposición con sus respectivos IC95% vs el valor obtenido por el método determinístico.....	182
Figura 5.33	Histogramas de distribución de las DEE para F ⁻ de niños y adultos obtenidos con el análisis de Monte Carlo en cada punto de exposición con sus respectivos IC95% vs el valor obtenido por el método determinístico.....	183
Figura 5.34	Histogramas de distribución de las DEE para As de niños y adultos obtenidos con el análisis de Monte Carlo en cada punto de exposición con sus respectivos IC95% vs el valor obtenido por el método determinístico.....	184
Figura 5.35	Mapa de categorización del riesgo por exposición a N-NO ₃ ⁻	187
Figura 5.36	Mapa de categorización del riesgo por exposición a F ⁻	189
Figura 5.37	Mapa de categorización del riesgo por exposición a As.....	191
Figura 5.38	Modelo Conceptual del Riesgo (esquemático).....	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Resumen de las características climatológicas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.....	31
Tabla 2.2	Resumen de las características geomorfológicas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.....	32
Tabla 2.3	Resumen de las características geológicas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.....	34
Tabla 2.4	Resumen de las características hidrográficas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.....	36
Tabla 2.5	Resumen de las características de uso del suelo y los recursos naturales en los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información del 2020 de INEGI.....	41
Tabla 2.6	Resumen de las características demográficas del área de estudio. Confeccionado a partir de los datos del censo de población y vivienda del 2020 de INEGI	43
Tabla 2.7	Desglose de la población municipal por estratos de edad. Confeccionado a partir de los datos del censo de población y vivienda del 2020 de INEGI.....	43
Tabla 4.1	Resumen del tipo y números de análisis químicos por municipios identificados en la literatura.....	84
Tabla 4.2	Resumen de instituciones internacionales con bases de datos con información toxicológica sobre las sustancias químicas.....	84
Tabla 4.3	Parámetros químicos y microbiológicos determinados en las dos campañas de muestreo.....	87
Tabla 4.4	Resumen de los valores empleados en el cálculo del índice EMEG de cada elemento tóxico cuantificado en el área de estudio y la referencia bibliográfica de donde se obtuvieron.....	97
Tabla 4.5	Valores de los parámetros empleados en los cálculos de las DEE por vía oral y dérmica para niños (menores de dos años) y adultos (mayores de 16 años) en el Escenario I.....	104
Tabla 4.6	Valores de los parámetros empleados en los cálculos de las DEE por vía oral y dérmica para niños (menores de dos años) y adultos (mayores de 16 años) en el Escenario II.....	104
Tabla 4.7	Resumen de los umbrales empleados en la evaluación cualitativa del riesgo no cancerígeno, sus valores, el efecto adverso a la salud para el cual se determinaron y las referencias bibliográficas respectivas.....	108
Tabla 4.8	Resumen de los valores empleados en la evaluación cuantitativa del riesgo cancerígeno y las referencias bibliográficas respectivas.....	111

Tabla 4.9	Relación de las variables con la distribución y los valores empleados en la simulación de Monte Carlo y sus respectivas referencias bibliográficas.....	113
Tabla 5.1	Resumen de los datos de localización, tipo de captación y uso de los puntos identificados en la bibliografía empleados en la investigación.....	122
Tabla 5.2	Resumen de los datos de localización, tipo de captación y uso de los puntos analizados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.....	124
Tabla 5.3	Resumen del total de muestreos de puntos analizados en múltiples ocasiones (durante los trabajos antecedentes, campañas de muestreo del PRONAI 318998 y/o en ambos momentos)	126
Tabla 5.4	Resumen de las relaciones de cationes principales y la clasificación de familias de aguas presentes en el área de estudio a partir de los resultados de las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.....	131
Tabla 5.5	Relación de los resultados de los análisis fisicoquímicos de los muestreos del 2022 y 2023 en comparación con la NOM-127-SSA1-2021. En negrita, valores que superan la NOM.....	132
Tabla 5.6	Relación de elementos tóxicos cuantificados en el área de estudio y sus límites permisibles establecidos por la WHO, NOM-127-SSA1-2021 y la EMEG calculada.....	138
Tabla 5.7	Resumen de concentraciones máximas de CC determinadas durante los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998, por municipios del área de estudio.....	139
Tabla 5.8	Resumen de concentraciones máximas de CC determinadas en la bibliografía por municipios del área de estudio.....	141
Tabla 5.9	Resumen de DEE para el N-NO_3^- estimadas por el método determinístico en receptores infantiles y adultos, por las vías oral y dérmica, en el Escenario I.	152
Tabla 5.10	Resumen de DEE para el F^- en receptores infantiles y adultos, por las vías oral y dérmica, en el Escenario I.....	153
Tabla 5.11	Resumen de DEE para el As en receptores infantiles y adultos, por las vías oral y dérmica, en el Escenario I.....	153
Tabla 5.12	Resumen de DEE para F^- y As en receptores infantiles y adultos, por la vía dérmica, en el Escenario II.....	154
Tabla 5.13	Resumen de los valores de HQ del N-NO_3^- calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos.....	162
Tabla 5.14	Resumen de los valores de HQ para los F^- calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos en el Escenario I.....	163
Tabla 5.15	Resumen de los valores de HQ para el As calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos del Escenario I.....	164
Tabla 5.16	Resumen de los valores de HQ para los F^- y el As calculados en la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos del Escenario II.....	164

Tabla 5.17	Resumen de casos de estudio en la bibliografía científica sobre el efecto cancerígeno del As en la población expuesta por vía oral a través del agua potable y sus concentraciones respecto a las medidas en el área de estudio en el marco del PRONAI 318998.....	165
Tabla 5.18	Resumen de casos de estudio en la bibliografía científica sobre el efecto cancerígeno del As en la población expuesta por vía oral a través del agua potable y sus concentraciones respecto a las medidas en el área de estudio en el marco del PRONAI 318998	167
Tabla 5.19	Resultados del cálculo del RIC y el RIC normado cada 50 y cada 100 niños/adultos para cada punto de exposición en el caso del As.....	170
Tabla 5.20	Resumen de las distribuciones de DEE por punto de exposición para niños y adultos obtenidas con el análisis de Monte Carlo para el N-NO ₃ ⁻ y % de excedencia a los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL)	172
Tabla 5.21	Resumen de las distribuciones de DEE por punto de exposición para niños y adultos obtenidas con el análisis de Monte Carlo para los F ⁻ y % de excedencia a los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL)	174
Tabla 5.22	Resumen de las distribuciones de DEE por punto de exposición para niños y adultos obtenidas con el análisis de Monte Carlo para el As y % de excedencia a los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL)	176
Tabla 5.23	Resumen de los valores de HQ para el N-NO ₃ ⁻ calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral en niños a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.....	177
Tabla 5.24	Resumen de los valores de HQ para los F ⁻ calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral en niños a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.....	178
Tabla 5.25	Resumen de los valores de HQ para el As calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral en niños y adultos a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.....	179
Tabla 5.26	Resumen de los valores de RIC para el As calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo cancerígeno por vía oral en niños y adultos a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.....	187
Tabla 5.27	Categorización del riesgo para cada punto de exposición al N-NO ₃ ⁻ identificado en los resultados de los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998 utilizando como criterio el riesgo potencial de que se produzca metahemoglobina infantil.....	188
Tabla 5.28	Categorización del riesgo por exposición al N-NO ₃ ⁻ identificado en la literatura utilizando como criterio el riesgo potencial de que se produzca metahemoglobina infantil PRONAI 318998.....	190
Tabla 5.29	Categorización del riesgo potencial en cada PE a F ⁻ identificado en los resultados de los trabajos realizados en el marco del PRONAI utilizando como criterio fluorosis dental en niños.....	190
Tabla 5.30	Categorización del riesgo potencial al F ⁻ identificado en la literatura.....	192
Tabla 5.31	Categorización del riesgo potencial por exposición al As identificado en los resultados de los trabajos realizados en el marco del PRONAI utilizando como criterio desarrollar cáncer.....	192

LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ATSDR	Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés
CC	Contaminantes Críticos
CONAHCYT	Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DEE	Dosis de Exposición Estimada
DOF	Diario Oficial de la Federación
EE. UU.	Estados Unidos de América
EMEG	Guía de Evaluación para Medios Ambientales, por sus siglas en inglés
ERS	Evaluación de Riesgo a la Salud Humana
HQ	Cociente de riesgo, por sus siglas en inglés
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer
IC 95%	Intervalo de Confianza del 95% de una distribución probabilística
IITCA	Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (instituto mexicano)
IRIS	Sistema Integrado de Información sobre Riesgos, por sus siglas en inglés
LOAEL	nivel mínimo de efecto adverso observable, por sus siglas en inglés
MCH	Modelo Conceptual Hidrogeológico
MCR	Modelo Conceptual del Riesgo
NOAEL	Nivel sin efecto adverso observable, por sus siglas en inglés
ODS 6	Objetivo de Desarrollo Sostenible no.6
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PRONAI	Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia
REA	Región de Emergencia Ambiental
REPDA	Registro Público de Derechos del Agua
RfD	Dosis de Referencia, por sus siglas en inglés
RIC	Riesgo Incremental de Cáncer
RIC/50	Riesgo Incremental de Cáncer cada 50 personas
RIC/100	Riesgo Incremental de Cáncer cada 100 personas
SF	Factor de pendiente, por sus siglas en inglés
SIG	Sistema de Información Geográfica
UAEMEX	Universidad Autónoma del Estado de México
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
US.EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés
VM	Valle del Mezquital
WHO	Organización Mundial de la Salud, por sus siglas en inglés
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso vital que desempeña un papel fundamental en la satisfacción de las necesidades hídricas de muchas poblaciones urbanas y rurales en todo el mundo. Puede actuar como reserva de agua en momentos de escasez, posibilitando la supervivencia incluso en los climas más secos. Los acuíferos también resultan ventajosos ya que, dependiendo de su profundidad y de su ubicación geológica, están relativamente protegidas frente a los posibles episodios de contaminación a nivel de superficie y el cambio climático. Sin embargo, una vez contaminados, puede resultar extremadamente difícil y costoso revertir el problema (WHO, 2023).

El acceso a agua subterránea segura y de calidad para el consumo humano es una preocupación constante, ya que amenazas como la contaminación y la sobreexplotación pueden poner en riesgo la salud pública y la sostenibilidad de este recurso. Más de 2 300 millones de personas viven en países con escasez de agua, situación que probablemente

empeorará en algunas regiones como resultado del cambio climático y el crecimiento de la población (WHO, 2023). Cada vez se utilizará más agua subterránea y de fuentes alternativas como son las aguas residuales para cumplir con la creciente necesidad del recurso hídrico (WHO, 2023).

Sin embargo, la gestión inadecuada de aguas residuales urbanas, industriales y agrícolas ha llevado a que cientos de millones de personas consuman agua contaminada con agentes biológicos o químicos (WHO, 2023). Aunado a la falta de saneamiento adecuado que contribuye a la propagación de enfermedades como el cólera, enfermedades diarreicas, disentería, hepatitis A, fiebre tifoidea y poliomielitis (WHO, 2023). Además, el suministro de agua para consumo humano, especialmente cuando proviene de fuentes subterráneas, puede estar contaminado con elementos químicos como As y F⁻ con consecuencias como el incremento de la mortalidad y morbilidad (WHO, 2022).

No obstante, la mayoría de estas enfermedades son prevenibles. Si se actúa sobre esos factores de riesgo se podría evitar la muerte de aproximadamente 395,000 niños menores de cinco años cada año (WHO, 2023). La WHO enfatiza la importancia de que se hagan esfuerzos para garantizar que el agua potable no represente ningún riesgo significativo a la salud a lo largo de toda la vida y se consideren las distintas etapas del crecimiento (WHO, 2018). Estos objetivos están directamente alineados con los objetivos del ODS 6 y el derecho a “disponer de forma continuada de cantidades suficientes de agua salubre, físicamente accesible, asequible y de una calidad aceptable para el uso personal y doméstico” (cita textual), reconocido por la Asamblea General de las Naciones Unidas en 2010.

En México, de conformidad con lo establecido en el Plan de Desarrollo 2019-2024, donde se evidencia el compromiso del gobierno con un desarrollo sostenible y se reconoce como un factor indispensable del bienestar social, se desarrolla el Proyecto Nacional de Investigación e Incidencia (PRONAI-318998) de los Programas Nacionales Estratégicos (ProNacEs) de agentes tóxicos y procesos contaminantes convocado y auspiciado por CONACHYT y el Gobierno de México. Este programa tiene el objetivo de incidir en la búsqueda de soluciones para enfrentar los daños tóxicos en la salud humana y los procesos contaminantes de origen natural y antropogénico en áreas consideradas como Región de Emergencia Ambiental (REA).

Es en este contexto donde se desarrolla la presente investigación que se enfoca en el acuífero de la REA Valle del Mezquital (VM), una fuente importante de agua para uso urbano, doméstico, agrícola e industrial en la región (CONAGUA, 2023). Recientemente, según publicaciones de los periódicos Excelsior e Infobae con fecha febrero del 2024, se ha declarado el interés de extraer también el agua del acuífero como alternativa a la crisis hídrica ZMVM. Dada su relevancia es imperativo comprender a profundidad su dinámica social-económica y características hidrogeológicas para su correcta gestión, considerando las fuentes de contaminación ya identificados por diversos autores y el riesgo que representan, como son las aguas residuales (Lesser et al., 2011; Jiménez & Chávez, 2004).

Las aguas residuales se enviaron por primera vez al VM en 1789 con el objetivo de aliviar las inundaciones en la capital a través del río Salado. Comenzaron a usarse para riego en la actividad agrícola en 1896 (Jiménez, 2014). Debido al evidente impacto económico surgido de esta práctica el gobierno decidió reconocerla oficialmente en 1920 (García-Salazar, 2019). Existen 575 km de canales primarios, 283 km de canales secundarios y miles de kilómetros de interconexiones en paquetes (García-Salazar, 2019). Actualmente, el sistema de riego engloba nueve presas, de las cuales seis almacenan aguas residuales. De las presas de aguas residuales hay que mencionar la presa Endhó, con una capacidad de 182 hm³ y la Requena 52.50 hm³ (CONAGUA, 2023).

Fue en 1975, cuando B.R Payne informó que el acuífero del VM estaba formado en un 90 a 100% por estas aguas residuales. En 1995 el British Geological Survey y CNA (hoy CONAGUA) (BGS-CNA, 1998) cuantificaron el fenómeno como mínimo, estimando un caudal de recarga de 2 194 560 m³/d (25,4 m³/s) para posteriormente darse cuenta de que más de 400.000 personas estaban haciendo uso de las aguas infiltradas como sustituto de agua potable. Se pusieron en marcha varios proyectos para evaluar la potabilidad del agua, para encontrar métodos adecuados de potabilización e incluso para buscar nuevos usos del suministro de agua. Uno de los resultados obtenidos fue la detección de la presencia de tóxicos químicos como NO₃⁻, As y F⁻ en el agua subterránea (Lesser *et al.*, 2011).

Debido a su importancia y la existencia de captaciones que sirven para el abastecimiento público, con el fin de evaluar el riesgo potencial que su consumo podría representar para la salud de la población, es especialmente importante conocer su funcionamiento

hidrodinámico e hidrogeoquímico. Esta evaluación no solo involucra la identificación de riesgos, sino también la formulación de estrategias de gestión y medidas de mitigación efectivas. Con esto en mente y con el propósito de cumplir con la urgencia de garantizar a la población presente y futura que hace empleo de estas aguas subterráneas, una fuente de agua segura, se desarrolla la presente investigación.

El área de estudio abarca los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula y Tula de Allende en el estado de Hidalgo, así como Apaxco en el estado de México. Estos municipios, que forman parte de la región conocida como el VM, albergan una población significativa, cuyos recursos hídricos y salud están en riesgo debido a la contaminación del acuífero con NO_3^- producto de la actividad agrícola, el empleo de las aguas residuales provenientes de Ciudad de México y el Estado de México para regar los cultivos y como consecuencia de canales no revestidos (Lesser *et al.*, 2011). A la par de una geología y flujos termale que aportan concentraciones elevadas de F^- y As a las aguas subterráneas (Informe PRONAI-318998, 2022).

A lo largo de esta investigación, se llevaron a cabo una serie de pasos clave que incluyeron la construcción de una base de datos integral, la interpretación del funcionamiento hidrodinámico e hidrogeoquímico del acuífero, y la aplicación de metodologías reconocidas, como la propuesta por la US.EPA, para evaluar los riesgos a la salud humana. Estos esfuerzos buscan contribuir al conocimiento científico y al desarrollo de estrategias concretas que promuevan el uso responsable y seguro de las aguas subterráneas. Así como, proporcionar una base científica sólida para la toma de decisiones y la planificación de políticas que beneficien tanto a las comunidades actuales como a las generaciones futuras.

1.2 Justificación contextual y científica

La importancia de preservar la calidad de los recursos hídricos subterráneos y la salud humana tanto en el mundo como en México es innegable. El agua subterránea desempeña un papel vital en la provisión segura y económica de agua tanto en entornos urbanos como rurales. Sin embargo, una gestión inadecuada puede acarrear graves efectos en la salud humana y los ecosistemas. En este contexto, las investigaciones científicas enfocadas en la evaluación y prevención de riesgos a la salud humana han presentado un notable incremento en la última década como resultado de la creciente contaminación producto al actual

desarrollo poblacional, industrial y agrícola.

El acuífero del VM en México constituye un ejemplo del escenario anterior. La necesidad de alcanzar su gestión eficiente resulta imperativa dada la importancia de sus recursos hídricos subterráneos. En el año 2023 contaba con una concesión de extracción de agua de 436 hm³/año, según datos publicados el 31 de diciembre del 2024 por CONAGUA. Según esta misma información se tiene que su mayor empleo está en la agricultura, seguido del uso público urbano, doméstico e industrial. Solamente estas actividades representan el 71.6% de los títulos otorgados. Para el año en curso, como parte de la estrategia hídrica se plantea su uso para abordar la crisis en la ZMVM (Excelsior, 2024 & Infobae, 2024).

En la región existe todo un sistema de riego empleado en la agricultura a partir de las aguas residuales. Se estima que el 52% de los canales laterales y un 81% de los canales principales no están revestidos (Lesser *et al.*, 2011), ocasionando la recarga directa del acuífero con aguas residuales no tratadas. A esta recarga hay que sumar el volumen que se infiltra por retorno de riego. Además, existen múltiples industrias, amplios terrenos dedicados a la actividad agrícola y evidencia de concentraciones de As, F⁻ y otros contaminantes superiores a lo establecido en la norma mexicana de uso y consumo de agua potable (Lesser *et al.*, 2011).

Sin embargo, Jiménez & Chávez (2004) concluyen en su estudio que los suelos del VM tienen la capacidad para tratar el agua residual y pueden contribuir a obtener una calidad aceptable del agua para consumo. Los mismos autores, en 2014 y 2015 indicaron que sería posible utilizar el agua subterránea de la región, con el tratamiento adecuado, para abastecer a la Ciudad de México. Contrario a esto, Lesser *et al.* (2011), indicaron la presencia de contaminación bacteriológica e inorgánica en captaciones de agua subterránea. También midieron concentraciones por encima de la NOM-127-19994 de Na⁺, F⁻, Pb y SDT y se detectó As, PO₄³⁻ y B.

Respecto a la evaluación del riesgo a la salud producto a los contaminantes químicos que se conocen en el agua subterránea, Vega *et al.* (2022) desarrollan la primera investigación con el objetivo de evaluar el riesgo para la salud que representan. Se centraron en el número de personas en la Ciudad de Tula expuestas a las altas concentraciones de As y F⁻. Determinaron que si existe un riesgo producto de la exposición a estos contaminantes por vía oral. Hay que señalar que, los estudios de riesgos a la salud antecedentes por exposición a contaminantes

químicos en las aguas subterráneas son escasos y enfocados a una parte pequeña de la población.

Este acuífero, crucial para el abastecimiento de agua en la región, presenta múltiples focos contaminantes que podrían comprometer su calidad y disponibilidad a largo plazo. Además, existe en la literatura un debate acerca de sus características y el potencial riesgo a la salud humana que representa; así como la escasez de estudios exhaustivos sobre el tema. Ello ha derivado en la necesidad de evaluar el riesgo potencial que conlleva el consumo de las aguas subterráneas provenientes del acuífero VM para la salud humana.

Es en este marco donde se justifica llevar a cabo la presente investigación que plantea un análisis integrado de las características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas. El análisis de sus características hidrodinámicas proporcionará una comprensión de la dinámica de flujo y recarga del acuífero. Del mismo modo, el estudio de sus características hidrogeoquímicas permitirá identificar posibles contaminantes y determinar su origen. El análisis integral de sus características permitirá el desarrollo de un Modelo Hidrogeológico Conceptual que servirá como base para futuras investigaciones y medidas de gestión efectivas.

La aplicación de la metodología de la US.EPA para la evaluación del riesgo potencial a la salud humana ofrecerá un marco científico sólido y reconocido internacionalmente. Los resultados de este análisis permitirán proponer medidas de gestión y mitigación específicas, orientadas a salvaguardar la salud pública y a preservar la sostenibilidad a largo plazo del acuífero VM. Este enfoque proporcionará un modelo que facilite la identificación de potenciales riesgos a la salud humana asociados con su consumo.

Esta investigación realizada en el marco del PRONAI 318998, llenará un vacío de conocimiento en la comprensión de la dinámica del acuífero con información valiosa para la toma de decisiones informadas en materia de gestión y preservación de este recurso vital y del riesgo potencial a la salud humana. La combinación de análisis hidrodinámicos, hidrogeoquímicos y de evaluación de riesgos permitirá una aproximación integral para abordar los desafíos actuales y futuros relacionados con el uso sostenible del agua subterránea de la región.

1.3 Hipótesis

La hipótesis planteada es que al realizar un análisis completo de las características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas del acuífero VM, será factible evaluar el riesgo potencial para la salud humana derivado del consumo de las aguas subterráneas provenientes de este. Además, se espera que este análisis permita proponer medidas de gestión y mitigación adecuadas para preservar la salud pública en la región.

1.4 Objetivos

Objetivo general

Evaluar el riesgo potencial a la salud humana que representa el consumo de las aguas subterráneas del acuífero VM mediante el análisis integrado de sus características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas para proponer medidas de gestión/mitigación.

Objetivos específicos

A partir del objetivo general se definen como objetivos específicos:

- i. Confeccionar la base de datos necesaria para el desarrollo de la investigación mediante el análisis de la información existente y la obtenida durante el trabajo de campo.
- ii. Establecer el funcionamiento hidrodinámico del acuífero mediante la interpretación y procesamiento de la información obtenida durante el desarrollo de la investigación, lo que permitirá disponer de un modelo preliminar del funcionamiento hidrogeológico.
- iii. Establecer el funcionamiento hidrogeoquímico del acuífero mediante la interpretación y procesamiento de la información, lo que permitirá disponer de un modelo definitivo del funcionamiento hidrogeológico.
- iv. Evaluar el riesgo potencial a la salud humana por consumo de aguas subterráneas, mediante la aplicación de la metodología de la US.EPA, lo que permitirá ofrecer las recomendaciones pertinentes para su gestión/mitigación.
- v. Evaluar la incertidumbre y variabilidad en los datos y métodos empleados en el proceso de evaluación del riesgo lo que permitirá una mejor aproximación al riesgo real.

- vi. Confeccionar el Modelo Conceptual del Riesgo en forma esquemática.
- vii. Proponer medidas de gestión y/o mitigación del riesgo a la salud humana.

1.5 Organización de la tesis

El objetivo del Capítulo 1 es proporcionar al lector una visión general y panorámica de las condiciones en las que se encuentra la zona de estudio, así como destacar la problemática a abordar y la metodología propuesta para resolver dicho problema.

Posterior a este Capítulo introductorio, en el Capítulo 2 se incluye una descripción detallada de la localización y características generales del área de estudio, así como de las características geológicas e hidrogeológicas, que posteriormente serán la base para la comprensión del modelo conceptual hidrogeológico del acuífero.

El Capítulo 3 muestra los antecedentes de la zona de estudio, consta de una revisión del estado del arte, el marco teórico y el marco conceptual necesarios para situar la investigación en el contexto internacional y nacional, así como para la correcta interpretación de sus fundamentos científicos.

El Capítulo 4 describe el proceso metodológico empleado para dar cumplimiento a los objetivos propuestos. Se describe elementos de la hidrodinámica y la hidrogeoquímica del acuífero que se tomaron en cuenta para mejorar la comprensión del Modelo Conceptual Hidrogeológico. Posteriormente, se presenta las metodologías empleadas para la evaluación del riesgo a la salud por la exposición a los contaminantes químicos en el agua subterránea. Finalmente se integran los resultados obtenidos en la propuesta de un Modelo Conceptual de Riesgo y una Cartografía de Riesgo para dar cumplimiento al objetivo de su gestión/mitigación.

Los resultados y discusión que se presentan en el Capítulo 5 se agrupan en los mismos ejes temáticos descritos en el Capítulo 4.

En el Capítulo 6 se plantean las conclusiones y recomendaciones de la investigación realizada.

Capítulo 2

CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se realiza una descripción de las características geográficas, climáticas, geomorfológicas, geológicas, hidrológicas, hidrogeológicas, demográficas y de uso de suelos de la región que corresponde al acuífero del VM y de los municipios de Apaxco, Atitalaquia, Tula de Allende y Atotonilco de Tula que conforman el área de estudio.

El capítulo proporciona una visión panorámica del acuífero, lo cual es necesario para evitar limitaciones en el análisis del funcionamiento hidrogeológico e hidrogeoquímico. Además, esta contextualización enriquece la comprensión del entorno físico y humano en el que se desarrolla la investigación. Así, se establecen las condiciones locales que pueden influir en la calidad del agua subterránea y en la exposición de la población a contaminantes. Por lo tanto, esta caracterización sienta las bases para una comprensión más completa de los factores que inciden en la calidad del agua subterránea y su impacto en la salud humana.

2.1 Ubicación geográfica de la región y el área de estudio

El estudio se realizó en los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula y Tula de Allende del estado de Hidalgo y Apaxco del Estado de México. Estos municipios forman parte de la región conocida como el VM, que se ubica en la porción centro-sur del estado de Hidalgo y en el límite con el Estado de México y Querétaro. Geográficamente, la región se encuentra entre los paralelos 19°30' y 20°22' de latitud norte y entre los meridianos 98°56' y 99°37' de longitud oeste.

Apaxco es un municipio ubicado al norte del VM, limita al norte con Villa del Carbón y al sur con Tula de Allende. Atitalaquia es un municipio localizado al oeste del Valle del Mezquital y colinda con los municipios de Tlaxcoapan, Tula de Allende y Tepetitlán. Atotonilco de Tula se encuentra al sur del Valle del Mezquital, y limita al norte con Tula de Allende, al sur con Ixmiquilpan y al este con Tepeji del Río (Fig. 2.1).

Tula de Allende es uno de los municipios más importantes de la región debido a que se encuentra ubicado en el centro del VM, lo que brinda una posición privilegiada para el acceso a importantes rutas y vías de comunicación hacia otros municipios y ciudades cercanas, en combinación con su rica historia, su infraestructura desarrollada, su actividad agrícola y ganadera, así como su importante sector industrial. Respecto a su historia, es famosa por albergar la Zona Arqueológica de Tula, que fuese la capital de la antigua civilización Tolteca. Limita al norte con Atotonilco de Tula, al sur con Tlaxcoapan y al este con Tepeji del Río (Fig. 2.1).

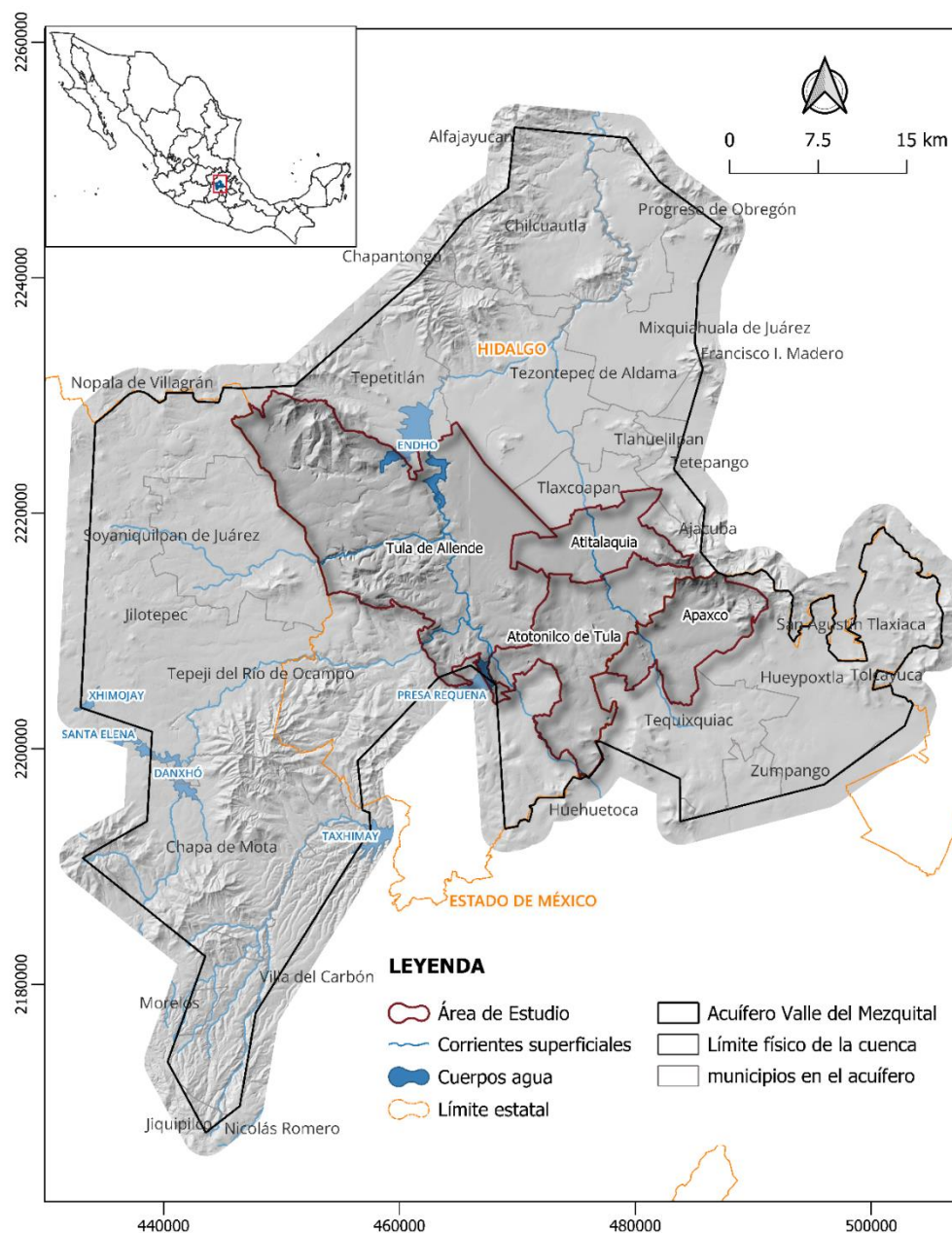


Figura.2.1 Mapa de localización del acuífero del Valle del Mezquital (VM) y los municipios del área de estudio.

2.2 Características climáticas de la región y el área de estudio.

Según los datos de TerraClimate (2020), la región del VM se caracteriza por tener un clima semiárido a árido, con una temperatura media anual aproximadamente de 15.4°C. La figura 2.2 muestra que las temperaturas más bajas, alrededor de 8.8°C, se encuentran en la región

suroeste del acuífero, en la frontera entre Hidalgo y el Estado de México, mientras que las temperaturas más altas, alrededor de 20°C, prevalecen al norte del acuífero.

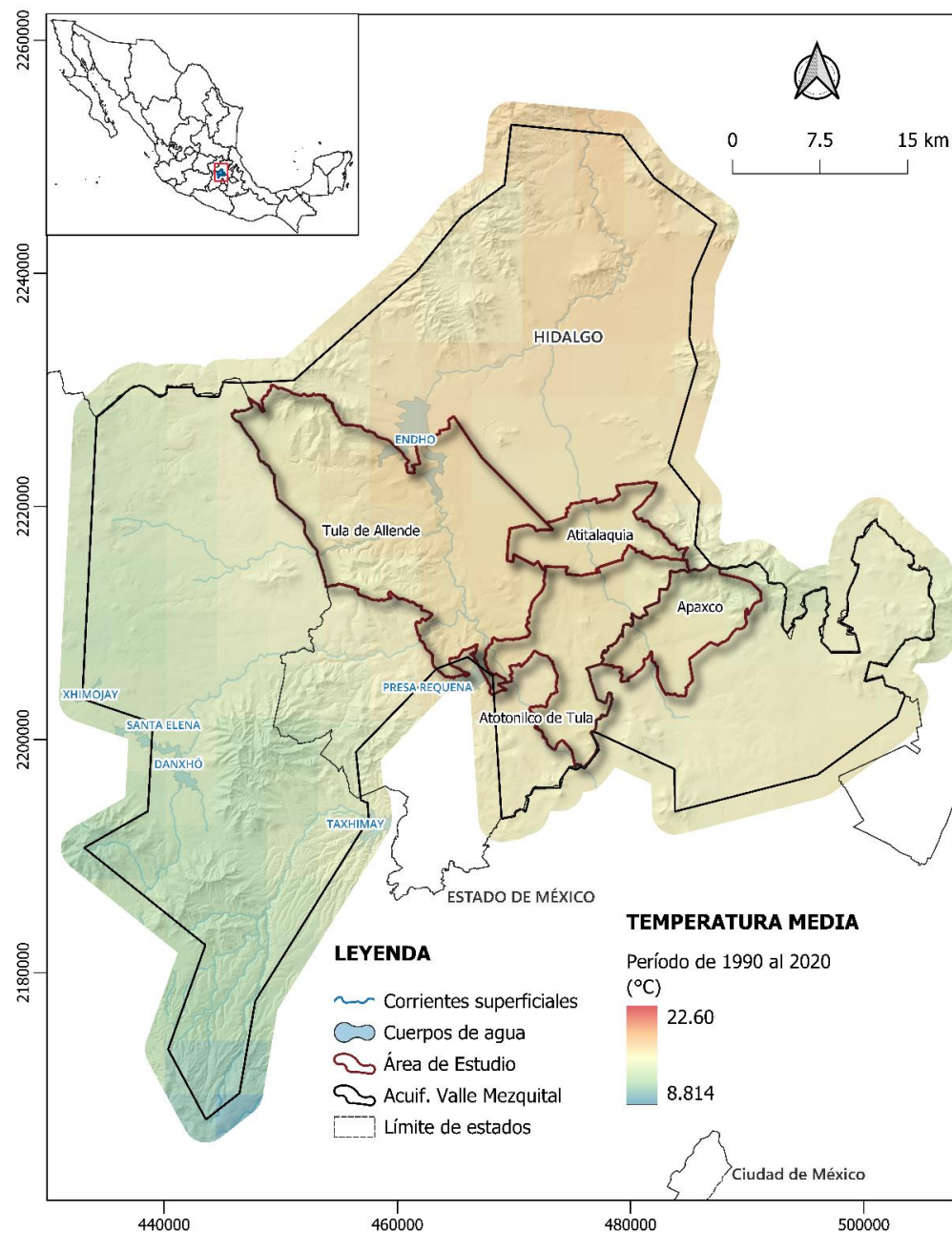


Figura.2.2 Mapa de distribución de la temperatura promedio anual en el VM y los municipios del área de estudio (confeccionado con datos de Terraclimate, 2020).

En cuanto a la precipitación, que se concentra entre junio y septiembre, la zona norte del área de estudio recibe alrededor de 354 mm de lluvia al año, mientras que, en la región sur, en el límite entre Hidalgo y el Estado de México, las precipitaciones son considerablemente más altas, alcanzando los 1,535 mm anuales (Fig. 2.3). La evapotranspiración real en la región es de aproximadamente 477 mm al año (CONAGUA, 2024).

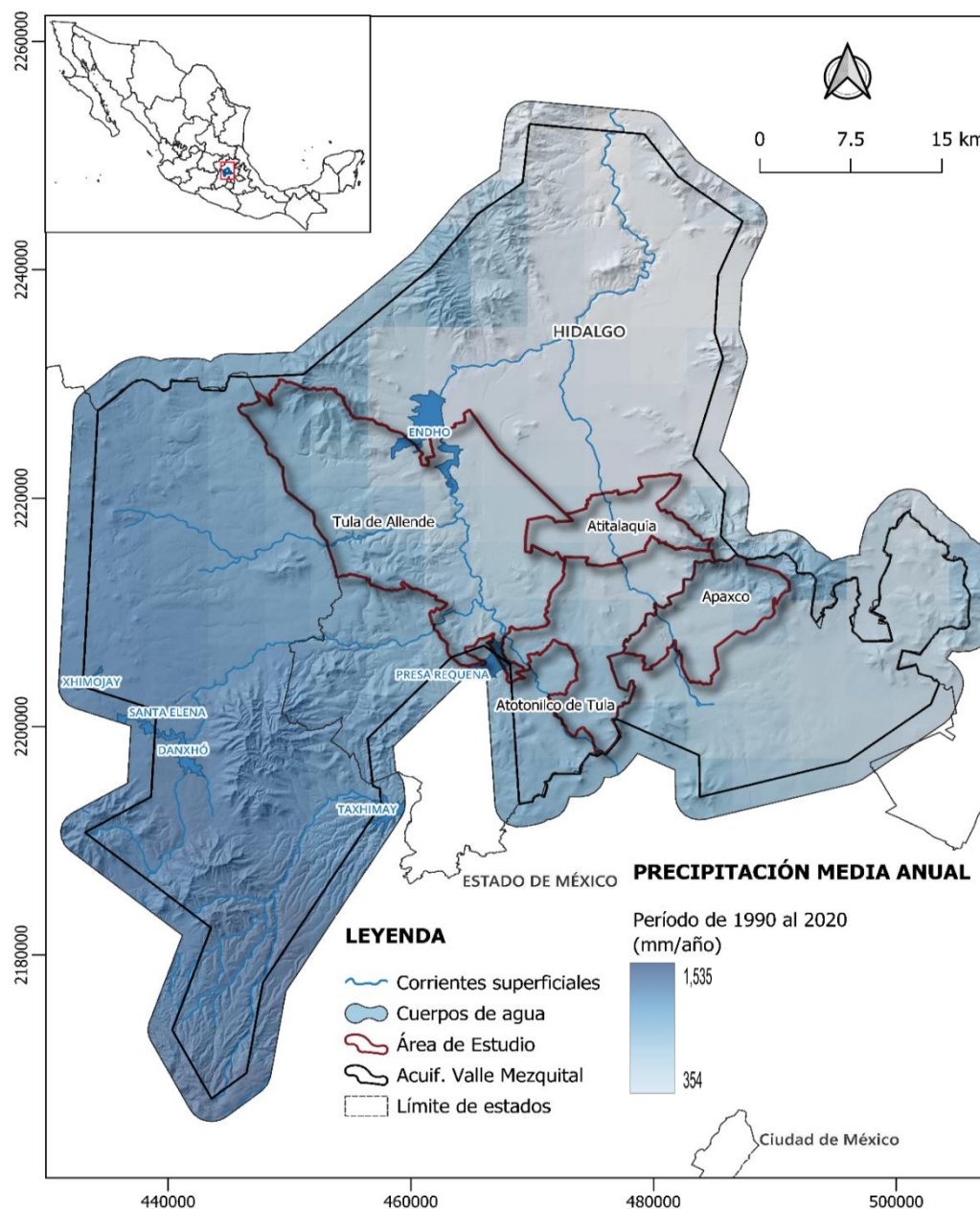


Figura.2.3 Mapa de distribución de la precipitación promedio anual en el VM y los municipios del área de estudio (confeccionado con datos de Terraclimate, 2020).

En la tabla 2.1 se ofrece un resumen de las características climatológicas acotadas al área de estudio, que corresponde a los municipios de Apaxco, Atitalaquia, Atotonilco de Tula y Tula de Allende. Estos datos se obtuvieron de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con fecha de actualización del 2020.

Tabla 2.1. Resumen de las características climatológicas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.

Características Climatológicas	MUNICIPIOS			
	Apaxco	Atitalaquia	Tula de Allende	Atotonilco de Tula
Temperatura	12-18 °C	14 - 18 °C	14 – 18°C	12 – 18 °C
Precipitación	500-700 mm	400 - 700 mm	500 – 800 mm	500 – 700 mm
Tipo de clima	Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (75.44%) y seco con lluvias en verano, semiseco (24.56%).	Semiseco templado (100.00%)	Templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (51.28%), semiseco templado (48.15%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (0.57%).	Semiseco templado (74.68%), templado subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (25.32%)

2.3 Características geomorfológicas de la región y el área de estudio

El acuífero del Valle del Mezquital se ubica en la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, caracterizada por su topografía de planicies construccionales escalonadas y valles fluviales, aluviales y lacustres poco disectados. La zona del acuífero presenta una ligera pendiente hacia el norte, con una elevación promedio de aproximadamente 1,900 metros sobre el nivel del mar. Se distinguen dos subprovincias: Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo al norte y oeste, y Lagos y Volcanes de Anáhuac al sursureste. La geomorfología incluye el valle, sierras volcánicas y sierras calcáreas, con sistemas de drenaje variados y elevaciones que oscilan desde los 2,000 hasta los 3,000 metros sobre el nivel del mar.

La geomorfología del VM es resultado de la combinación de la actividad tectónica, la erosión y la sedimentación fluvial, así como las condiciones climáticas áridas de la región. Esta combinación ha configurado un paisaje montañoso con llanuras aluviales y suelos poco desarrollados, característicos de las zonas semidesérticas (Moure & Palacio, 1977).

En la tabla 2.2 se presenta un resumen de las características geomorfológicas acotadas al área de estudio referente a la provincia y subprovincia fisiográfica y el sistema de topoformas correspondiente. Estos datos se obtuvieron de la página del Instituto Nacional de Estadística y Geografía con fecha de actualización del 2020.

Tabla 2.2. Resumen de las características geomorfológicas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.

Características Geomorfológicas	MUNICIPIOS			
	Apaxco	Atitalaquia	Tula de Allende	Atotonilco de Tula
Provincia fisiográfica	Eje Neovolcánico (100%)	Eje Neovolcánico (100.00%)	Eje Neovolcánico (100.0%)	Eje Neovolcánico (100.00%)
Subprovincia fisiográfica	Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (51.03%), Lagos y Volcanes de Anáhuac (48.97%)	Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (100.00%)	Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (88.61%) y Lagos y volcanes de Anáhuac (11.39%)	Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (56.90%) y Lagos y Volcanes de Anáhuac (43.10%)
Sistemas de topografías	Sierra volcánica de laderas tendidas (33.62%), Lomerío de tobas (19.14%), Valle de laderas tendidas (17.68%), Lomerío de basalto (16.81%), Lomerío de tobas (12.15%) y Sierra volcánica de ladera tendidas con lomerío (0.60%)	Lomerío (42.09%), Sierra (39.78%) y Llanura (18.13%)	Lomerío (52.10%), Sierra (19.60%), Escudo volcanes (11.70%), Llanura (16.60%)	Lomerío (90.52%) y Sierra (9.48%)

2.4 Características geológicas de la región y el área de estudio

Predominantemente, en la mayor parte del área del acuífero VM, se encuentran rocas volcánicas de las épocas geológicas del Terciario y Cuaternario, las cuales recubren extensas áreas y ocultan las rocas sedimentarias plegadas del Cretácico, las cuales son menos extensas en superficie. Además, en las zonas más bajas de los valles, estos depósitos volcánicos subyacen a los sedimentos aluviales de origen continental del Cuaternario (Fig. 2.4).

Las formaciones geológicas identificadas son (CONAGUA, 2024):

- Cretácico Superior: La Formación El Doctor, que son calizas de ambiente de banco arrecifal de edad Albiano Medio-Cenomaniano Temprano, y la Formación Mexcala, que consta de capas de limolita, lutita, marga y arenisca.
- Terciario: Incluye el Grupo El Morro, formado por sedimentos continentales, y el Grupo Pachuca, que consta de rocas ígneas volcánicas con ocho formaciones diferentes.
- Cuaternario: Derrames de lava y conos cineríticos de rocas volcánicas máficas del Pleistoceno, así como depósitos aluviales y fluviales de arena, arcilla y grava que se acumularon en el lecho y las márgenes de ríos y arroyos.

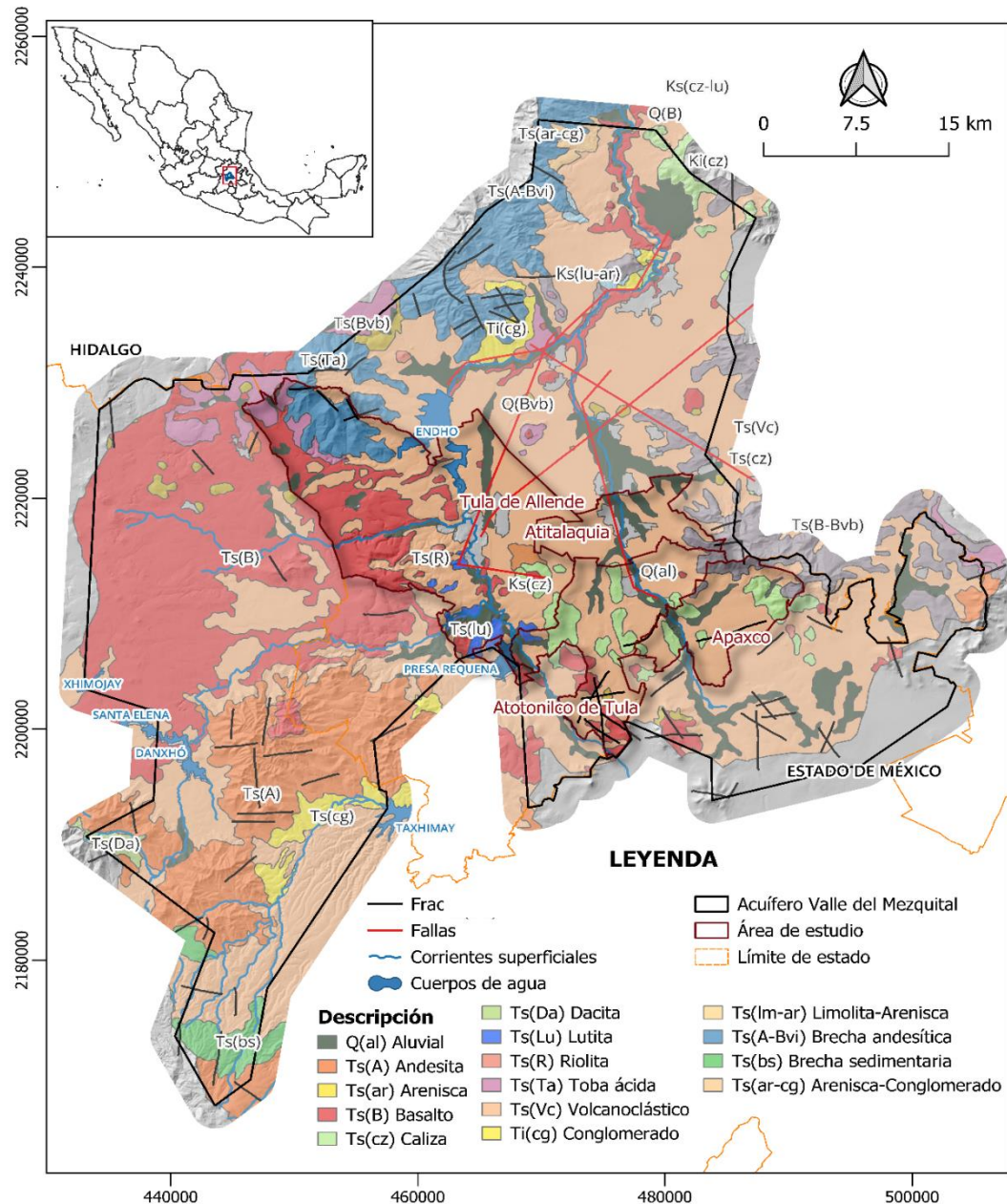


Figura.2.4 Mapa geológico del VM y los municipios del área de estudio (confeccionado con datos del Servicio Geológico Mexicano, 2012)

En la tabla 2.3 se ofrece un resumen de las características geológicas para el área de estudio referente a la información litológica y la edad geológica. Estos datos se obtuvieron de la página de INEGI con fecha de actualización del 2020.

Tabla 2.3. Resumen de las características geológicas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.

Características Geológicas	MUNICIPIOS			
	Apaxco	Atitalaquia	Tula de Allende	Atotonilco de Tula
Litología característica	Ígnea extrusiva: volcanoclástico (58.96%) y basalto-brecha volcánica básica (8.31%) Sedimentaria: caliza (17.78%) Suelo: aluvial (5.99%)	Ígnea extrusiva: volcanoclástico (62.66%) y basalto brecha volcánica básica (5.67%) Sedimentaria: caliza-limolita (0.09%) Suelo: aluvial (11.35%) Cuaternario (11.35%)	Ígnea extrusiva: Volcanoclástico (38.78%), basalto (24.18%), andesita brecha volcánica intermedia (9.03%), toba ácida (3.18%) y riolita (0.98%) Sedimentaria: Caliza (2.45%), lutita (2.28%) y caliza-limolita (0.99%) Suelo: aluvial (4.97%)	Ígnea extrusiva: volcanoclástica (53.93%), basalto (7.86%) y basalto-brecha volcánica básica (2.99%) Sedimentaria: caliza (14.01%) y lutita (0.73%) Suelo: aluvial (4.60%)
Edad geológica	Neógeno (67.26%), Cretácico (17.78%) y Cuaternario (6%)	Neógeno (68.42%) y Cuaternario (11.35%)	Neógeno (78.46%), Cuaternario (5.93%) y Cretácico (2.45%)	Neógeno (64.60%), Cretácico (13.66%) y Cuaternario (5.86%)

Nota: los % faltantes corresponden a zonas urbanas (Apaxco:8.96%; Atitalaquia: 20.23%; Atotonilco de Tula: 15.88% y Tula de Allende: 1.81%).

2.5 Hidrología superficial de la región y el área de estudio.

El acuífero VM se encuentra en la Región Hidrológica 26 Pánuco y forma parte de la Cuenca del Río Moctezuma. La mayor parte del escurrimiento superficial fluye desde la zona suroeste, siendo el Río Tula su corriente principal, que finalmente desemboca en la Presa Endhó. Otros ríos significativos son El Salado, El Salto, Rosas y San Jerónimo, junto con numerosos arroyos que conforman la red hidrográfica.

Dentro del territorio del acuífero se ubican el Distrito de Riego 003 Tula, el Distrito de Riego 100 Alfajayucan y una pequeña porción del Distrito de Riego 112 Ajacuba, en el Estado de Hidalgo, así como el Distrito de Riego 044 Jilotepec, en el Estado de México. La infraestructura hidráulica incluye canales de agua superficial en los distritos de riego, acueductos y presas como Endhó, Requena (en los límites con el acuífero Tepeji del Río) y Santa Elena (en los límites con el acuífero Polotitlán, del Estado de México).

El Río Tula es el cauce principal que nace como Río Tepeji entre las presas Taxhimay y Requena, y a lo largo de su recorrido recibe aportaciones de ríos como el Oro, Sabinos y San Jerónimo. Más adelante, después de la Presa Requena, el Río Tula desemboca en la Presa

Endhó. Aguas abajo de la Presa Requena, se incorporan las aguas residuales provenientes de la Ciudad de México y el Río El Salto, que es una continuación del Tajo de Nochistongo, estimado a gestionar las aguas residuales del sector poniente de la Ciudad de México (Fig. 2.5).

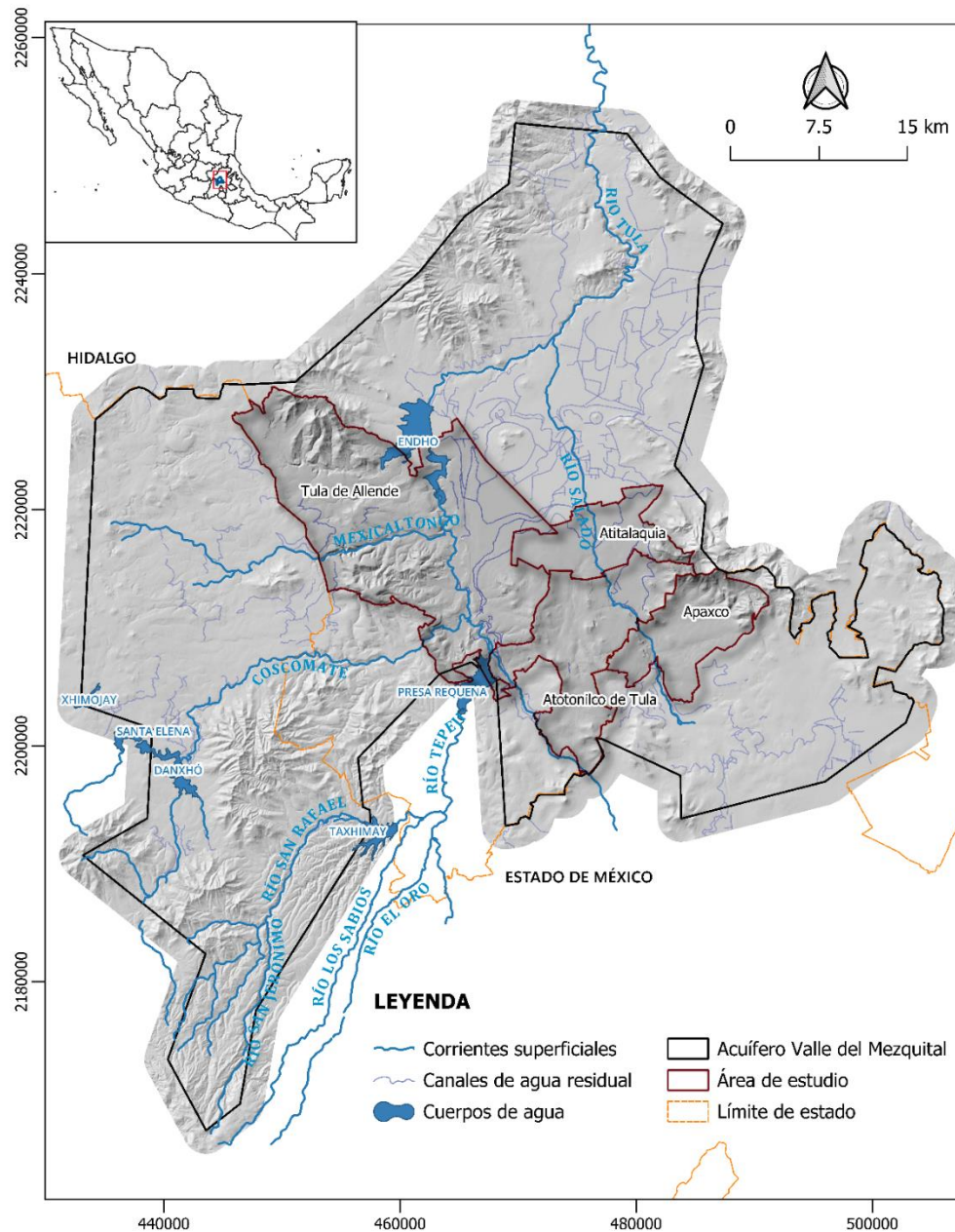


Figura.2.5 Mapa hidrográfico del VM y municipios del área de estudio (confeccionado con datos de INEGI, 2021)

Los ríos Salado y Tula (que en sus orígenes se conoce como Río Tepeji) y la red de canales que forman parte de la infraestructura del distrito de riego, presentan una fuerte carga contaminante debido a los grandes volúmenes de residuos que son descargados sobre ellos. Estos cursos representan un peligro considerable de contaminación del agua subterránea en dependencia de si presenta un comportamiento de pérdida (influyente).

Las características hidrográficas acotadas al área de estudio referente a la región hidrológica a la que pertenecen, la cuenca, la subcuenca y las corrientes de agua se exponen en la tabla 2.4. Estos datos se obtuvieron del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010).

Tabla 2.4. Resumen de las características hidrográficas de los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información geográfica del 2020 de INEGI.

Características Hidrográficas	MUNICIPIOS			
	Apaxco	Atitalaquia	Tula de Allende	Atotonilco de Tula
Región hidrológica	Pánuco (100%)	Pánuco (100%)	Pánuco (100%)	Pánuco (100%)
Cuenca	R. Moctezuma (100%)	R. Moctezuma (100%)	R. Moctezuma (100%)	R. Moctezuma (100%)
Subcuenca	R. Salado (99.95%) y R. Tula (0.05%)	R. Salado (82.33%) y R. Tula (17.67%)	R. Tula (71.92%), R. Rosas (16.18%), R. Tlautla (6.01%) y R. El Salto (5.80%), R. Salado (0.09%)	R. Salado (65.21%), R. El Salto (34.39%), R. Tula (0.31%) y R. Cuatitlán (0.09%)
Corrientes de agua	Perenne: Salado Intermitentes: El Codo, Treviño, Zarco y Teñía	Perennes: Salado	Perennes: Coscomate, Rosas, Tepeji y Tula Intermitentes: Ahuizote, El Sauz, La Bruja, Los Órganos y Tecolote.	Perennes: Cuatitlán, Salado y Tula Intermitentes: Treviño

2.6 Características hidrogeológicas

El acuífero VM, clave 1310, se identifica como un acuífero libre a semiconfinado, heterogéneo y anisótropo. La parte superior se compone de un medio granular que abarca sedimentos aluviales, rocas volcánicas y materiales piroclásticos, todos con una permeabilidad media y un espesor promedio de 400 metros. La porción inferior del acuífero está formada por rocas volcánicas que tienen una permeabilidad secundaria debido a la presencia de fracturas. Las rocas volcánicas también actúan como fronteras y barreras al flujo subterráneo, aunque estas características desaparecen a mayor profundidad, donde se encuentran secuencias de lutitas, limolitas y areniscas que forman las formaciones Mexcala y Soyatal. Aún más profundo, las rocas calizas cretácicas pueden albergar un acuífero

confinado por sedimentos lacustres y rocas arcillosas.

En el área existen numerosos manantiales fríos y termales que tienen su origen en los sistemas de fracturas y fisuras presentes en la región, así como en procesos geotérmicos (Informe PRONAI-318998, 2022). Se detecta una capa superficial de basaltos con espesores que oscilan entre 10 y 60 metros, aproximadamente. Esta capa de basaltos es de gran importancia desde una perspectiva geohidrológica debido a su alta permeabilidad. En la parte occidental del VM, se ha identificado otra capa de basaltos a mayor profundidad, con espesores de 90 a 120 metros. Los basaltos encajonan materiales granulares, sedimentos lacustres y tobas de la Formación Tarango, con espesores de 300 a 600 metros (Informe PRONAI-318998, 2022).

La mayor infiltración ocurre en la porción montañosa alcanzando hasta 251 mm/año siendo esta zona en donde acontece la mayor precipitación, disminuyendo hacia la planicie donde alcanza los 63 mm/año. En cuanto a los niveles de agua subterránea, para el año 2007, la profundidad del nivel de saturación o nivel estático varió entre 10 y 100 metros, aumentando a medida que se asciende topográficamente desde el valle hacia las estribaciones de las sierras que rodean el acuífero.

Las profundidades más someras se encuentran en la zona de la Presa Endhó, al sur, y en la superficie del valle, asociadas a canales de riego y recarga inducida por aguas residuales. A medida que se asciende hacia las laderas de las montañas que rodean el valle, la profundidad del nivel estático aumenta y varía entre 60 y 100 metros en áreas como El Progreso, Xochitlán y Mixquiahuala. Hacia el sureste de Mixquiahuala, la profundidad se encuentra entre 70 y 100 metros, y al este del valle, entre Munitepec y la entrada al Valle de Ajacuba, la profundidad varía de 50 a 80 metros. En la parte sur del valle, cerca de Atitalaquia y sobre los flancos del Río Salado, el nivel de agua subterránea se encuentra a 50 metros de profundidad (Informe PRONAI-318998, 2022).

La elevación del nivel estático con respecto al nivel del mar varía en la región, desde 1,920 metros sobre el nivel del mar en la zona norte hasta 2,200 metros sobre el nivel del mar en la parte sureste del acuífero (Figura 2.6). Estas diferencias de elevación siguen la topografía del terreno, y reflejan una dirección predominante del flujo subterráneo de sur a norte, con

influencias de los flancos este y oeste (Lesser et al., 2012).

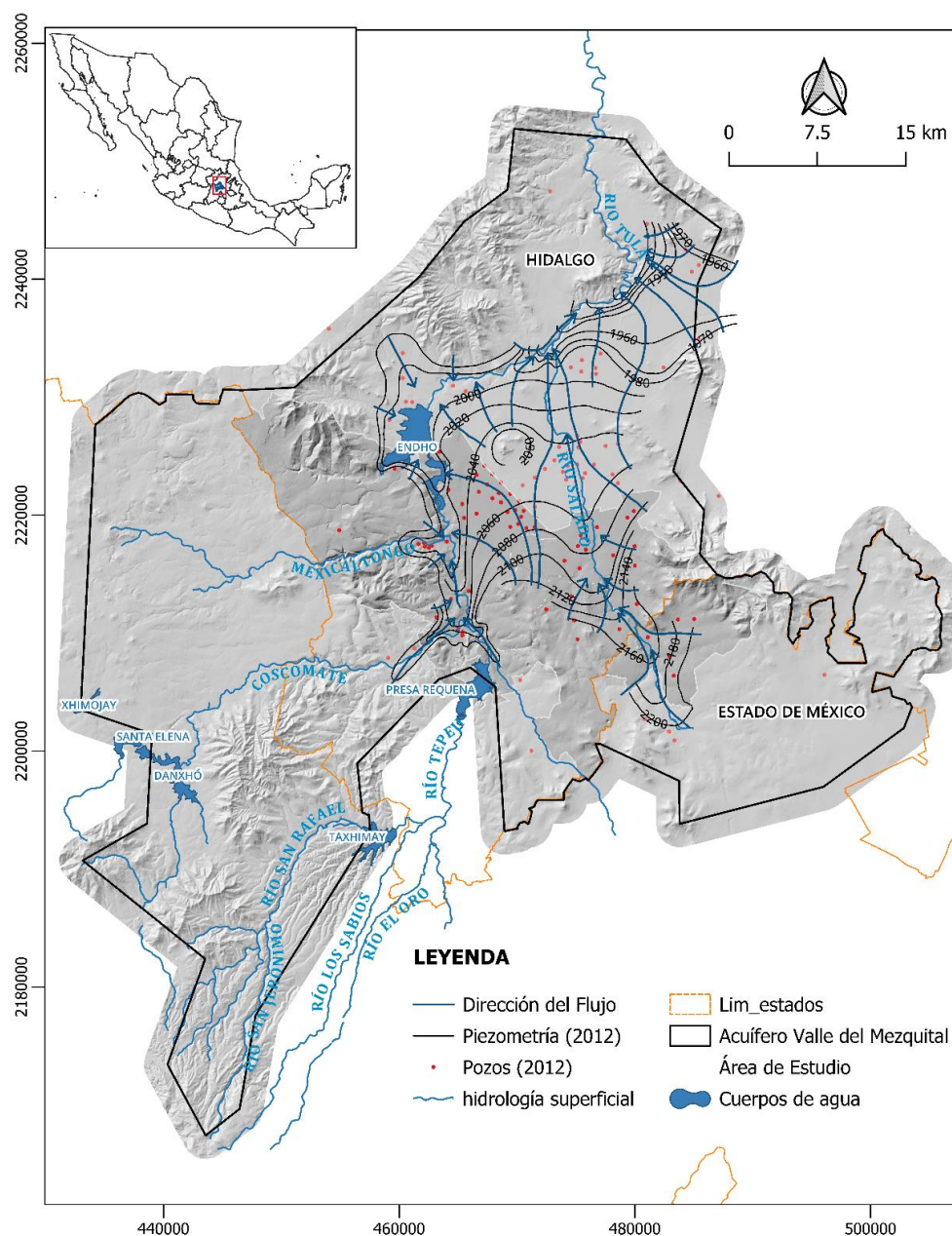


Figura.2.6 Mapa piezométrico del VM y los municipios del área de estudio (confeccionado con datos de CONAGUA, 2024).

La evolución del nivel estático entre 2007 y 2012 no muestra cambios significativos que indiquen la formación de conos de abatimiento debido a la extracción, ya que se registraron abatimientos de alrededor de 1 a 2 metros y recuperaciones de 1 a 3 metros, con un promedio de recuperación de alrededor de 0.05 metros por año en la mayoría de la región del acuífero.

Esto se debe en parte a la recarga inducida que mantiene los niveles constantes, y cualquier exceso se descarga a través de los drenes de los distritos de riego (Lesser et al., 2012).

En cuanto a la extracción de agua subterránea, existen 460 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 258 son pozos, 109 norias y 93 manantiales. De estos aprovechamientos, 321 están activos y 139 inactivos. Los usos más comunes son el público urbano, doméstico, industrial y agrícola. La extracción total de agua subterránea en el acuífero es de 137.7 millones de metros cúbicos anuales (CONAGUA, 2020).

2.7 Uso de suelos y recursos naturales en la región y el área de estudio

Según datos del INEGI, el área del acuífero VM está compuesta por 54 áreas urbanas y 402 localidades rurales. Recibe aguas residuales de la Ciudad de México para su uso en la agricultura, lo que ha impulsado el crecimiento de esta actividad a pesar de la aridez y la escasez de agua superficial. Esto ha llevado a la región de ser una de las más empobrecidas a convertirse en la principal productora de alimentos en el estado de Hidalgo.

Los cultivos incluyen alfalfa, avena, maíz, frijoles, trigo, chiles y tomates verdes, y donde se usan aguas limpias o grises para el riego, se cultivan lechugas, coles, brócoli, coliflores, habas, chiles poblanos, chilacas, chiles de árbol, jitomates, cilantro, perejil, cebolla, espinacas, acelgas, romeritos, yerbabuena, camotes, rábanos, pápalo, apio, poro, mejorana y tomillo. Se cría ganado bovino, porcino, ovino, caprino, gallinas y guajolotes. También se produce leche de bovino, huevos y miel. Tanto la agricultura como la ganadería son una fuente de contaminación difusa debido a la presencia de nutrientes y pesticidas, las cuales ejercen una fuerte influencia en la recarga del acuífero. Esto se agrava aún más en áreas donde prevalecen los extensos monocultivos.

La agricultura de riego tiene un impacto significativo debido a la liberación de contaminantes al subsuelo (fig. 2.7). Un aspecto crítico que considerar, especialmente en regiones áridas y semiáridas como es el área de estudio, es el riego agrícola con aguas residuales. Estas a menudo contienen cantidades excesivas de nutrientes y sales que, a su vez, favorecen el proceso de lixiviación y contribuyen a la contaminación del acuífero. Por otro lado, la agricultura de temporal genera una carga menor, ya que depende principalmente de las lluvias estacionales y, por lo tanto, no saturan los suelos durante largos períodos.

Otro tipo de uso de suelo relevante es el urbano (fig. 2.7), que ha experimentado un rápido crecimiento debido a las actividades industriales en la zona. Este crecimiento ha llevado a una mayor expansión de zonas de construcción, lo que no solo modifica el ciclo hidrológico natural, sino que también representa un riesgo de contaminación del acuífero a través de la infraestructura de drenaje, alcantarillado y la construcción de fosas sépticas.

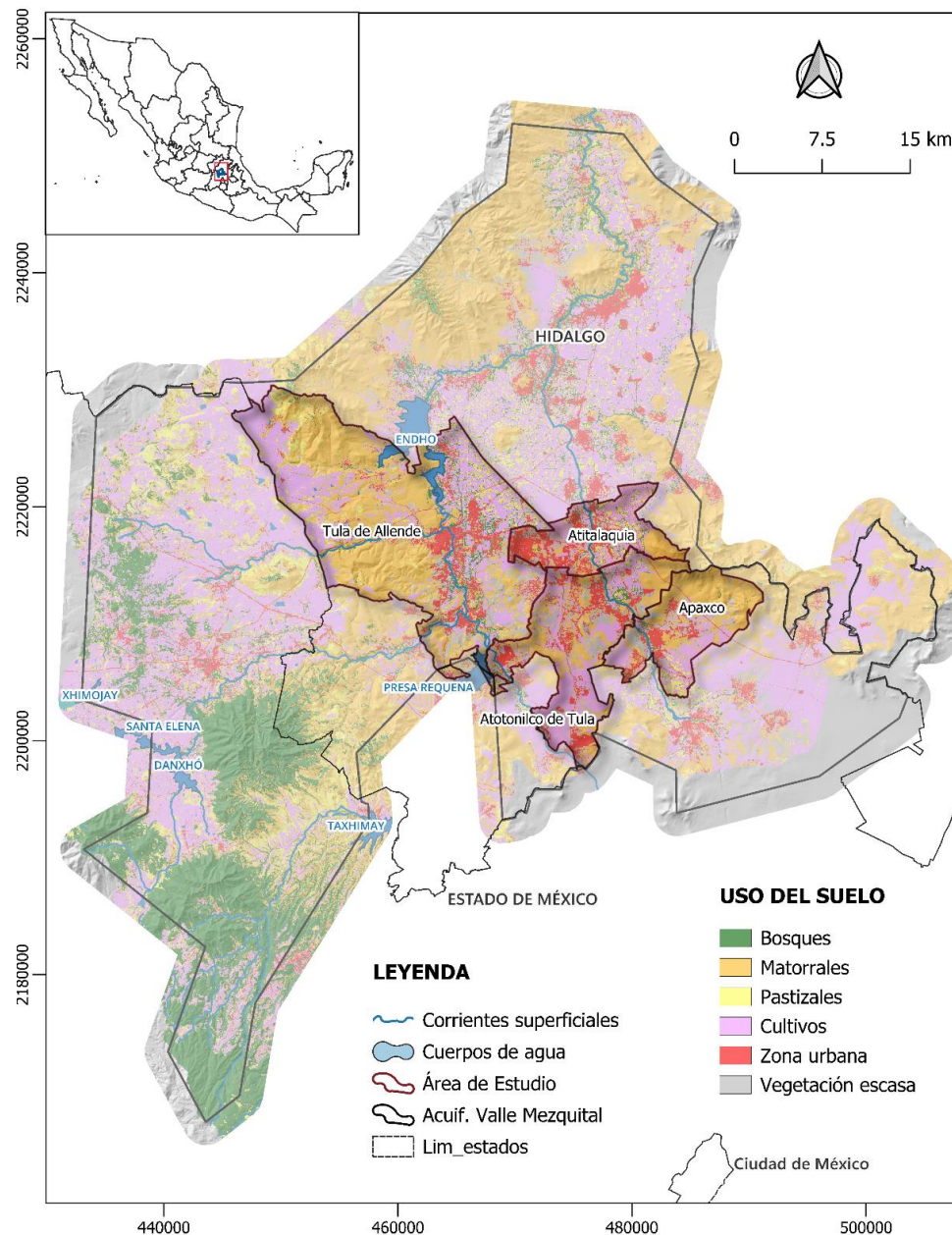


Figura.2.7 Mapa de uso del suelo del VM y de los municipios del área de estudio (confeccionado con datos de CONABIO, 2020)

La región ha experimentado un rápido progreso, teniendo la refinería de petróleo en Tula, la termoeléctrica y fabricación de cemento en Apaxco, Atotonilco y Huichapan. Se encuentra el centro piscícola de Tezontepec de Aldama. Se ubica la Región Minera Tula, donde se extraen minerales no metálicos por Cementos Tolteca, S.A. de C.V.; Caleras Beltrán, S.A. de C.V.; Cal El Tigre, S.A. de C.V.; Calera El Refugio, S.A. de C.V.; Lafarge Cementos, S.A. de C.V. y Química Atsa, S.A. Las características del uso de suelo y recursos naturales de los municipios se dan en la tabla 2.5, con base en INEGI (2020).

Tabla 2.5. Resumen de las características de uso del suelo y los recursos naturales en los municipios del área de estudio. Confeccionado a partir del compendio de información del 2020 de INEGI.

Características del uso de suelos y recursos naturales	MUNICIPIOS			
	Apaxco	Atitalaquia	Tula de Allende	Atotonilco de Tula
Edafología predominante	Leptosol (55.39%), Phaeozem (28.95%) y Vertisol (6.7%)	Vertisol (29.21%), Leptosol (26.26%) y Phaeozem (24.30%)	Phaeozem (60.43%), Vertisol (19.92%) y Leptosol (6.49%)	Phaeozem (52.87%), Leptosol (31.00%) y Vertisol (0.25%)
Vegetación	Matorral (18.68%), pastizal (14.14%) y bosque (5.34%)	Matorral (5.66%), Área sin vegetación (9.31%), bosque (4.31%) y pastizal (0.65%)	Pastizal (15.46%), matorral (9.71%), bosque (7.61%) y área sin vegetación (1.17%)	Pastizal (17.53%), matorral (13.24%) y bosque (0.84%)
Uso de suelo	Agricultura (52.88%) y zona urbana (8.96%)	Matorral (18.68%), pastizal (14.14%) y bosque (5.34%)	Agricultura (52.89%) y zona urbana (11.35%)	Agricultura (52.51%) y zona urbana (15.88%)
Agricultura	Para la agricultura mecanizada continua (73.88%). Para la agricultura manual estacional (0.05%). No apta para la agricultura (26.07%).	Para la agricultura mecanizada continua (69.83%). No apta para la agricultura (30.17%).	Para la agricultura mecanizada continua (34.11%). Para la agricultura con tracción animal estacional (0.55%). No aptas para la agricultura (65.34%)	Para la agricultura mecanizada continua (20.98%). Para la agricultura con tracción animal estacional (23.72%). No apta para la agricultura (55.3%)
Pecuario	Para el desarrollo de praderas cultivadas (73.88%). Para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (0.05%). No apta para uso pecuario (26.07%).	Para el establecimiento de praderas cultivadas con maquinaria agrícola (69.83%). Para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (30.17%).	Para el establecimiento de praderas cultivadas con maquinaria agrícola (34.11%). Para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (52.75%). No apta para el uso pecuario (13.14%).	Para el establecimiento de praderas cultivadas con maquinaria agrícola (20.98%). Para el aprovechamiento de la vegetación de pastizal (6.77%). Para el aprovechamiento de la vegetación natural diferente del pastizal (54.80%). No apta para uso pecuario (17.45%).

Nota: los % faltantes corresponden a zonas urbanas y cuerpos de agua superficiales.

2.8 Características demográficas de la región y el área de estudio

Según datos INEGI, la población en el acuífero VM, se estimó en 518,347 habitantes en 2005 y aumentó a 575,519 habitantes en 2020. Esta población se distribuyó en 456 localidades, compuestas por 54 áreas urbanas con 373,552 habitantes (representando el 64.9% de la población total) y 402 localidades rurales con 201,967 habitantes (correspondiente al 35.1% de la población total en la superficie del acuífero).

Aproximadamente el 46.7% de la población en el VM se encuentra en situación de pobreza, con un 40.3% en pobreza moderada y un 6.4% en pobreza extrema. Al evaluar la disponibilidad de servicios básicos en la región, como el alcantarillado y el saneamiento se observa que, la cobertura es relativamente alta, alcanzando un 92.6%, sin embargo, hay municipios en los cuales la provisión y disponibilidad de estos servicios cae por debajo del 80%. Esto resalta la disparidad en la calidad de servicios dentro de la región.

El 18% de la población carece de acceso a servicios de salud. Esta falta de acceso a atención médica adecuada podría agravar su situación de pobreza, ya que estas personas no tienen una red de protección financiera para prevenir o abordar problemas de salud sin incurrir en gastos directos, endeudamiento o venta de activos familiares, entre otros desafíos financieros.

Según datos del propio INEGI para el año 2016, se encontró que, en el VM, el 96.93% de las viviendas tienen acceso a agua entubada. De este porcentaje, el 57.1% tiene agua dentro de sus viviendas, y el 42.9% la obtiene desde fuera pero dentro del terreno de su propiedad. Solo el 3% de las viviendas obtienen agua por acarreo, mientras que un pequeño 0.07% no especifica su fuente de abastecimiento de agua.

Según la investigación de Lara & García (2019), de las viviendas que no tienen acceso a agua dentro de su hogar, se observa que la mayoría de ellas se abastecen de llaves comunitarias o de otras viviendas cercanas. A pesar de que estos porcentajes pueden sugerir una amplia cobertura del servicio, es importante destacar que existen municipios dentro de la región donde el acceso al agua es inferior al 80% según los datos del INEGI en 2020.

En la tabla 2.6 se presenta un resumen de características demográficas, acceso a servicios básicos, escolaridad, migración (a partir de 5 años), mortalidad (% de hijos fallecidos de mujeres de 15 a 49 años) y salud (% de la población no asociada algún servicio médico) en

el área de estudio. La caracterización se realizó con los resultados del censo de población y vivienda del 2020 publicados por el INEGI. Es importante tener en cuenta que, aunque las cifras sean relativamente altas, en la región existe un desequilibrio entre las zonas urbanas y las rurales que resulta en la mayor precariedad de las zonas rurales.

Tabla 2.6. Resumen de las características demográficas del área de estudio. Confeccionado a partir de los datos del censo de población y vivienda del 2020 de INEGI.

Características demográficas	MUNICIPIOS			
	Apaxco	Atitalaquia	Tula de Allende	Atotonilco de Tula
Población	31,898 (0.2% de la población estatal)	31,525 (10% de la población estatal)	115,107 (37% de la población estatal)	62,470 (20% de la población estatal)
Mortalidad	2.80%	3.10%	3.80%	3.30%
Agua entubada	66.90%	74.00%	73.20%	85.80%
Drenaje	94.90%	98.90%	97.60%	99.00%
Servicio sanitario	97.30%	98.90%	98%	98.90%
Electricidad	99%	99.50%	99.10%	99.60%
Tinaco	76.30%	89.10%	88.40%	57.40%
Cisterna o aljibe	22.60%	13.20%	29.30%	22.20%
Sin escolaridad	6.10%	25.00%	2.20%	19.00%
Población con nivel básico de escolaridad	52.20%	50.80%	49.60%	53.40%
Población entre 15 y 24 años que asisten a una institución educativa	49.10%	53.50%	51.90%	47.00%
Población que emigra	8.70%	8.90%	5.30%	3.12%
No afiliada a un servicio de salud	30.30%	26.40%	27.20%	27.80%

En la tabla 2.7 se desglosa la población municipal total por estratos de edad en niños menores a 2 años y la población mayor a 15 años, con base a los datos obtenidos del censo de INEGI (2022).

Tabla 2.7. Desglose de la población municipal por estratos de edad. Confeccionado a partir de los datos del censo de población y vivienda del 2020 de INEGI.

Municipios	Población municipal	Población de 0 a 2 años	Población > 15 años
Apaxco	31,898	1,527	21,988
Atitalaquia	31,525	1,226	24,062
Tula de Allende	115,107	4,727	88,186
Atotonilco de Tula	62,470	2,777	45,138

Se confeccionó el mapa de densidad poblacional del área de estudio con los datos del censo 2020 de INEGI (fig. 2.8). Este mapa permite evaluar cuántas personas pueden estar expuestas a riesgos ambientales, así como la vulnerabilidad de las comunidades locales. Una alta densidad poblacional en áreas vulnerables puede aumentar el riesgo para la salud pública y el medio ambiente.

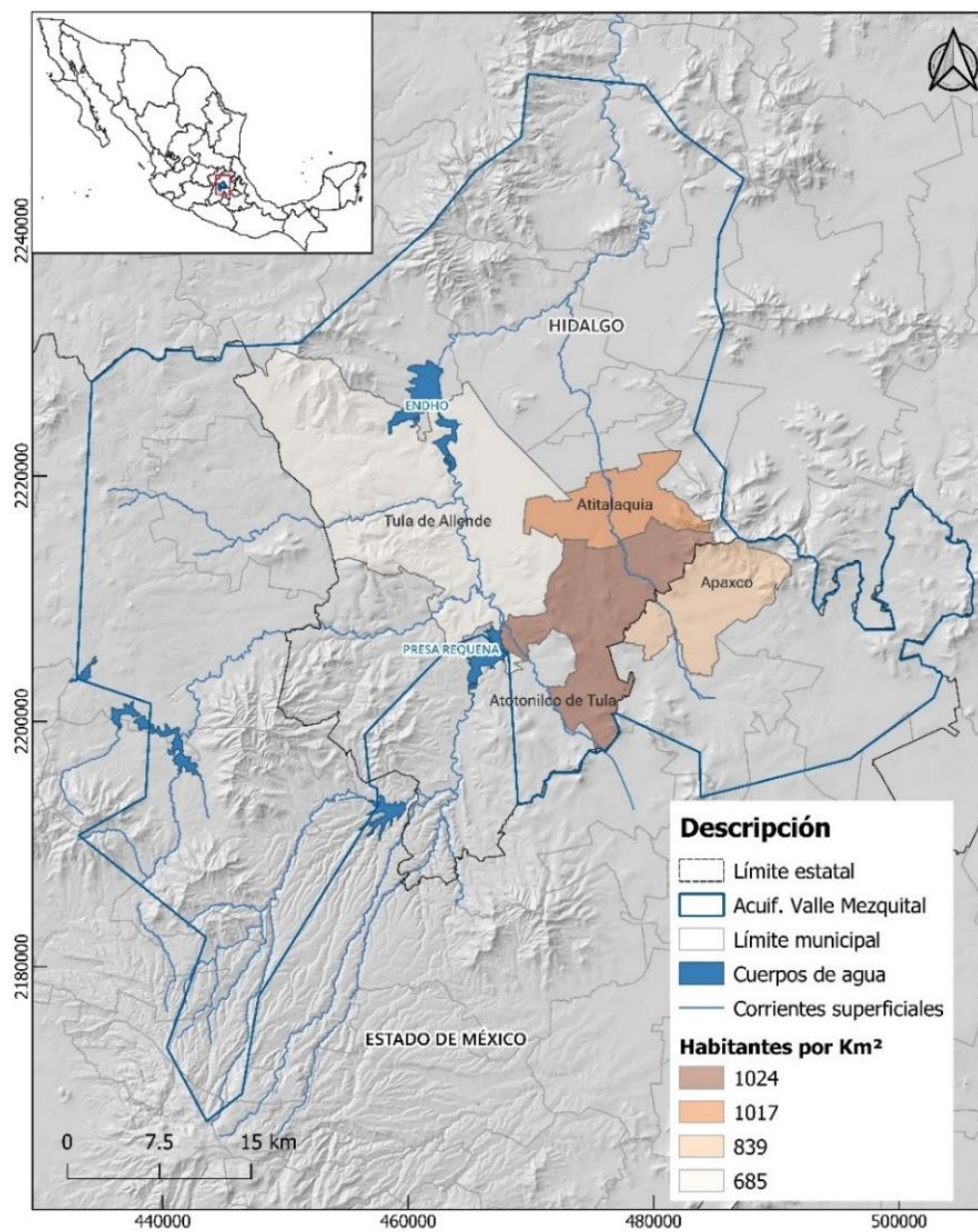


Figura.2.8 Mapa de densidad demográfica del área de estudio (confeccionado con datos de INEGI, 2020).

Capítulo 3

ANTECEDENTES

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales sobre la temática de esta investigación. El desarrollo de este capítulo se realizó tomando en cuenta el contexto internacional y las investigaciones desarrolladas en el área de estudio.

La obtención de información detallada y contextual sobre el área y la temática específica es fundamental para comprender sus problemáticas actuales. Esto se logra mediante el análisis y recopilación de una extensa variedad de estudios, proyectos e investigaciones en distintas disciplinas. Estos estudios son esenciales para comprender la dinámica del agua subterránea en el VM y su interacción con el entorno, los que posteriormente serán la base para la comprensión del modelo conceptual hidrogeológico.

3.1 Estado del Arte

Este epígrafe proporciona una visión panorámica de los conocimientos y hallazgos previos relacionados con la contaminación por NO_3^- , F^- y As en aguas subterráneas del mundo y los enfocados en México. A través de un análisis detallado, se sintetizan las características hidrodinámicas e hidrogeoquímicas del acuífero VM y los estudios de riesgo para la salud humana en la región. Esta revisión exhaustiva del estado del arte proporciona una base sólida para contextualizar y fundamentar la investigación que se desarrolla en el presente trabajo.

3.1.1 Generalidades

La presión de la creciente población ha provocado una sobreexplotación de las aguas subterráneas y su contaminación con diversas sustancias orgánicas e inorgánicas, afectando negativamente a los órganos humanos producto de la ingesta regular de agua subterránea contaminada (WHO, 2004; Schmoll et al., 2006). La WHO informó en 2004 que aproximadamente 1.2 mil millones de personas en todo el mundo padecen diferentes enfermedades transmitidas por el agua. La toxicidad del agua subterránea está aumentando diariamente en la mayoría de los países del mundo debido a diversos eventos naturales y actividades humanas. El problema de la calidad del agua subterránea aumenta la escasez de agua potable e impacta de manera significativa en la salud humana (Bhagat et al., 2021; Vengosh et al., 2022; Xiong et al., 2020).

Las preocupaciones respecto a contaminantes químicos en el agua de consumo humano se deben fundamentalmente a la capacidad de estos de producir efectos adversos en la salud humana luego de períodos prolongados de exposición (WHO, 2018). Pocos componentes químicos en el agua pueden proporcionar problemas de salud como resultado de una exposición única o de corta duración, salvo que se trate de una contaminación de gran magnitud accidental (WHO, 2018). Sin embargo, en esta última situación no se justifica la implementación de sistemas costosos de tratamiento de agua para la remoción de compuestos químicos si se conocen las fuentes y causas del riesgo (WHO, 2018).

Es en el caso contrario, cuando se trata de escenarios donde ocurren exposiciones prolongadas a contaminantes en el agua potable donde deben centrarse los esfuerzos para el monitoreo y la aplicación de medidas correctivas o de tratamiento. Sin embargo, hay pocos productos químicos conocidos que realmente causen un efecto claramente definido sobre la

salud humana y atribuible en gran medida al agua. Ejemplos de estos contaminantes químicos con efectos negativos comprobados son los nitratos (NO_3^-), el fluoruro (F^-) y el arsénico (As), que por desgracia también resultan muy comunes (WHO, 2018).

En el mundo actual, los NO_3^- representan una grave amenaza para las aguas subterráneas. El veinte por ciento del suministro de agua subterránea en América del Norte y Europa está en riesgo debido a la contaminación agrícola causada por NO_3^- y pesticidas (Domínguez, 2022). Según la WHO (2018), los acuíferos poco profundos y/o no confinados pueden estar expuestos a contaminación por NO_3^- a partir de las descargas o filtraciones asociadas a las prácticas agrícolas, las redes de saneamiento y alcantarillado locales, aguas residuales no tratadas y los residuos industriales.

Por otra parte, de los contaminantes más comunes de origen geogénico se puede mencionar el As y el F^- . Alrededor de 150-220 millones y 240 millones de personas en todo el mundo sufren de enfermedades crónicas relacionadas con el As y el F^- , respectivamente (WHO, 2017). La presencia de As y F^- en agua subterránea es un problema global que afecta a los cinco continentes (Bhattacharya et al., 2020; Chandrajith et al., 2020; Zhang et al., 2018)

3.1.2 Síntesis de casos de estudio relacionados con NO_3^- , F^- y As

Al encontrarse el NO_3^- , F^- y el As en el agua no son descubiertos ni por el olfato, la vista o mucho menos al tacto, inclusive a concentraciones potencialmente peligrosas, por lo que en regla general son detectados una vez aparecen los síntomas en la población (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores., 2003; WHO, 2018). Al ser contaminantes tan comunes en el agua subterránea del mundo, existen muchísimos estudios en la literatura científica respecto a su origen, acumulación y transporte en el medio ambiente; así como de los efectos que pueden tener en la salud humana y posibles tratamientos. A continuación, se pretende resumir algunos de los estudios que permitan dar una idea de la panorámica que aqueja este escenario, sus posibles causas y consecuencias.

La presencia de NO_3^- en las aguas subterráneas es un tema recurrente en las discusiones sobre la calidad del agua, dado su impacto tanto en seres humanos como en animales. Identificar el origen preciso de esta contaminación suele ser complicado debido a su variedad de fuentes, que incluyen procesos naturales como la precipitación y la descomposición de la materia

orgánica, así como actividades humanas como la escorrentía de suelos agrícolas, el exceso de fertilización nitrogenada y la alteración de la materia orgánica del suelo debido a la rotación de cultivos (Heaton, 1985). Esta contaminación puede provenir tanto de fuentes puntuales, como son los efluentes de tanques sépticos, como de fuentes no puntuales, como son los campos donde se han aplicado fertilizantes nitrogenados y, en este último caso, se distribuye en grandes áreas (Hurlburt, 1988).

Los NO_3^- presentan un desafío en la gestión de la calidad del agua subterránea debido a su movilidad y su persistencia en el medio acuífero. A diferencia de otros contaminantes, no se adsorben en los materiales del acuífero ni precipitan como minerales, lo que facilita su transporte a largas distancias en la subsuperficie, especialmente en sedimentos permeables o rocas fracturadas y su acumulación en los acuíferos (Freeze y Cherry, 1979). La presencia elevada en el suministro de agua potable conlleva diversos riesgos para la salud, incluyendo la metahemoglobinemia (el síndrome del bebé azul) y enfermedades gastrointestinales y, lo que incrementa la vulnerabilidad frente al cáncer gastrointestinal (Linde Liang et al., 2023).

China se encuentra entre los países que enfrentan serios desafíos en cuanto a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, a pesar de los notables avances en el control de la contaminación del agua en las últimas dos décadas (Liu et al., 2022). Múltiples estudios han revelado niveles de NO_3^- que exceden los estándares de agua potable establecidos por la WHO (50 mg/L) (Wen, et al, 2018; Wu et al, 2018 y Zhang et al., 2022).

Actualmente, el límite estándar de NO_3^- en el agua potable en China es de 44.3 mg/L, teniendo en cuenta las condiciones existentes de contaminación asociadas a fertilizantes agrícolas, la descarga de estiércol de ganado en zonas rurales, la descarga de aguas residuales y las fugas en vertederos en zonas urbanas (Adimalla et al., 2021; Gu et al., 2013; Linde Liang et al., 2023; Zhai et al., 2019). Otros países de Europa, EE. UU., Cuba y México en América Latina por solo mencionar ejemplos también presentan esta problemática ambiental (Almudena Antón & Jesús Lizaso, 2001; Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2003 y Miguel Fernández & Vázquez Taset, 2006).

La forma de controlar los NO_3^- en las aguas subterráneas es mediante la reducción o denitrificación, un proceso natural en el cual bacterias convierten los NO_3^- en gases de nitrógeno menos peligrosos. En áreas con alto riesgo de contaminación, como los acuíferos

bajo agricultura intensiva o cercanos a zonas con alta densidad de tanques sépticos, este control es fundamental para prevenir problemas futuros (Hendry, 1988).

En cuanto a los F^- , en regiones de la India y zonas rurales de China, se ha encontrado que los acuíferos contienen altas concentraciones de F^- natural debido a la geología (Sankhyan & Sangameswaran, 2008; Saravanabhavan et al., 2016 y Sudarshan & Khanna, 2004).

En ciertas regiones de la India, también se ha encontrado que los acuíferos contienen altas concentraciones de F^- debido a la geología. Esto ha llevado a una alta concentración de este contaminante en el agua potable de la región. Un estudio realizado en el distrito de Nalgonda encontró que más del 20% de la población mostraba signos de fluorosis dental y esquelética debido a la ingesta crónica de fluoruros (Pokhrel et al., 2018).

De igual forma ocurrió en algunos acuíferos de China. También se hallaron altas concentraciones de F^- geogénico. Un estudio en el condado de Longli encontró que más del 90% de los residentes del condado bebían agua con concentraciones por encima del límite seguro recomendado por la WHO. Mostraban altas tasas de fluorosis dental y ósea en la población (Cheng J et al., 2018)

En un estudio realizado en China se obtuvo que había una pérdida de IQ en niños expuestos a concentraciones mayores de 3 mg/L de F^- en el agua respecto a niños de la provincia de control donde la exposición en el agua era mucho menor (Cheng J et al., 2018).

Los niños son un estrato poblacional de mayor riesgo, por tal motivo, muchos estudios se enfocan a este sector. Recientemente, en un estudio de 201 niños en Araihaazar, Bangladesh, investigó los efectos de la exposición al As y a F^- en la inteligencia y el crecimiento. Se obtuvo como resultado que estos pueden verse afectados por altas concentraciones de ambos contaminantes. Se demostró, además, que la exposición al As en el agua potable reduce las puntuaciones en pruebas que miden la función intelectual de los niños antes y después de ajustar por características sociodemográficas de manera más significativa que al F^- (Wang et al. 2007).

En Taiwán, 1960, se descubrió que algunas personas que habitaban en regiones donde las aguas presentaban As desarrollaron enfermedades relacionadas con la intoxicación por este contaminante, incluyendo cáncer de piel, cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares

y daño neurológico. Desde entonces, se han realizado numerosos estudios de casos críticos en diferentes partes del mundo donde se ha encontrado As geogénico en aguas subterráneas (US.EPA, 2010)

De los casos más estudiados está Bengal Occidental, India y Bangladesh. En 1990, se determinó que millones de personas en esta región consumían aguas con As de tipo geogénico. Esto ha llevado a un gran número de casos de envenenamiento y se considera una de las peores catástrofes de salud ambiental en la historia. Ejemplos de estos casos de estudio se pueden encontrar en Chakraborti et al. (2006); Chandrajith et al. (2010); Smith et al. (1999); Rahman et al. (1998) y Zheng Yan et al. (2017).

En Bangladesh, el área donde se encuentra el agua subterránea contaminada abarca aproximadamente 150,000 km², afectando entre 30 y 70 millones de habitantes con concentraciones que oscilan entre 50 y 2500 µg/L. Bangladesh es el séptimo país más poblado del mundo, y durante las últimas décadas, decenas de millones de sus ciudadanos han estado expuestos al arsénico en el agua. Alrededor de 3000 bangladesíes mueren cada año a causa de cánceres inducidos por el arsénico, y actualmente alrededor de 2 millones de personas en el país sufren diversos problemas de salud debido al consumo de agua con arsénico. Según una estimación de la WHO, en 2001, el agua contaminada con arsénico en Bangladesh fue responsable de 9100 muertes y 125,000 años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) (WHO, 2010).

Bundschuh et al. (2012), destacan las diversas fuentes de contaminación por As en América Latina, incluidas las fuentes geológicas naturales, las actividades mineras y las prácticas agrícolas. Analizan las regiones y acuíferos afectados por la contaminación por As, así como los factores que contribuyen a niveles más altos de exposición. Además, el artículo revisa los efectos en la salud asociados con la exposición al As, como el cáncer de piel y de órganos internos, las lesiones cutáneas y los efectos neurológicos. Los autores enfatizan la importancia de la detección temprana y las medidas de prevención para mitigar los riesgos para la salud que plantea la contaminación por As.

A diferencia de la contaminación antropogénica, la cual genera una afección de carácter más local, la ocurrencia de concentraciones altas de As de origen natural afecta a grandes áreas (Smedley & Kinninurgh, 2002). El fenómeno de la existencia de contenidos altos de As de

origen natural en las aguas está controlado por tres factores: la fuente primaria de As, los procesos de movilización/retención de arsénico en la interacción entre la fase sólida y la fase líquida, y el transporte de arsénico como especie acuosa en el seno del agua.

A pesar de que los materiales de la geosfera generalmente no contienen grandes concentraciones de As en su fase sólida, incluso una pequeña cantidad liberada de esta fase sólida debido a procesos de desorción o disolución puede incrementar significativamente la concentración de este en el agua, superando los 50 µg/L (BGS y DPHE, 2001; Smedley & Kinniburgh, 2002). Se destaca que una característica notable del problema del As de origen natural en las aguas subterráneas es que, no siempre existe una correlación directa entre altos contenidos en el agua y altos contenidos en los materiales que componen el acuífero.

Tampoco existe un modelo geológico/hidrogeológico común para todos los casos de estudio identificados. Encontrándose aguas con As en situaciones muy variadas, tanto en condiciones reductoras como en condiciones oxidantes, en acuíferos sobreexplotados o no, tanto en zonas áridas como en zonas húmedas, o tanto en acuíferos superficiales libres como en acuíferos profundos confinados (Smedley & Kinniburgh, 2002).

El acuífero poco profundo (100-150 m) de la región de Bangladesh y Bengala Oeste está constituido por sedimentos fluviales y deltaicos de edad Holocena, procedentes de la denudación de las elevaciones del Himalaya y de rocas del basamento; con aguas jóvenes (~ 2.000 años) y de flujo lento. Se han medido contenidos de As en el rango de <2 a 20 mg/L. El acuífero presenta condiciones fuertemente reductoras, de pH neutro a superior a 7, rangos muy amplios de proporción arsenito/arsenato, aunque suele ser de 50 a 60 % de arsenito sobre el total de arsénico. Aquí el contenido de arsénico presenta una gran correlación con el Carbono Orgánico Disuelto y su origen se liga a condiciones reductoras por presencia de materia orgánica. (BGS & DPHE, 2001; Anawar et al., 2003).

El acuífero Llanura Chaco-pampeana en Argentina presenta un área afectada por As igual a 1×10^6 km² con concentraciones medidas en el rango de <1-5.300 µg/L⁻¹. El acuífero está formado por una secuencia sedimentaria con predominio de loess de edad cuaternaria con niveles de calcretas y depósitos volcánicos piroclásticos de composición riolítica-dacítica intercalados. En el acuífero predominan las condiciones oxidantes, la mayor parte se

encuentra como As(V). El pH está, por lo general, entre 7 y 8.7. Las aguas presentan concentraciones bajas de Fe y Mn. La salinidad es alta y la concentración de As se correlaciona con los contenidos en F⁻, V, HCO₃⁻, B, y Mo. Por lo que contrario al caso de estudio anterior, el origen del As en las aguas subterráneas de este acuífero se vincula al desarrollo de condiciones oxidantes en climas áridos (Sancha & Castro, 2001; Smedley et al., 2002).

Se pueden citar muchos estudios en donde se comprueba los muy diferentes y variados escenarios de génesis geogénica para As en aguas subterráneas: Taiwan (Smedley & Kinniburgh, 2002; y referencias allí citadas), Mongolia Interior (Smedley et al., 2001; Smedley y Kinniburgh, 2002), Norte de China (Wang & Huang, 1994), Vietnam (Berg et al., 2001), Hungría y Rumanía, Cuenca del Danubio (Varsányi et al., 1991; Gurzau & Gurzau, 2001), Chile, Región de Antofagasta (Sancha & Castro, 2001) por mencionar algunos ejemplos.

3.1.3 Síntesis de estudios en México relacionados con NO₃⁻, F⁻ y As

En México el 70% de la población emplea aguas subterráneas para distintos fines, resultado de las condiciones áridas y el clima seco de la mayor parte del país. Existen un total de 653 acuíferos en territorio nacional, de ellos aproximadamente 115, según datos de CONAGUA con fecha noviembre del 2023 se encuentran en condiciones de sobreexplotación. Aunado al problema de la calidad del agua y la sequía que se enfrenta, el escenario es motivo de preocupación y atención. Los problemas más frecuentes de calidad de las aguas subterráneas están asociados a la presencia de elementos no deseados de origen natural (principalmente As y F⁻), contaminantes antropogénicos (NO₃⁻, residuos fecales, pesticidas), varios compuestos de origen industrial (subproductos de la minería, solventes organoclorados, hidrocarburos, compuestos fenólicos, etc.), y contaminantes emergentes, como cosméticos, antibióticos, hormonas y nanomateriales (Cortés et al., 2006).

Respecto al NO₃⁻, se ha identificado su presencia en el acuífero de la zona sur de la cuenca de México, el estado de Guanajuato, el Valle de Huamantla en Tlaxcala, en el Valle de Puebla, Quintana Roo, Mérida y otros en la zona norte-centro del país por mencionar ejemplos. En todos los casos asociados a un origen antropogénico bien identificado y delimitado (Ávila,

& Sansores, 2003; Brenes et al., 2011; Cuevas et al., 2002; Gutiérrez et al., 2022; Martínez Rodríguez et al., 2012; Montiel Palma et al., 2014. y Sánchez-Sánchez et al., 2015).

En el país se ha informado de la existencia de As y F⁻ en niveles que exceden tanto las pautas nacionales como las directrices internacionales para el agua potable, especialmente en la zona norte del país y ciertas áreas geotermales en la región central (Cortés et al., 2006). En el estado de Chihuahua e Hidalgo se han detectado concentraciones de As y F⁻ por encima de los límites permitidos para agua potable en México (0.025 mg/L de As y 1.5 mg/L de F⁻, según la Modificación a la NOM-127-SSA1-1994). La concentración de estos elementos en la región puede variar según la ubicación del pozo, su profundidad y el caudal de extracción (Cortés et al., 2006).

Los acuíferos con los niveles más elevados de As y F⁻ incluyen el de Jiménez-Camargo, con valores de hasta 0.419 mg/L de As y 14.4 mg/L de F⁻, el de Aldama-San Diego con concentraciones de 0.030 mg/L de As y 4.6 mg/L de F⁻, y el de Laguna de Hormigas (cuencas cerradas) con 0.394 mg/L de As y 7.0 mg/L de F⁻. Además, el acuífero Mecoqui-Delicias reporta altas concentraciones de estos elementos, especialmente en las zonas norte y noroeste, con concentraciones entre 0.009 mg/L y 0.316 mg/L de As y entre 0.91 mg/L y 9.4 mg/L de F⁻. Las localidades de Julimes, Mecoqui y Rosales en este acuífero enfrentan problemas significativos de calidad del agua subterránea debido a estos contaminantes (Cortés et al., 2006).

En el Norte de México, la problemática de salud relacionada con la exposición a As y F⁻ ha sido resaltada en varios estudios y es de alta importancia para la región debido a que el agua subterránea es la principal fuente para uso y consumo humano. Se ha observado que As y F⁻ suelen encontrarse juntos con frecuencia en el agua subterránea extraída en cuencas cerradas, y diversos estudios señalan que los estados del Norte de México con mayores problemas en cuanto a estos elementos en el agua son Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas, San Luis Potosí, Baja California y Sonora (Cortés et al., 2006). Además, se ha reportado que los estados con mayor prevalencia de fluorosis dental en el país son: Aguascalientes, Sonora, Zacatecas, San Luis Potosí, Baja California y Durango (Armienta, 2008).

Fue en el acuífero de Comarca Lagunera, ubicado entre Durango y Coahuila donde se reportan por primera vez en México problemas de salud por concentraciones de As en el agua

subterránea destinada al consumo humano. Se identificó en la población melanosis, queratosis y cáncer de piel. Hasta la fecha, no se han realizado otros estudios para asociarlo a cáncer interno, índice de mortalidad y morbilidad. Se han realizado muchas investigaciones, como resultados hay que señalar que el 50% de las muestras dieron concentraciones de As superiores a los 50 μ /L. Su origen se asoció a la disolución o desorción de los minerales que constituyen el acuífero presentado en un ambiente de tipo árido y oxidante de planicies aluviales constituido por importantes espesores del Cuaternario y el Cenozoico y en combinación con un flujo lento y una elevada evaporación (Cortés et al., 2006).

En el Valle del Guadiana, en el estado de Durango, ubicado en la porción centro-norte del país también se encontraron concentraciones de As que superan el umbral permisible establecido por la NOM-127 (25 μ /L en las fechas en las que se realiza la investigación). El acuífero está constituido por depósitos aluviales del Cuaternario de un espesor máximo de 200 m que sobreyacen a riolitas e ignimbritas afectadas por una serie de fallas que forman un patrón de horsts y grabens, secuencia que forma parte de la Sierra Madre Occidental., por lo que también representa un acuífero fracturado con influencia geotérmica (manantiales calientes y pozos profundos que extraen aguas termales). Las concentraciones de As más bajas se asocian al ambiente aluvial con aguas subterráneas de temperaturas bajas y de tipo cálcicas bicarbonatadas. Los niveles más altos se asociaron al acuífero ígneo con influencia de las aguas termales (Cortés et al., 2006).

En el estado de Hidalgo también ha sido detectada contaminación por As y F⁻. En el municipio de Zimapán, se han registrado concentraciones significativamente elevadas de As en el agua subterránea destinada al abastecimiento municipal, alcanzando hasta 1.3 mg/L en el pozo profundo conocido como El Muhi (Cortés et al., 2006). La región de Zimapán, caracterizada por su condición semiárida y la falta de fuentes de agua superficial alternas, ha sido objeto de estudios multidisciplinarios desde 1992 para identificar el origen y la distribución de la contaminación del acuífero. Las investigaciones incluyeron análisis químicos e isotópicos del agua, caracterizaciones hidrogeoquímicas, evaluación de la hidrogeología, geología, mineralogía y análisis detallados de suelos, rocas y residuos mineros (Cortés et al., 2006).

En la región de Zimapán, la actividad minera, centrada en la extracción de Ag, Pb, Zn y Cu desde la época colonial, ha sido la principal fuente de la contaminación, ya que los minerales explotados, como la arsenopirita, contienen As. La interacción del agua subterránea con estos minerales ha originado la presencia natural del contaminante en el acuífero profundo que abastece de agua a la población. Además, la oxidación de los residuos mineros y la percolación de humos de fundidoras han contribuido a la contaminación de norias cercanas (Cortés et al., 2006).

En 2015, Antonio Lara del Río realizó un estudio en Matehuala, San Luis Potosí, que tuvo como objetivo determinar la concentración de As inorgánico en el cabello de poblaciones expuestas y utilizarlo como biomarcador de exposición para evaluar si la población presenta acumulación de este en niveles peligrosos para la salud humana, siguiendo el valor guía de la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades (ATSDR) de 1 mg/kg. Además, se buscó identificar las posibles vías de exposición, como la ingesta oral, inhalación y contacto dérmico. Se recolectaron muestras de cabello, agua de consumo y datos demográficos. Aunque se detectó As en algunas muestras de agua excediendo la norma mexicana, no se encontró una relación clara entre la exposición al As en el agua potable y la acumulación en el cabello. Estos resultados sugieren que la población expuesta al As en Matehuala no presenta acumulación de As debido a que no bebe el agua contaminada.

Molina-Frechero et al. (2020), realizaron un estudio que tuvo como objetivo evaluar la concentración de As inorgánico en el agua potable disponible para la población del municipio del Mezquital, Durango, con la metodología de la EPA. Se calculó el cociente de riesgo (HQ) para determinar el riesgo no cancerígeno en niños con bajo peso y el riesgo cancerígeno en adultos expuestos a la ingesta de As. Los resultados mostraron que las concentraciones en las aguas analizadas variaron entre 0.3 y 10.2 µg/L, con un promedio de 7.35 µg/L. La dosis de exposición y el HQ indicaron que los niños están en riesgo de desarrollar efectos sistémicos crónicos debido a la ingestión de As a través del agua. Además, aunque los cálculos no arrojaron una probabilidad de cáncer para adultos, los autores concluyen que existe, sobre todo, en la zona central del municipio.

En el país se han identificado tres principales ambientes hidrogeológicos en donde se ha detectado la presencia de As y F⁻ en el agua subterránea: acuíferos aluviales (NW, N y Centro

de México), áreas de actividad minera (N y Centro de México) y aguas geotérmicas, especialmente en la Franja Volcánica Trans-Mexicana (Centro de México) (Arreguín Cortés et al., 2006). El origen del As en las aguas subterráneas del acuífero del VM no está bien comprendido. Sin embargo, Smedley, 2003 (citado por Cortés et al., 2006) lo asocia a procesos de disolución y adsorción de los minerales que constituyen el acuífero, en especial de los óxidos metálicos. Este proceso ocurre bajo condiciones oxidantes en combinación con las bajas velocidades del flujo subterráneo y la evaporación.

3.1.4 Síntesis de estudios en el Valle del Mezquital

Las principales fuentes de contaminantes en el VM son la industria, la agricultura intensiva y la proliferación de asentamientos humanos no regulados (Camacho Navarro & Pérez, 2018). La industria y las fábricas en la región liberan productos químicos tóxicos y residuos industriales que contaminan las aguas subterráneas. Además, la agricultura ha utilizado grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas que se infiltran en el suelo y llegan a los acuíferos subterráneos. También, esta actividad, ha hecho uso de las aguas residuales para proliferar en un clima árido y semiárido característico (Camacho Navarro & Pérez, 2018).

También se ha encontrado As en algunos pozos del municipio de Tula (Vázquez Tavares & Córdova Pla, 2001). La contaminación fue asociada al riego con aguas residuales, mientras que el F^- existente en algunos pozos fue asociada a la interacción con el entorno geológico. La población expuesta a concentraciones de F^- de 1.41 mg/L en San Miguel Vindhó, localidad de este municipio, ha experimentado una alta prevalencia de fluorosis dental. Estos hallazgos revelan la complejidad y diversidad de las fuentes de contaminación por As y F^- en la región.

La consecuencia directa de esta contaminación es la pérdida de calidad del agua subterránea en la región. Para hacer frente a este problema, es necesario conocer el origen de la contaminación para implementar medidas de control y prevención. Sin embargo, aunque diversas actividades humanas pueden generar cargas significativas de contaminantes, no todas contribuirán igualmente a la contaminación del agua subterránea. La magnitud de la contaminación en un acuífero no siempre está correlacionada con el tamaño de la actividad que potencialmente podría contaminar la superficie del suelo (Expósito Castillo et al, 2022).

3.1.4.1 Características hidrodinámicas del acuífero

Cervantes & Armienta (2004), realizan un estudio en el que se define un sistema hidrológico complejo formado por un acuífero no confinado superficial en materiales clásticos y aluviales del Cuaternario; un segundo acuífero constituido por rocas volcánicas, que varía de confinado a no confinado según áreas, y un tercero en las calizas del Cretácico y que es el de mayor profundidad. Concluyen que existe una relación directa entre las fallas de la región y la dirección del flujo subterráneo (SW-NE). Se atribuye la existencia de NO_3^- en el agua subterránea a una recarga superficial de aguas residuales. Determinan que existe una recarga profunda proveniente de las calizas que limita al empeoramiento de la calidad que cabría esperar producto del prolongado uso de las aguas residuales.

Lesser et al. (2011), estudiaron el comportamiento piezométrico para el año 2007; obtuvieron parámetros hidráulicos a partir de ensayos de bombeos y midieron variables fisicoquímicas y orgánicas. Los objetivos de esta investigación fueron describir el funcionamiento del acuífero, calcular su balance hídrico, determinar la calidad del agua subterránea y el efecto de la recarga con agua residual. Concluyen que el mayor volumen de recarga lo constituyen el retorno de riego y el que se infiltra a través de canales de aguas residuales no tratadas; la existencia de dos acuíferos, uno más somero y uno más profundo, una dirección preferencial de flujo de sur a norte y un cambio de almacenamiento nulo.

Jiménez (2014), coincide con Cervantes & Armienta (2004), en la existencia de tres acuíferos en el VM, a los que nombra y asocia a formaciones geológicas de la siguiente forma: Superior, Tarango y El Doctor. El acuífero conformado por la formación Tarango es el más importante debido a su almacenamiento. Como prueba de la recarga del acuífero con aguas residuales aporta el hecho de que el nivel del agua subterránea aumentó entre 15 y 30m de 1938 a 1990 y la aparición de docenas de manantiales, como el manantial del Cerro Colorado en Tezontepec de Aldama.

3.1.4.2 Características hidrogeoquímicas del acuífero

Del Arenal (1985), concluye que en el acuífero predominan las aguas sódicas-bicarbonatadas; aclarando que, aunque la facies aniónica está perfectamente definida por el bicarbonato, la facies catiónica manifiesta un intercambio entre el sodio y el calcio, con sus mezclas

correspondientes. A pesar de haber realizado 120 análisis químicos no se pudo establecer un patrón zonal de las facies hidroquímicas. Se concluyó, además, que no había problemas importantes de contaminación fecal ya que el suelo actuaba como un filtro natural y que se detectaban altos contenidos de nitratos. Hay que mencionar que en estudios posteriores (Marín et al., 1999; Gallegos et al., 1999) se encontraron en muestras de agua subterránea del acuífero somero evidencias de contaminación por nitratos y coliformes fecales y totales.

Jiménez & Chávez (2004) realizaron un estudio en pozos y manantiales en zonas directamente recargadas con aguas residuales que abastecen alrededor de 45 000 personas, cerca del Distrito de Riego 003, con el objetivo de determinar la calidad de estas y comparar con la norma de calidad de agua de uso y consumo humano. Realizaron dos campañas de muestreo, una durante la estación de lluvia y otra en periodo de seca. En la primera campaña se evaluaron 276 parámetros, incluyendo metales, no metales, orgánicos y radioactividad. En la segunda se midieron más de 218 parámetros incluyendo compuestos orgánicos.

Se concluye que los suelos de la región, a partir de procesos como intercambio iónico y adsorción, ejercen un efecto de autodepuración natural que evita la recarga del acuífero con aguas contaminadas. Recomiendan el empleo de pozos profundos, y un proceso de cloración y manejo adecuado, así como realizar un estudio del suelo para estimar el tiempo en el que el mismo seguirá actuando como filtro natural efectivamente.

Sin embargo, Lesser et al. (2011), indican que existe un alto grado de contaminación por metales pesados y sales en las aguas subterráneas, con base en 165 pozos muestreados en el 2007. Se detectó As en siete aprovechamientos y concentraciones por encima de la norma de agua para uso y consumo humano de Pb, F⁻, PO₄⁻³ y B. En 30 de los 75 pozos de agua potable analizados bacteriológicamente, se detectaron coliformes totales y en varios de ellos coliformes fecales.

Lesser et. al (2018) estudiaron contaminantes emergentes y algunos compuestos orgánicos. Para ello se realizó el muestreo en 9 canales de riego, 4 manantiales y 17 pozos en periodo de secas. De este estudio se concluyó que el suelo actúa como un filtro, eliminando la mayoría de los contaminantes orgánicos durante la infiltración de las aguas residuales y evitando una mayor contaminación en los sistemas acuíferos.

Celestino et al. (2019) evaluaron los elementos mayoritarios en 31 pozos destinados al abastecimiento de la población. Se determinó la calidad del agua utilizando el índice de calidad del agua (WQI) y se emplearon herramientas estadísticas para el análisis de los resultados (análisis de componentes principales y geoestadística multivariada de agrupamiento de k-medias). Como resultado se obtuvieron dos conglomerados o agrupaciones de aguas. En el primero las aguas eran no aptas para uso y consumo humano y en el segundo grupo sí. Espacialmente las primeras se localizan en áreas urbanas, zonas de retorno de aguas residuales y alrededor del río Tula. El segundo grupo, corresponde a pozos ubicados en campos agrícolas de temporal, zonas de recarga y asentamientos rurales. Destaca el valor de integrar varios enfoques y métodos en la identificación de procesos hidrogeoquímicos.

En relación con la contaminación bacteriana, se destaca el estudio realizado por Vázquez et al. (2020), en el cual se presentan los hallazgos de un análisis llevado a cabo entre 2016 y 2017. Se recolectaron muestras de agua en viviendas, aguas residuales y fuentes subterráneas para evaluar la presencia de coliformes fecales, enterococos fecales y *Escherichia coli*. Los resultados revelan que cerca del 50% de las muestras tomadas en viviendas mostraron contaminación fecal, alcanzando niveles de hasta 4.62×10^4 UFC/100 mL. En cuanto a las muestras de canales de riego con aguas residuales de Tula y Tlahuelilpan, se detectaron recuentos de seis órdenes de magnitud. Además, se identificó la presencia de *Escherichia coli* en el 100% de las muestras de agua subterránea analizadas.

3.1.4.3 Estudios de riesgo a la salud humana en el Valle del Mezquital

Son muchos los estudios realizados en el VM enfocados a determinar el riesgo a la salud de la población expuesta a las actividades realizadas con las aguas residuales, ya sea de manera directa o indirecta. La mayoría de estos tienen como objeto de estudio las consecuencias a la exposición de contaminantes orgánicos y bacteriológicos presentes en las aguas residuales (Cifuentes et al., 1994; Figueroa & García, 2020; Contreras et al., 2020).

Vega et al. (2022), evaluaron el riesgo para la salud y el número de personas expuestas a altas concentraciones de As y F⁻ presentes en las aguas subterráneas en el municipio de Tula de Allende. Especifican que la existencia de estos elementos se debe a procesos geológicos que pudiesen estar relacionados con aguas geotermales u otro proceso geoquímico. El modelo

probabilístico y la evaluación de riesgo para la salud se ejecutaron en cumplimiento de la metodología establecida por la US.EPA. Se tomó como población niños en edad escolar para evaluar los riesgos carcinogénicos de la exposición As y no carcinogénicos de la exposición As y F⁻. Como resultado se obtuvo concentraciones de F⁻ en el rango de 0.86 a 3.2 mg/L y las de As variaron de 8.5 a 331 µg/L. Se concluyó que los residentes están en riesgo de desarrollar efectos sistémicos crónicos debido a As y F⁻, (se habla de la prevalencia de fluorosis dental) y cáncer debido a la ingestión de As en el agua.

3.2 Marco Teórico

A lo largo de esta sección, se presenta el marco teórico necesario para comprender las metodologías de evaluación de riesgo a la salud humana asociadas con la contaminación por NO₃⁻, F⁻ y As en el agua. Se abordan aspectos clave como la química, geoquímica y toxicología de cada uno de estos contaminantes, proporcionando un análisis detallado de sus características necesarias para entender su comportamiento en el acuífero y realizar una caracterización correcta del riesgo.

3.2.1 Metodologías de Evaluación de Riesgo a la Salud Humana

Las evaluaciones de riesgo para salud humana (ERS) a partir del empleo de metodologías científicas en sitios contaminados surgen alrededor de la década del 80s. La Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y la Agencia para las Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), generaron opciones metodológicas en respuesta a las leyes que se establecieron en el país respecto estudiar áreas contaminadas con elementos tóxicos (US.EPA, 2004). Actualmente cuentan con muchas guías de evaluación disponibles gratuitamente en sus páginas oficiales, técnicamente funcionan como metodología y muchas de ellas son citadas en este trabajo.

El proceso de análisis o evaluación del riesgo implica la aplicación de métodos científicos y técnicos analíticos para comprender la naturaleza y las implicaciones de un riesgo específico. Este enfoque permite calcular la probabilidad de que ocurra un evento adverso y la magnitud de sus consecuencias, proporcionando así las herramientas necesarias para su gestión eficaz (NRC, 1983; 1994). En otras palabras, se trata de una metodología que se fundamenta en el uso sistemático de la información disponible para determinar la frecuencia y el impacto

potencial de un evento adverso (Standards Australia and Standards New Zealand, 1999).

La fase final de la evaluación se conoce como caracterización del riesgo. En este paso del proceso, se sintetizan los juicios científicos acerca de la existencia, magnitud y efectos adversos asociados a un nivel específico de exposición a una fuente de peligro (ACS, 2001). Esta etapa implica la presentación de los hallazgos de la evaluación a los responsables de la toma de decisiones, incluyendo discusiones sobre incertidumbres, áreas de conflicto, estimaciones, extrapolaciones, inferencias y opiniones (ACS, 2001). La caracterización del riesgo proporciona los elementos necesarios para la toma de decisiones por parte de los órganos reguladores o administrativos, representando así el punto de partida para la gestión del riesgo que, de conjunto con la comunicación del riesgo, se considera otra etapa en las ERS (NRC, 1983; 1994).

Aunque estas metodologías son muy útiles, en mayor o menor grado se enfrentan a incertidumbres. La Organización Panamericana de la Salud (Díaz-Barriga, 1999) encabezó un análisis crítico de las metodologías existentes para mejorarlas y consiguió disminuir el grado de incertidumbre a través del uso de biomarcadores de exposición y de efecto. Ejemplos de estos biomarcadores de efecto o de daño son la actividad de enzimas (como las colinesterasas en pacientes expuestos a insecticidas organofosforados; Joshaghani et al., 2007); la apoptosis (en niños expuestos al DDT; Pérez-Maldonado et al., 2004) y la disminución del coeficiente intelectual (en niños expuestos a plomo; García-Vargas et al., 2001; Canfield et al., 2003).

Para el caso de América Latina y otros países en desarrollo, resulta costoso aplicar estos métodos (Ilizaliturri et al. 2009). Lo que se suele hacer es realizar la evaluación a través de indicadores sociales, ambientales y de salud, seleccionándolos a partir de un análisis detallado de indicadores ya existentes y ampliamente utilizados (Eyles & Furgal, 2000; CONAPO, 2000; WHO, 2000; OPS-WHO 2000, 2001; SSA-PRASA, 2001; DGSA, 2002; PNUMA-OPS, 2003). Sin embargo, en la última década se ha introducido aún más el empleo de ERS basadas en escenarios propuesto por la US.EPA (Peluso, 2005).

Inicialmente, las metodologías de ERS solían adoptar un enfoque determinista, que era conservador al considerar el valor más alto del rango de la distribución para cada variable. En otras palabras, cada término del modelo numérico se representaba finalmente por un único

número máximo. Aunque este enfoque era operativamente simple, a menudo conducía a sobreestimaciones al multiplicar continuamente los valores máximos (Peluso, 2005).

Por otro lado, las metodologías de evaluación de riesgo probabilísticas (ERP) han surgido como una alternativa más avanzada. Estas metodologías tienen en cuenta tanto la incertidumbre como la variabilidad de cada término del modelo. En lugar de trabajar con un único valor representativo para cada término del modelo analítico, las ERP operan utilizando distribuciones de valores para cada uno de ellos. Mediante el uso de técnicas de muestreo estocástico, como Monte Carlo, se genera una distribución de valores que refleja la influencia combinada de la variabilidad y la incertidumbre de cada parámetro individual del modelo cuantitativo (Peluso, 2005).

Aunque es muy cierto que las evaluaciones probabilísticas no incurren en sobreestimaciones del riesgo tan significativas como la evaluación determinística, se pudiese decir que son una estimación probabilística puntual del riesgo. Lo que significa que se obtiene una caracterización del riesgo individual o poblacional para un único punto en el espacio. Lograr una caracterización o interpolación de esta a un área o vincularla a los SIG, es uno de los puntos a crecer de las ERS (Peluso, 2005).

3.2.2 Resumen de características del NO_3^-

Se proporciona un resumen de las propiedades del NO_3^- en relación con su química, geoquímica y toxicología, esenciales para el correcto desarrollo del estudio pertinente. Se examina cómo interactúa en el entorno natural y se evalúan los posibles riesgos para la salud humana en situaciones de exposición prolongada o a concentraciones elevadas.

3.2.2.1 Química del NO_3^-

Son compuestos que contienen el anión NO_3^- en el caso de sales inorgánicas, o el grupo nitro, $-\text{ONO}_2$, en derivados orgánicos. Por ejemplo, el nitrato de sodio (NaNO_3) y el nitrato de potasio (KNO_3) son las sales más abundantes en la naturaleza. El anión NO_3^- representa la forma más oxidada del nitrógeno (N), finalmente accesible en su ciclo biológico. El N atmosférico experimenta transformaciones por efecto de rayos o acción microbiana, convirtiéndose en NH_4^+ y NO_3^- , ambos solubles en agua y asimilables por las plantas (Lifedar, 2020).

Todos los NO_3^- inorgánicos, incluidos los metálicos y el amonio (NH_4NO_3), son solubles en agua debido a la alta afinidad de las moléculas de agua por el anión NO_3^- y a la relativa inestabilidad de las redes cristalinas de estos compuestos (Lifedar, 2020).

3.2.2.2 Geoquímica del NO_3^-

Aunque los niveles bajos de NO_3^- están naturalmente presentes en el agua potable, diversas fuentes incrementan los niveles de manera perjudicial. Estos NO_3^- se disuelven fácilmente y no se retienen en el suelo, lo que facilita su entrada en las fuentes de agua subterránea. Una vez en el agua, el NO_3^- no se evapora y permanece hasta ser absorbido por plantas u otros organismos. Por lo que se encuentran en los suelos, en los tejidos vegetales y, sobre todo, en mares y depósitos salinos como los de salitre ubicados en Chile (Lifedar, 2020).

Los NO_3^- y NO_2^- son compuestos químicos con una variedad de aplicaciones, como fertilizantes, rodenticidas y conservantes de alimentos. Por lo general, se presentan en forma de polvo blanco o cristalino cuando están secos. Estos compuestos son productos metabólicos de la digestión microbiana de desechos que contienen nitrógeno, como las heces animales o de los fertilizantes nitrogenados. El NaNO_3 y KNO_3 se utilizan como fumigantes en la erradicación de roedores, mientras que el nitrito de sodio se emplea como aditivo alimentario para conservar alimentos (US.EPA, 2007).

En los suelos, los fertilizantes y los vertidos residuales que contienen nitrógeno orgánico se descomponen inicialmente para producir amonio (NH_4^+), que luego se oxida para formar nitrito (NO_2^-) y, finalmente, nitrato (NO_3^-). Una fracción de este nitrato es absorbida por las plantas, que lo utilizan en la síntesis de proteínas vegetales, mientras que el excedente puede filtrarse hacia las aguas subterráneas. Este proceso contribuye a la acumulación de nitratos en el suelo y, posteriormente, en el agua subterránea, aumentando así el riesgo de contaminación y sus posibles efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente. Una vez en el agua producto a su estabilidad química suele acumularse (Antón & Lizaso, 2001).

3.2.2.3 Toxicología del NO_3^-

Como efectos toxicológicos, se ha observado una disminución en la oxigenación de la hemoglobina, conocida como metahemoglobinemia, después de la exposición al consumo de agua contaminada con NO_3^- y NO_2^- , también denominada "síndrome del bebé azul" (Fig.3.1) debido a los síntomas cianóticos que resultan de la reducción en la oxigenación de la sangre. Este síndrome es especialmente preocupante en bebés menores de 4 meses, aunque también puede ocurrir en grupos de mayor edad. La metahemoglobinemia grave puede tener consecuencias como el coma o la muerte (US.EPA, 2007).



Figura 3.1. Fotografía de un infante con síndrome de bebe azul o metahemoglobinemia. (Tomada de internet, accesible en SÍNDROME DEL BEBÉ AZUL "el síndrome también se conoce como tetralogía de Fallot" | PROFESOR DE CMS EDGAR MAGALHÃES GOMES (cms-edgarmagalhaesgomes.blogspot.com))

Además, se han observado otros efectos adversos para la salud luego de la exposición fetal a niveles elevados de NO_3^- en el agua potable, incluyendo el retraso del crecimiento intrauterino, una mayor incidencia del síndrome de muerte súbita del lactante, defectos cardíacos y un mayor riesgo de defectos del sistema nervioso. Además, se ha señalado que el consumo materno o infantil de carnes que contienen nitritos puede aumentar la incidencia de tumores cerebrales en los niños (US.EPA, 2007).

Algunos estudios también han reportado otros efectos adversos para la salud posiblemente asociados con la exposición a NO_3^- en niños, como una mayor incidencia de diabetes infantil, diarrea e infecciones recurrentes del tracto respiratorio. En adultos, la exposición crónica puede causar micción frecuente y hemorragia del bazo. La exposición aguda por ingestión

de dosis altas puede ocasionar dolor abdominal, debilidad muscular, sangre en las heces y la orina, desmayos e incluso la muerte (US.EPA, 2007).

La US.EPA ha concluido que existe evidencia contradictoria en la literatura sobre si la exposición a NO_3^- o NO_2^- está asociada con el cáncer en adultos y niños. Se han estudiado varios tipos de cáncer, como el linfoma no Hodgkin, cánceres de estómago y gástricos en adultos, así como tumores cerebrales, leucemia y cánceres de nasofaringe en niños, pero no se han encontrado resultados concluyentes. En cuanto a la carcinogenicidad, la IARC de la WHO ha clasificado a los NO_3^- y NO_2^- como una prioridad para la próxima revisión de su posible carcinogenicidad cuando son ingeridos (US.EPA, 2007).

3.2.3 Resumen de características del F^-

Se presenta un resumen de las características de los F^- en términos de su química, geoquímica y toxicología necesarias para la caracterización en el área de estudio. Se analizan su comportamiento en el medio ambiente y los riesgos que representa para la salud humana en caso de exposición prolongada o a concentraciones elevadas.

3.2.3.1 Química del F^-

El F^- puede existir en diversas formas químicas, dependiendo de los elementos con los que está combinado. Por ejemplo, el fluoruro de sodio (NaF) y el fluoruro de calcio (CaF_2) son dos compuestos comunes. La estructura química de un fluoruro afecta sus propiedades y su comportamiento en el medio ambiente.

En su mayoría, los compuestos de fluoruro tienen puntos de ebullición muy altos. Por ejemplo, el fluoruro de sodio (NaF) tiene un punto de ebullición de aproximadamente $1,700^\circ\text{C}$, mientras que el fluoruro de calcio (CaF_2) se descompone antes de fundirse a altas temperaturas. Lo que significa que se necesitan temperaturas muy altas para que pase de estado líquido a vapor. De igual manera presentan puntos de fusión extremadamente altos, en el rango de 900 a 1500°C . Debido a su naturaleza iónica son altamente solubles en agua y esta es una característica común de los compuestos fluorados (ATSDR, 2024).

Tienden a acumularse en diferentes áreas y medios físicos porque son muy estables y no se degradan significativamente en el medio ambiente a condiciones ambientales normales. La bioacumulación en organismos, generalmente, no es una preocupación importante ya que,

los fluoruros tienden a excretarse fácilmente del cuerpo y no se acumulan significativamente en la cadena alimentaria (ATSDR, 2024).

3.2.3.2 Geoquímica del F^-

El F^- es un elemento común en la corteza terrestre (el 13vo elemento más abundante). Las principales formas en que se encuentra en el agua subterránea son a través de las rocas que contienen flúor, como las criolitas, y rocas sedimentarias. También se puede encontrar en fluorapatitas provenientes de rocas ígneas y metamórficas. El mecanismo responsable de esta contaminación es la desorción desde rocas naturales, donde los iones son liberados al medio ambiente durante el proceso de meteorización, disolviendo los minerales de las rocas.

Las rocas ultramáficas deficientes en sílice (SiO_2) tienen un contenido de F^- relativamente bajo (100 mg/kg), mientras que las rocas intermedias tienen una concentración promedio de alrededor de 400 mg/kg y las rocas ígneas félsicas, que contienen altas concentraciones de SiO_2 , tienden a tener aún mayores concentraciones (alrededor de 1000 mg/kg). El F^- tiende a asociarse con las micas en las rocas ígneas, tiene una fuerte asociación con los fosfatos en minerales primarios y secundarios, y se adsorbe en arcillas e hidróxidos de aluminio, productos secundarios de la intemperie (Wedepohl, 1978).

Fuentes de contaminación incluyen las descargas de industrias de aluminio, fosfatos, carbón, fertilizantes, cerámica, acero, petróleo, vidrio y semiconductores. También se presenta en la incineración de residuos municipales como plásticos y textiles fluorados, así como en los lodos de desecho que contienen difluoruro de calcio, generando emisiones de ácido fluorhídrico. A pesar de la existencia de diversas fuentes antropogénicas, la principal causa de contaminación de las aguas subterráneas es de origen geogénico (WHO, 2018).

Las condiciones geoquímicas controlan en gran medida la concentración de F^- en los sistemas de acuíferos. La figura 3.2 muestra los procesos geoquímicos que controlan su solubilidad. El diagrama “A” muestra las condiciones de la precipitación de la fluorita, ilustra la dependencia de la concentración de F^- en la concentración de Ca^{2+} en un sistema donde la precipitación de fluorita $CaF_2(s)$ controla la cantidad de F^- disuelto.

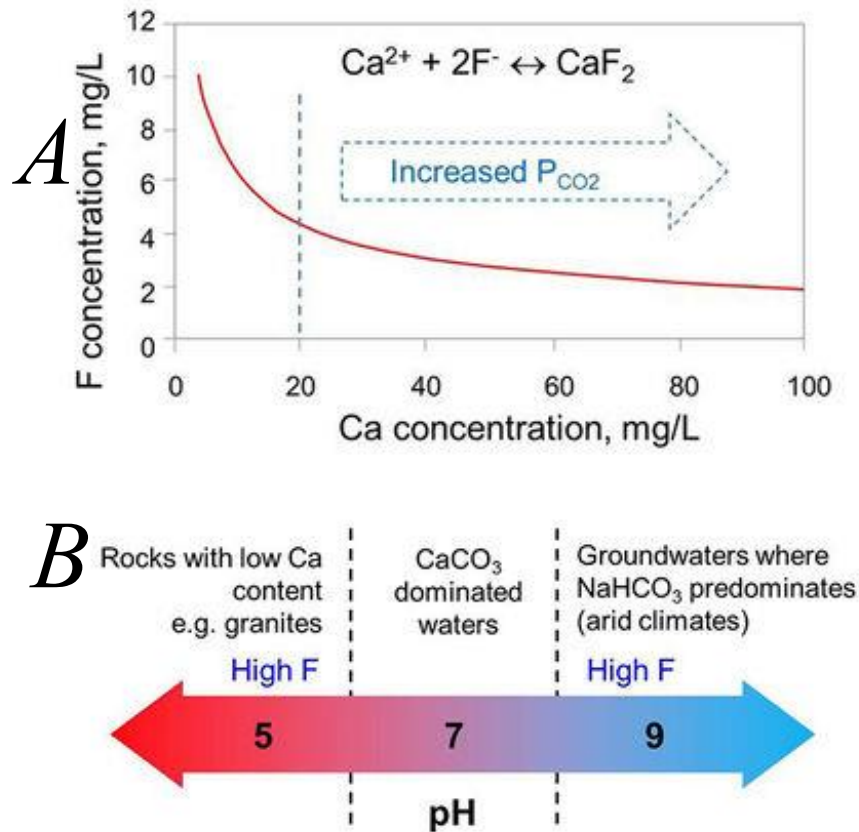


Figura 3.2. Diagrama de procesos geoquímicos que controlan la solubilidad del fluoruro. a) La precipitación de fluorita. b) La influencia del pH. (Tomado de Amini et al., 2008b).

Suponiendo que la fuente de calcio sea la calcita a una P_{CO_2} atmosférica, se esperaría una concentración de calcio de 20 mg/L. Las concentraciones de calcio son más altas a mayores presiones parciales de CO_2 , lo que reduce aún más las concentraciones de F^{-} que pueden estar adicionalmente limitadas por la absorción en minerales sedimentarios. En sistemas con bajo amortiguamiento de pH y bajo pH, (Fig. 3.1 B) como en asociación con rocas félsicas de bajo contenido de Ca^{2+} , puede haber poco control del contenido de F^{-} disuelto. Por ejemplo, minerales ricos en fluoruro en rocas graníticas causan concentraciones elevadas de F^{-} disuelto en India y Sri Lanka (Amini et al., 2008).

3.2.3.3 Toxicología del F^{-}

El F^{-} tiene efectos beneficiosos en los dientes a bajas concentraciones, pero una exposición excesiva puede tener diversos efectos adversos, como fluorosis dental y esquelética, cuya gravedad depende del nivel y la duración de la exposición (Gazzano et al., 2010). A nivel mundial, se estima que 200 millones de personas están en riesgo de fluorosis, sin embargo,

datos incompletos hacen que la cuantificación precisa de la carga global de salud de la fluorosis sea imposible (Fewtrell, 2006).

La exposición infantil a concentraciones de F^- en el agua potable que superen el límite de referencia de la WHO de 1.5 mg/L puede llevar a la fluorosis dental, una condición caracterizada por manchas y agujeros en los dientes (Fig. 3.2). La fluorosis dental ocurre en niños pequeños mientras el esmalte dental se está desarrollando (NRC, 2006). Los adultos con fluorosis dental deben haber estado expuestos a altas concentraciones de F^- en su infancia temprana. Los síntomas de fluorosis dental leve son la aparición de estrías o parches blancos en el esmalte dental, mientras que el manchado amarillo y marrón, los agujeros y el astillamiento del esmalte dental son síntomas de fluorosis más severa (Armienta et al., 2020).

La exposición prolongada a altas concentraciones de fluoruro durante varios años aumenta el riesgo de desarrollar fluorosis esquelética incapacitante. Esta condición se caracteriza por dolor y rigidez en la columna vertebral y las articulaciones, acompañados de un aumento de la densidad ósea (osteoesclerosis). En sus etapas avanzadas, surgen deformidades incapacitantes de la columna vertebral y las articulaciones, junto con defectos neurológicos, atrofia muscular y parálisis (Oszvath, 2009; ver Figura 3.3).



Figura 3.3 Fotografía de fluorosis dental (A) y esquelética (B) (Tomado de ATSDR, 2023).

Estudios sobre fluorosis ocupacional y endémica han demostrado que la extensión de los síntomas está relacionada con la duración y el nivel de exposición, y que la fluorosis esquelética es al menos parcialmente reversible durante varios años (Grandjean, 1982; Krishnamachari, 1986; Susheela & Bhatnagar, 2000).

Además de estos síntomas más evidentes, hay otros agrupados bajo el término "fluorosis no esquelética". La fluorosis no esquelética incluye una disminución informada en la capacidad cognitiva (medida por pruebas de Coeficiente Intelectual), letargo, una capacidad deteriorada para concentrarse y posiblemente incluso el inicio de la demencia (USRC, 2006). Si estos efectos pueden deberse a cambios enzimáticos o a una función deteriorada de la glándula tiroides no está claro.

El F^- también puede perturbar el sistema endocrino, actuando como inhibidor de las secreciones de las glándulas paratiroides, que regulan las concentraciones extracelulares de calcio y fosfato. También se han informado posibles efectos en los sistemas gastrointestinal, renal, hepático e inmunológico (USRC, 2006). Ha habido dificultades para demostrar que los efectos observados en la salud (en estudios científicos) sean el resultado de la ingesta elevada de fluoruro, y se han recomendado estudios epidemiológicos más rigurosos.

Es importante señalar que la gravedad de estos efectos dependerá de la concentración de fluoruros en el agua potable, la duración de la exposición y otros factores individuales. La fluorosis dental es el efecto más común y menos grave, mientras que la fluorosis esquelética avanzada y otros efectos graves son más infrecuentes y generalmente requieren exposiciones crónicas a concentraciones significativamente elevadas de fluoruros en el agua potable.

3.2.4 Resumen de características del As

Se presenta un resumen detallado de las características del As en términos de su química, geoquímica y toxicología. Se analizan su comportamiento en el medio ambiente y los riesgos que representa para la salud humana en caso de exposición prolongada o a concentraciones elevadas.

3.2.4.1 Química del As

El As es un metaloide, lo que significa que tiene propiedades intermedias entre los metales y los no metales. Posee una amplia gama de propiedades físicas y químicas, que lo convierten

en un contaminante ambiental importante. Existe en varias formas químicas, siendo las más comunes el arseniuro (As^{3-}), el arsenito (As^{3+}) y el arsenato (As^{5+}). Su estructura química afecta su comportamiento en el medio ambiente y su toxicidad, como se verá a continuación (ATSDR, 2024).

Tiene un punto de ebullición relativamente alto de aproximadamente 613°C , por lo que se necesita una temperatura significativamente alta para que pase de estado líquido a vapor. No es una sustancia que se degrade fácilmente en el medio ambiente, por lo que puede persistir durante largos períodos. Esto contribuye a su acumulación en diferentes áreas y medios físicos (ATSDR, 2024).

Puede disolverse en agua en diferentes formas químicas dependiendo de las condiciones de pH y oxidación, siendo más soluble en agua en forma de arsenito (As^{3+}) y menos soluble en forma de arsenato (As^{5+}). Es conocido por su capacidad de bioacumulación en organismos, especialmente en ciertas especies de peces y mariscos. Esto puede llevar a niveles elevados de arsénico en la cadena alimentaria (ATSDR, 2024).

3.2.4.2 Geoquímica del As

El As es un elemento muy común en la atmósfera, en rocas y suelos, en la hidrosfera y la biosfera. Es movilizado al medio ambiente tanto por procesos naturales como la meteorización, actividad biológica y las emisiones volcánicas; así como por procesos antropogénicos. Aparece como un constituyente principal en más de 200 minerales (As nativo, arseniuros, sulfuros, óxidos, arseniatos y arsenitos). Aunque apenas una docena de estos son relativamente frecuentes resulta que también puede encontrarse como elemento traza o en sustitución isomórfica en algunos sistemas cristalinos de minerales más abundantes (ATSDR, 2024).

Las concentraciones más altas de As suelen encontrarse en sulfuros como la pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2), galena (PbS) y marcasita (FeS_2), donde sustituye al azufre en la estructura cristalina. En estos minerales, su contenido puede superar el 10% en peso del mineral (Baur & Onishi, 1969). La pirita es el sulfuro más común en la naturaleza, ya que puede formarse en ambientes hidrotermales y en medios sedimentarios de baja temperatura con condiciones reductoras. Esto garantiza que se encuentre en una amplia variedad de

entornos, incluyendo ríos, lagos, fondos marinos y acuíferos, donde puede incorporar As en su estructura. Además, puede oxidarse y liberar As debido a las variaciones en las condiciones del medio. Otros minerales donde se puede encontrar As en concentraciones significativas son los óxidos y oxihidróxidos, especialmente los de hierro, y en menor medida los de manganeso y aluminio. En estas fases minerales, el As puede formar parte de la estructura o estar adsorbido en su superficie, siendo esta última el mecanismo más eficiente para mantenerlo en la fase sólida. Los fosfatos son otro grupo mineral que puede contener concentraciones relativamente altas, como en el apatito (ATSDR, 2024).

El As puede sustituir a Si^{4+} , Al^{3+} , Fe^{3+} y el Ti^{4+} , por lo que de esta manera se concentra en muchos minerales formadores de rocas, aunque en concentraciones muy bajas. La mayoría de los silicatos contienen alrededor de 1 ppm o menos (Baur & Onishi, 1969) y los carbonatos (calcita, dolomita y siderita) normalmente tienen menos de 10 ppm (Boyle & Jonasson, 1973). Las concentraciones que alcanza en rocas ígneas son bajas, por lo general, inferiores a 5 ppm (Smedley & Kinniburgh, 2002); con pocas diferencias entre los distintos tipos litológicos. A pesar de esto, determinadas rocas de naturaleza muy reactiva como las cenizas volcánicas de grano fino, pueden liberar cantidades suficientemente altas de As a las aguas.

Las rocas metamórficas también muestran contenidos bajos que no suelen superar los 5 mg/L, excepto las metapelitas, que tienen un contenido medio de 18 mg/L (Boyle & Jonasson, 1973). Las rocas sedimentarias presentan una mayor variabilidad en cuanto a contenido de As, con promedios y rangos algo superiores a los de las rocas ígneas o metamórficas, sobre todo las lutitas, con valores medios de 28,40 mg/L (valor *NASC*, *North American Shales Composite* de Gromet et al, 1984).

El As puede tener un origen orgánico. Se encuentra una vez que ha sido asimilado por algún organismo vivo capaz de metabolizarlo, como un productor primario. Este tipo de As se puede encontrar en diferentes partes de las plantas regadas con agua contaminada o en partes del cuerpo de animales herbívoros o consumidores de agua contaminada. Aunque este resulta menos dañino a la salud humana que el inorgánico (ATSDR, 2024). También se asocia su origen en aguas subterráneas con procesos hidrotermales en zonas geológicas con manifestaciones hidrotermales, como volcanes, depósitos minerales o fallas geológicas. Estos compuestos pueden infiltrarse en los acuíferos en áreas geológicas específicas, como

regiones volcánicas, depósitos minerales ricos en estos elementos, y a lo largo de fallas geológicas (Boyle & Jonasson, 1973).

El As inorgánico se halla en las aguas naturales como especie disuelta, la cual se presenta por lo común como oxianiones con arsénico en dos estados de oxidación: arsénico trivalente [As (III)] y arsénico pentavalente [As(V)], y con menos frecuencia como As (0), As(-I) y As(-II). As(V) aparece como H_3AsO_4 y sus correspondientes productos de disociación (H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} y AsO_4^{3-}). El As (III) aparece como H_3AsO_3 y sus correspondientes productos de disociación (H_4AsO_3^+ , H_2AsO_3^- , HAsO_3^{2-} y AsO_3^{3-}).

Aunque tanto el As(V) como el As (III) son móviles en el medio, es precisamente el As (III) el estado más lábil y biotóxico. Es crucial comprender las diferentes especies de arsénico, ya que su toxicidad varía según la especie de arsénico con la que tratemos. El estado de oxidación, y por ende su movilidad, están principalmente influenciados por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH (véase Figura 3.4 y 3.5). De hecho, el As es singular entre los metaloides pesados y elementos formadores de oxianiones debido a su sensibilidad a movilizarse en los valores de pH típicos de las aguas subterráneas (pH 6.5-8.5) (Lillo, 2005).

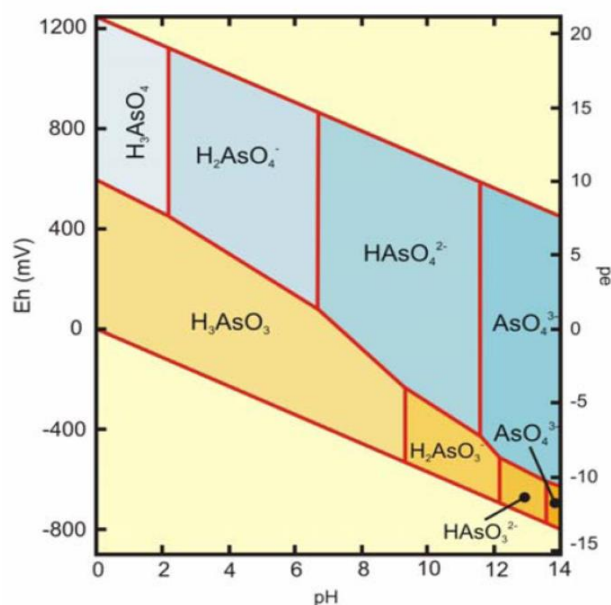


Figura 3.4. Diagrama de Eh-pH de especies acuosas de As en el sistema As-O₂-H₂O a 250C y 1 bar de presión total. (Tomado de Lillo, 2005).

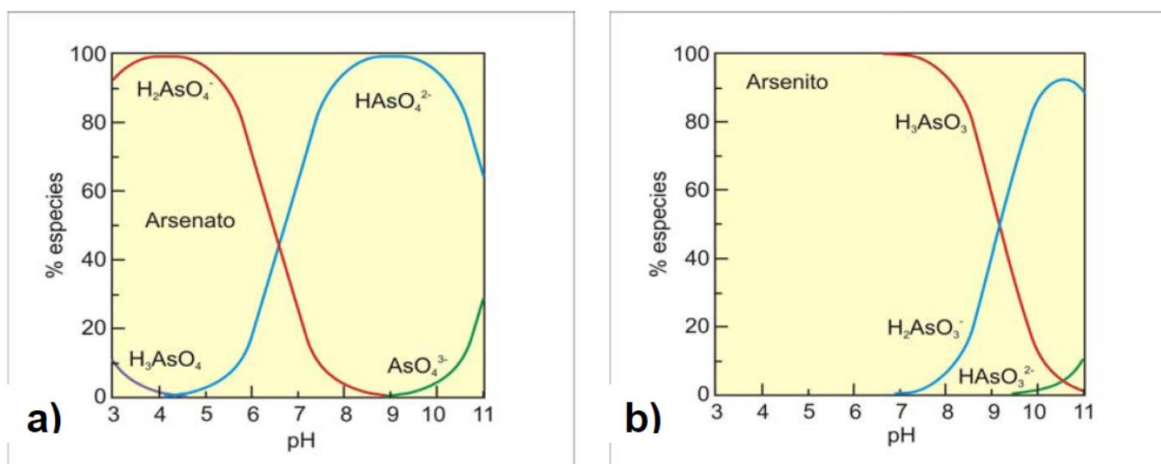


Figura 3.5. Diagrama de ocurrencia de especies acuosa de As. a) Especies de As (V) como función del pH. b) Especies de As (III) como función del pH. (Tomado de Lillo, 2005).

Como aproximación, y sin tener en cuenta otros factores como el contenido en materia orgánica, en condiciones oxidantes, el estado As(V) predomina sobre As (III) (Brookins, 1988; Yan et al., 2000).

3.2.4.3 Toxicología del As

Cuando se trata del arsénico (As), la ingestión y la inhalación (de su forma gaseosa presente en la atmósfera) son las vías más comunes y, en la mayoría de los casos, son las que conducen a la enfermedad. La exposición dérmica también puede provocar efectos negativos en la salud humana, aunque en menor medida. Aunque hay evidencia en la literatura ocupacional que menciona efectos tóxicos posteriores a la exposición dérmica al tricloruro de arsénico o al ácido arsénico en la piel de algunos trabajadores (Garb & Hine, 1977), todavía no se sabe lo suficiente sobre la forma química, las condiciones de absorción y la cinética para hacer una declaración definitiva sobre la absorción cutánea en poblaciones específicas (NAS, 1977).

La toxicidad del As depende del estado de oxidación, estructura química, solubilidad en el medio biológico, la dosis asimilada por el organismo y la vía de exposición. La escala de toxicidad del arsénico decrece en el siguiente orden: Arsina > As^{+3} inorgánico > As^{+3} orgánico > As^{+5} inorgánico > As^{+5} orgánico > compuestos arsenicales y arsénico elemental

(Castro de Esparza et al., 2006). De forma general, los compuestos inorgánicos resultan más dañinos a la salud humana.

En relación con los efectos carcinogénicos, han sido identificados la relación entre As en el agua y el aumento en la presencia y mortandad por cánceres de vejiga, pulmón, riñón y cáncer hepático en la población expuesta (Fig. 3.6). La evaluación del As dentro del programa IRIS de la EPA lo clasifica en el Grupo A, cancerígeno para los seres humanos. El documento fue publicado por primera vez en 1988 y revisado por última vez en 1995 (US.EPA, 2023). También es clasificado como cancerígeno de Tipo I por la IARC (Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, por sus siglas en inglés) (IARC, 2004). Otros organismos como la WHO y el NCI (Instituto Nacional del Cáncer por sus siglas en inglés, de USA) lo clasifican como un cancerígeno humano confirmado (NCI, 2015 y WHO, 2022).

Numerosos estudios de dosis-respuesta sugieren una relación significativa entre la concentración de As en el agua potable y el riesgo de desarrollar cáncer, incluidos el cáncer de piel y varios cánceres internos. Según la IARC y el NRC, la asociación más fuerte entre la exposición crónica al As y el cáncer se da con los cánceres de piel, pulmón y vejiga. El cáncer de hígado (angiosarcoma), el de riñón, y otros tipos de cánceres presentan una fuerza limitada de asociación (IARC 2004 y NRC, 2000). Se han asociado con una mayor mortalidad por cáncer de pulmón, hígado, vejiga y riñón, así como con una mayor incidencia de cáncer de piel (US.EPA, 1998).

La WHO en su 4ta edición (WHO, 2011) establece un valor de referencia provisional 0.01mg/L de As en agua, porque el valor de referencia calculado está por debajo del nivel de cuantificación. Establecen que es un umbral más práctico debido a lo costoso y desafiante que sería alcanzar los 0.005mg/L de As en agua que recomiendan. Reconocen ampliamente su efecto tóxico y cancerígeno a la salud (WHO, 2011).



Figura 3.6. Fotografías de ejemplos de cáncer de piel causados por la ingestión prolongada de aguas con As en Bangladesh. (Tomado de ATSDR, 2023).

Entre los efectos adversos no carcinogénicos más comunes asociados a la ingestión de este metaloide se incluyen: cambios en la pigmentación de la piel, como hiperpigmentación e hipopigmentación, así como hiperqueratosis; daños al sistema cardiovascular; alteraciones renales y hepáticas; desarrollo de neuropatías periféricas y encefalopatías; y su capacidad como disruptor endocrino, relacionada con el desarrollo de diabetes (EPA, 2024).

Los efectos se manifiestan con lesiones de la piel (fig. 3.7) y trastornos neurológicos; provocando enfermedades cardiovasculares y pulmonares, además de cáncer. Los primeros síntomas suelen aparecer entre la pubertad y la edad adulta, aunque puede aparecer en edad escolar. Por ello la situación de Bangladesh fue considerada por Allan H. Smith como "el envenenamiento masivo poblacional más grande de la historia" (WHO, 2010).

Si la exposición al contaminante no cesa, éste sigue provocando daños conllevando problemas mayores. La figura 3.8 muestra ejemplos de la afectación sobre la piel conocida como arsenicosis.



Figura 3.7. Fotografías de efectos en la piel por exposición al As en el agua potable. A la izquierda, Mujer con despigmentación en las manos por envenenamiento con As. A la derecha, niño con manchas en el brazo y la mano causadas por el consumo de agua con As. (Tomado de ATSDR, 2023).



Figura 3.8. Fotografías de efectos tóxicos del As. A la izquierda un paciente que desarrolló hiperpigmentación severa posterior a la ingesta prolongada de agua contaminada con As. A la derecha, queratosis por As en las palmas de las manos de un paciente que consumió agua contaminada por un largo periodo. (Tomado de ATSDR, 2023).

La continua ingesta de agua contaminada con sales de As origina el "hidroarsenicismo crónico regional endémico" (HACRE), una condición común en muchas regiones del mundo. Por lo tanto, la presencia de arsénico en las aguas superficiales (ríos, lagos, embalses) y subterráneas, que pueden ser utilizadas para el consumo humano, representa una grave amenaza para la salud (US.EPA, 2024).

3.3 Marco conceptual

El principio de Lavoisier establece que la materia y la energía no pueden ser creadas ni destruidas, solo transformadas. Esto significa que cualquier forma o cantidad de materia o

energía que ingrese a un sistema, como un organismo vivo o un ambiente, debe acumularse, transformarse o salir de él. En el caso de un sistema abierto, la energía y la materia que entran o salen provienen de otros sistemas abiertos con los que está en constante intercambio. (Albert, 1985).

Cuando las formas de materia o energía pueden ser asimiladas, transformadas o eliminadas por los seres vivos o el entorno abiótico de manera continua, se puede considerar que existe una situación estable. Sin embargo, en la actualidad, debido al considerable aumento de las sustancias que ingresan continuamente al medio ambiente, en muchos casos se ha excedido la capacidad de los sistemas para transformarlas, o bien, los sistemas carecen de la capacidad para asimilar, transformar o eliminar esas sustancias, especialmente las sintéticas. Como resultado, se ha perturbado el equilibrio ambiental. Esta acumulación se denomina "contaminación". (Albert, 1985).

Generalmente, los efectos adversos ocurren cuando las sustancias no pueden eliminarse fácilmente del sistema y superan el nivel basal, o bien, cuando solo pueden moverse de un sistema a otro sin cambios, lo que conlleva una acumulación excesiva en un punto final. A las formas de materia que exceden las concentraciones naturales en un momento y sistema específicos y causan efectos adversos se les considera contaminantes "tóxicos". (Albert, 1985).

Los problemas graves surgen cuando la contaminación se extiende en el tiempo y el espacio, es decir, cuando aumenta el número y la diversidad de los sustratos contaminados y esta situación persiste durante períodos prolongados. En tales casos, se interrumpe el equilibrio ecológico y pueden detectarse efectos adversos de forma individual o simultánea, los cuales pueden ser acumulativos, de umbral o de interacción. Los "efectos acumulativos" se manifiestan cuando una sustancia causa un efecto adverso que por sí solo es imperceptible y luego se elimina del sistema. A menudo, la suma de estos pequeños efectos solo se hace evidente cuando el daño es irreversible (Lucio, 2011).

Los "efectos de umbral" ocurren por acumulación de la sustancia misma y se observan cuando se rebasa una cantidad que es característica de cada sustancia y cada sistema. Esta cantidad se conoce como umbral (Lucio, 2011). Por lo que se refiere a los "efectos de interacción", éstos se producen cuando dos o más sustancias interactúan entre sí, ya sea

químicamente para dar una nueva sustancia o biológicamente, causando en conjunto daños que no causarían por sí solas (Lucio, 2011).

Dependiendo de la naturaleza del contaminante, se distingue entre contaminación biológica, física y química. La "contaminación química" ocurre cuando una sustancia química específica se acumula en un sustrato en concentraciones que superan el nivel basal. Si la sustancia es sintética y no existe en la naturaleza, se denomina "xenobiótico". En el caso de que la sustancia sea natural pero su acumulación sea resultado de actividades humanas, se llama "antropogénica". Si la fuente no son actividades humanas, se trata de una contaminación química de origen natural y la sustancia se llama "geogénica" (Albert, 1985).

La "exposición" se refiere a las concentraciones o cantidad de una sustancia con la que entran en contacto los individuos o poblaciones, ya sea en un volumen de aire, agua o en una masa de suelo específica. Por otro lado, la "dosis" indica la concentración o cantidad de esa sustancia presente dentro del cuerpo de una persona u organismo expuesto (Albert, 1985).

El modo en que el elemento tóxico entra en contacto con el individuo es el principal determinante de los efectos tóxicos de una sustancia. Las vías de exposición más habituales incluyen la inhalación, la ingestión y el contacto dérmico (US EPA, 2020). (US.EPA, 2020). La US.EPA recopila datos relacionados con la capacidad de un compuesto en particular para ser tóxico, ya sea en términos de ser cancerígeno o no cancerígeno. Estos datos pueden derivar de una variedad de fuentes, que incluyen investigaciones epidemiológicas rigurosas, estudios clínicos, análisis de toxicología con animales de laboratorio, y también información complementaria obtenida a través de estudios realizados en entornos de laboratorio (in vitro) o comparaciones de estructura y actividad de diversas sustancias químicas.

La mayoría de los "índices de toxicidad" disponibles se han determinado utilizando observaciones de efectos críticos en experimentos, y estos se basan en las dosis administradas, no en las dosis efectivamente absorbidas por el organismo. En situaciones en las que es importante emplear dosis absorbidas, se requiere realizar una conversión de estos valores para que sean comparables con dosis administradas (EPA, 2020). Existen suficientes pruebas que indican que una proporción del 70 al 80% de los cánceres que afectan a la humanidad se pueden atribuir a factores ambientales (ATSDER, 2021). Por eso es crucial disponer de métodos apropiados para identificar y estudiar los agentes, así como evaluar el

riesgo que conllevan.

Aunque los “estudios epidemiológicos” de poblaciones expuestas son un elemento valioso para la detección de carcinógenos tienen numerosas desventajas. Entre ellas la larga duración y el costo, la multiplicidad de agentes de interferencia y, sobre todo, el que ponen en evidencia un riesgo cuando éste ya se ha producido (ATSDER, 2021). Se suele utilizar ensayos de carcinogénesis con animales cumpliendo requisitos establecidos. Se acepta que un resultado positivo en animales de la sustancia de estudio, aún a bajas dosis, debe considerarse como una fuerte indicación del potencial carcinógeno para el humano (Albert, 1985). A través de estos estudios se han catalogado diversas sustancias cuyo potencial carcinógeno se reconoce en la actualidad.

Es importante señalar que estos estudios presentan mucha incertidumbre. Las respuestas de los organismos pueden ser muy diferentes a las mismas dosis. En algunos casos basta una sola dosis del carcinógeno para que se produzca cáncer y entre la exposición a estos agentes y la aparición del tumor en general hay un tiempo de exposición sumamente largo (Albert, 1985).

Finalmente, el contacto de un organismo con un contaminante no garantiza que este pueda ingresar al cuerpo. Algunos metales, debido a sus propiedades fisicoquímicas, son incapaces de atravesar la barrera protectora de la piel, lo que funciona como una medida defensiva. En consecuencia, la mera presencia de un contaminante en el entorno plantea un riesgo teórico, pero no implica necesariamente una dosis interna o un efecto biológico (Lucio, 2011). Entonces, la dosis de exposición estimada (DEE) se refiere a la cantidad de un agente tóxico o xenobiótico que puede entrar en contacto con las barreras naturales de absorción del organismo, como los pulmones, la piel o el tracto gastrointestinal (Lucio, 2011).

La concentración se refiere a la cantidad de la sustancia tóxica en el medio circundante (como el aire, el agua, el suelo o los alimentos). El tiempo de exposición varía, pudiendo ser agudo (exposición a corto plazo, generalmente menos de un día), subagudo (exposiciones de uno a tres meses) o crónico (exposiciones a lo largo de un período prolongado, posiblemente durante toda la vida) (Lucio, 2011). Los patrones de actividad se relacionan con las prácticas y hábitos que pueden exponer a un individuo a una sustancia tóxica e incluyen la frecuencia de contacto y la cantidad de sustancia con la que se entra en contacto (EPA, 2020).

La noción de peligro a la salud humana se refiere a cualquier acto o fenómeno con el potencial de ocasionar daños o consecuencias no deseadas para los seres humanos. Esta definición, respaldada por el NRC en 1983 y 1994, también es denominada peligrosidad o amenaza en el contexto Iberoamericano, según lo señalado por Cendrero en 1997. Por otro lado, el concepto de riesgo se enfoca en comprender y cuantificar la gravedad de dicha amenaza. Al analizar el riesgo, se considera la fuente del peligro, su objetivo y la probabilidad de que el daño ocurra, así como la intensidad con la que puede manifestarse, conforme a lo indicado por el NRC en 1983 y 1994.

De acuerdo con la WHO (2018), el agua potable segura no representa ningún peligro significativo para la salud cuando se consume a lo largo de toda la vida, considerando las diversas vulnerabilidades que pueden surgir en diferentes etapas de esta.

Capítulo 4

MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se describen con detalle los procedimientos, técnicas y recursos utilizados para llevar a cabo la presente investigación. En esta sección, se abordarán los siguientes aspectos clave: la confección de la base de datos, que incluye la recopilación de información bibliográfica, campañas de muestreo, aplicación de encuestas y procesamiento de datos topográficos. Asimismo, se expondrá el análisis de la hidrodinámica y la hidrogeoquímica del acuífero que resultan en el Modelo Conceptual Hidrogeológico. Asimismo, se expone como se llevó a cabo la evaluación del riesgo a la salud humana y su gestión, incluyendo la identificación de rutas de exposición y la cuantificación de riesgos.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos planteados se definieron siete etapas metodológicas secuencialmente lógicas las cuales se presentan de forma esquemática en la Figura 4.1.

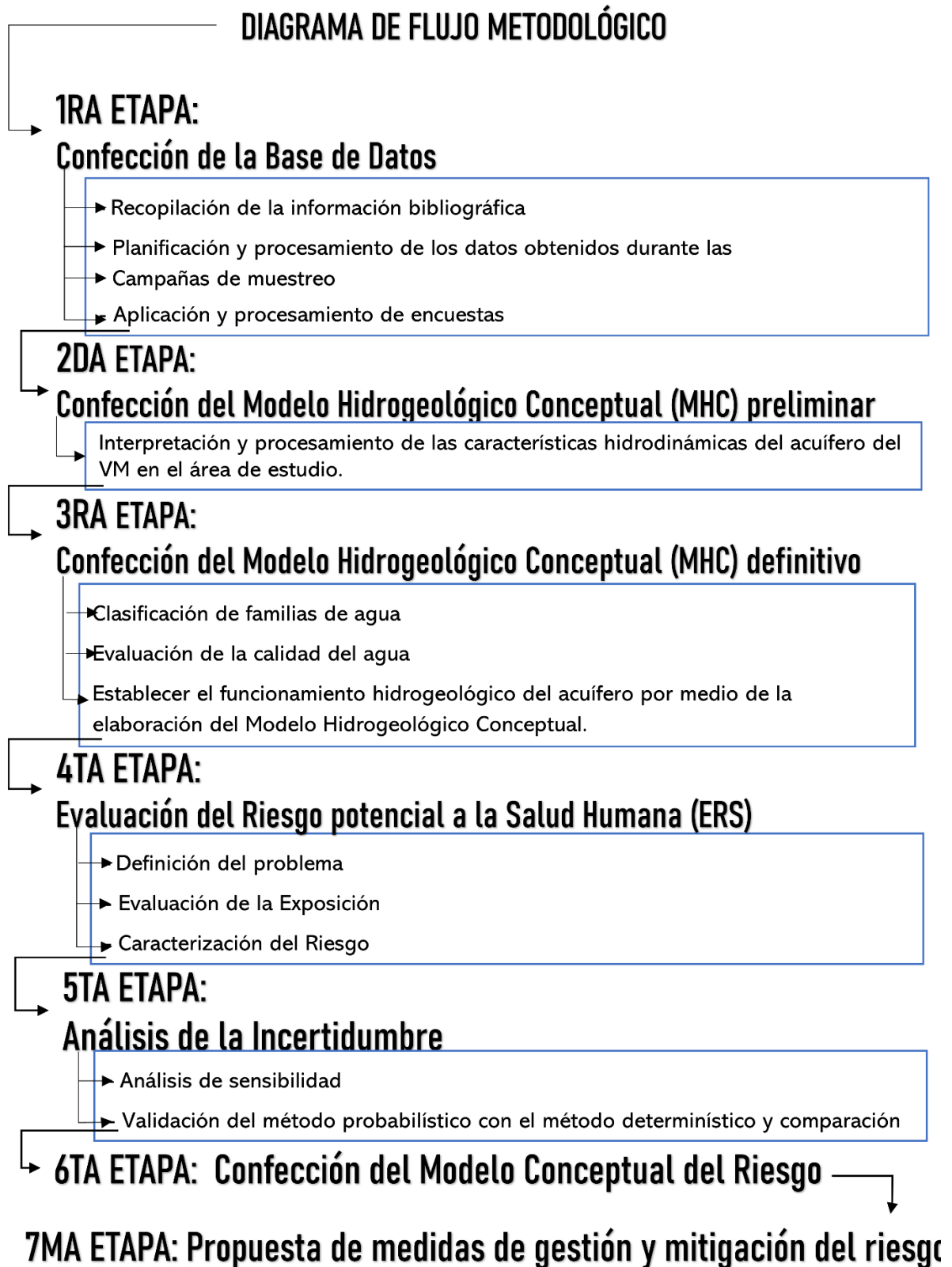


Figura 4.1. Diagrama de flujo metodológico

4.1 Confección de la base de datos

La base de datos con la que se desarrolló la presente investigación está constituida tanto por información bibliográfica preexistente, como por los resultados obtenidos a partir de las campañas de muestreo de noviembre del 2022 y de junio del 2023. Los resultados e información generada durante los trabajos de campo se obtuvieron en el marco del proyecto PRONAI 318998 debido a la vinculación de esta investigación al mismo.

4.1.1 Recopilación de información bibliográfica

Se realizó una recopilación de datos disponibles en los antecedentes para el área de estudio. Para obtener información sobre las características hidrogeológicas del acuífero se consultaron los datos de INEGI y la información generada en la Etapa 1 del proyecto PRONAI 318998 publicada en el informe final de esta primera etapa por Expósito Castillo et al (2022). De estas fuentes se pudo extraer la información necesaria para la elaboración de la cartografía temática primaria del acuífero presentada en el Capítulo 2 (uso de suelo, precipitación, temperatura, edafológico, hidrológico, geológico e hidrogeológico) y que constituye las bases para la interpretación del Modelo Conceptual Hidrogeológico del acuífero.

Entre los estudios consultados para obtener referencias sobre la calidad del agua se incluyen los muestreos llevados a cabo en el 2007 y publicados por Lesser-Carrillo y colaboradores en 2011, Lesser y Asociados, S.A. de C.V. en 2012, el trabajo de Marín Celestino y colaboradores en 2019 y el informe de la CONAGUA en 2019. Estos muestreos fueron realizados por laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA). En la tabla 4.1 se relacionan el tipo y la cantidad de muestreos realizados en cada uno de los municipios que conforman el área de estudio.

Los datos de estudios toxicológicos de donde se obtuvieron los parámetros y umbrales utilizados para la estimación del riesgo se tomaron de fuentes bibliográficas puestas a disposición del público por organizaciones gubernamentales y agencias internacionales que proporcionan información y datos valiosos en el ámbito de la seguridad química y la estimación del riesgo. Una relación de estas fuentes se ofrece en la tabla 4.2.

Tabla 4.1. Resumen del tipo y números de análisis químicos por municipios identificados en la literatura.

Municipios	Tipo y número de análisis					
	Fisicoquímico		Metales		Bacteriológico	
	2007	2012	2007	2012	2007	2012
Apaxco	2	-	2	-	4	-
Atitalaquia	7	5	14	5	17	5
Tula de Allende	12	6	6	6	15	6
Atotonilco de Tula	6	3	6	3	11	3

Tabla 4.2. Resumen de instituciones internacionales con bases de datos con información toxicológica sobre las sustancias químicas.

Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés), Programa Internacional sobre Seguridad Química (IPCS): Publica documentos conocidos como Environmental Health Criteria (EHC).
Agencia Medioambiental de EE. UU. (EPA): Ofrece la base de datos IRIS (Integrated Risk Information Service), que contiene informes toxicológicos sobre una amplia variedad de contaminantes.
Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU. (ATSDR): Publica Reseñas Toxicológicas (ATSDR Toxicological Profiles) y Declaraciones de Salud Pública (ATSDR Public Health Statements) que contienen información toxicológica sobre diversas sustancias y sirven de base para fichas resumidas (ToxFAQs).
Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC) de la WHO: Es una autoridad mundial en cuestiones relacionadas con el cáncer y proporciona recursos importantes, como las monografías del Programa de Evaluación de Riesgos Cancerígenos para la Salud Humana (IARC Monographs Programme on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans).
Agencia Federal Alemana de Medio Ambiente (Umweltbundesamt, UBA): Ha realizado estudios de toxicología y biología intensivos, a partir de los cuales ha desarrollado umbrales de riesgo relacionados con material biológico humano, como la sangre y la orina.

4.1.2 Campañas de muestreo

Se realizaron un total de dos campañas de muestreos en el marco del PRONAI 318998 donde fueron considerados tanto pozos, como manantiales fríos y manantiales termales. La primera campaña se desarrolló en la primera semana de noviembre de 2022 y la segunda con fecha en los días 16, 17 y 18 de junio del 2023. Los muestreos fueron realizados por el laboratorio Intertek Sustainability, el cual cuenta con reconocimiento legal de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), la Comisión Federal para la protección contra riesgos sanitarios (COFEPRIS) y CONAGUA.

En ambas campañas se tomaron datos in situ de pH, temperatura, conductividad eléctrica, TDS y potencial redox con el empleo de la sonda multiparamétrica HANNA modelo HI98194 (Fig. 4.2). Los muestreos se realizaron según lo establecido en la Norma Mexicana NOM

014-SSA1-1993. Los puntos muestreados, fueron localizados y ubicados para posterior georreferenciación con el empleo de herramientas como GoogleMap y GPS de la marca Garmin modelo GPSmap 60CSx (Fig. 4.2)



Figura 4.2. Collage de fotos de los trabajos desarrollados durante la campaña de muestreo con fecha junio del 2023.

En la primera campaña, se midieron las características fisicoquímicas y bacteriológicas de 20 pozos de uso público urbano en los municipios de: Apaxco (5 muestras), Tula de Allende (4 muestras), Atotonilco de Tula (5 muestras) y Atitalaquia (6 muestras). Para la elección de los puntos de muestreo se llevó a cabo en base a la exhaustiva revisión de la literatura desarrollada inicialmente, la distribución espacial en el área de estudio y en el interés de la población local para determinar la calidad del agua de los pozos que los abastece.

Para la segunda campaña, se realizó la visita a entidades municipales ubicadas en los municipios de Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tula de Allende y Apaxco, tales como: La Comisión de Agua y Alcantarillado del municipio de Tula de Allende (CAPyAT), Comisión de Agua y Alcantarillado del Sistema Valle del Mezquital (CAASVAM), Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Municipio de Atotonilco de Tula (CAASAT) y Comisión de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento del Municipio de Atitalaquia

Hidalgo (CAPASMAH). Estas actividades se llevaron a cabo con el fin de buscar el enlace con los responsables o autoridad correspondiente a fin de obtener permisos de acceso a los pozos y manantiales para la toma de muestras de agua (Fig. 4.2). A pesar de las gestiones, de los 21 puntos considerados inicialmente solo se pudo acceder a 20.



Figura 4.2. Collage de fotos tomadas durante las visitas a las instituciones para gestionar el acceso a los puntos en la red de muestreo.

Para la selección de los puntos muestreados durante esta segunda campaña se tuvo en cuenta varios criterios. Se identificaron los pozos y manantiales de uso público-urbano con problemas en la calidad del agua explotada, específicamente que excedieran el límite permisible de la norma NOM-127-2021, en SDT, Pb, SO_4^{2-} , As, Fe, F^- , NO_2^- , NO_3^- , coliformes totales y fecales, según la bibliografía y atendiendo a los resultados del muestreo propio anterior.

A raíz de esto se determinó el muestreo en 16 pozos y 4 manantiales. De los cuales 3 fueron en el municipio de Apaxco, 5 en Atitalaquia, 5 en Atotonilco de Tula y 8 en Tula de Allende. Producto a la cercanía, la importancia de los manantiales para validar el modelo conceptual y la relevancia social por el amplio caudal empleado para abastecer las comunidades cercanas

se midió también un manantial en la localidad de Tezontepec de Aldama.

También se efectuaron análisis de parámetros inorgánicos y bacteriológicos en los laboratorios de geoquímica de la UNAM-Centro Geociencias Juriquilla (Qro) y el Laboratorio de Calidad del Agua del IITCA. En la tabla 4.3 se resumen los parámetros evaluados en ambas campañas de monitoreo y sus respectivas unidades de medidas.

Tabla 4.3. Parámetros químicos y microbiológicos determinados en las dos campañas de muestreo.

Cationes (en mg/L)		Aniones (en mg/L)	Parámetros <i>in situ</i> (Unidad de medida)	Microbiológicos (en NMP/100 mL)
Ca ²⁺	Mn	HCO ₃ ⁻	pH	Fecales Echerichia Coli A
Mg ²⁺	Mo	SO ₄ ²⁻	CE (µs/cm)	
K ⁺	P	N-NO ₃ ⁻	T (°C)	
Na ⁺	Pb	N-NO ₂ ⁻	STD (mg/L)	
Al	Se	F ⁻	Redox (mV)	
As	Si	Cl ⁻	Salinidad (psu)	
B	Sr		Resistividad (ohm)	
Ba	Zn		Oxígeno disuelto (mg/L)	
Cu	Cr		Caudal (L/s)	
Li				

CE: conductividad eléctrica; T: Temperatura; STD: sólidos totales disueltos; Redox: potencial redox

4.1.3 Aplicación y procesamiento de encuestas

La encuesta aplicada (Anexo 8) se dividió en cuatro secciones. La sección A estuvo dirigida a recopilar información sobre las características de la captación. La sección B se enfocó en la etapa de almacenamiento del agua y sus características. La sección C abordó los temas de tratamiento y calidad del agua. La sección D se enfocó en conocer otra información de interés, como hábitos de los usuarios tales como si acostumbran a beberla o a ocupar filtros en las viviendas.

La entrevista fue aplicada de forma personal (Fig. 4.3) a la mayor autoridad presente en la captación durante los trabajos de campo de junio del 2023. Se aplicaron un total de 20 encuestas con el consentimiento de todas las partes involucradas. Los resultados fueron capturados en Access que es una herramienta poderosa en la gestión de bases de datos y permite exportar tablas en Excel.



Figura 4.3. Collage de fotos tomadas durante la aplicación de las encuestas en la campaña desarrollada con fecha de junio del 2023.

4.2 Hidrodinámica del acuífero. Confección del Modelo Hidrogeológico preliminar

La elaboración del modelo conceptual tiene como propósito identificar el funcionamiento del acuífero. Para ello se requieren conocer las características físicas del sitio como morfología, geología, hidrología superficial y subterránea, climatología, entre otras. La información que se integra en el modelo conceptual (Vélez, 2010) se detalla en la Figura 4.4.

La información requerida para la elaboración del MHC preliminar del funcionamiento del sistema se obtuvo, procesó y analizó con base en los trabajos previos de cartografía temática del área de estudio enumerada en el epígrafe 4.1 y del Capítulo 2 de la presente investigación, la información bibliográfica preexistente resumida en el Capítulo 3 y los trabajos realizados durante la primera etapa del PRONAI 318998. Para el desarrollo de dicho modelo se usaron las herramientas y programas especializados como son ArcGis (ArcMap, ArcScene), TerrSet, Qgis y Excel, para el tratamiento y análisis de datos.

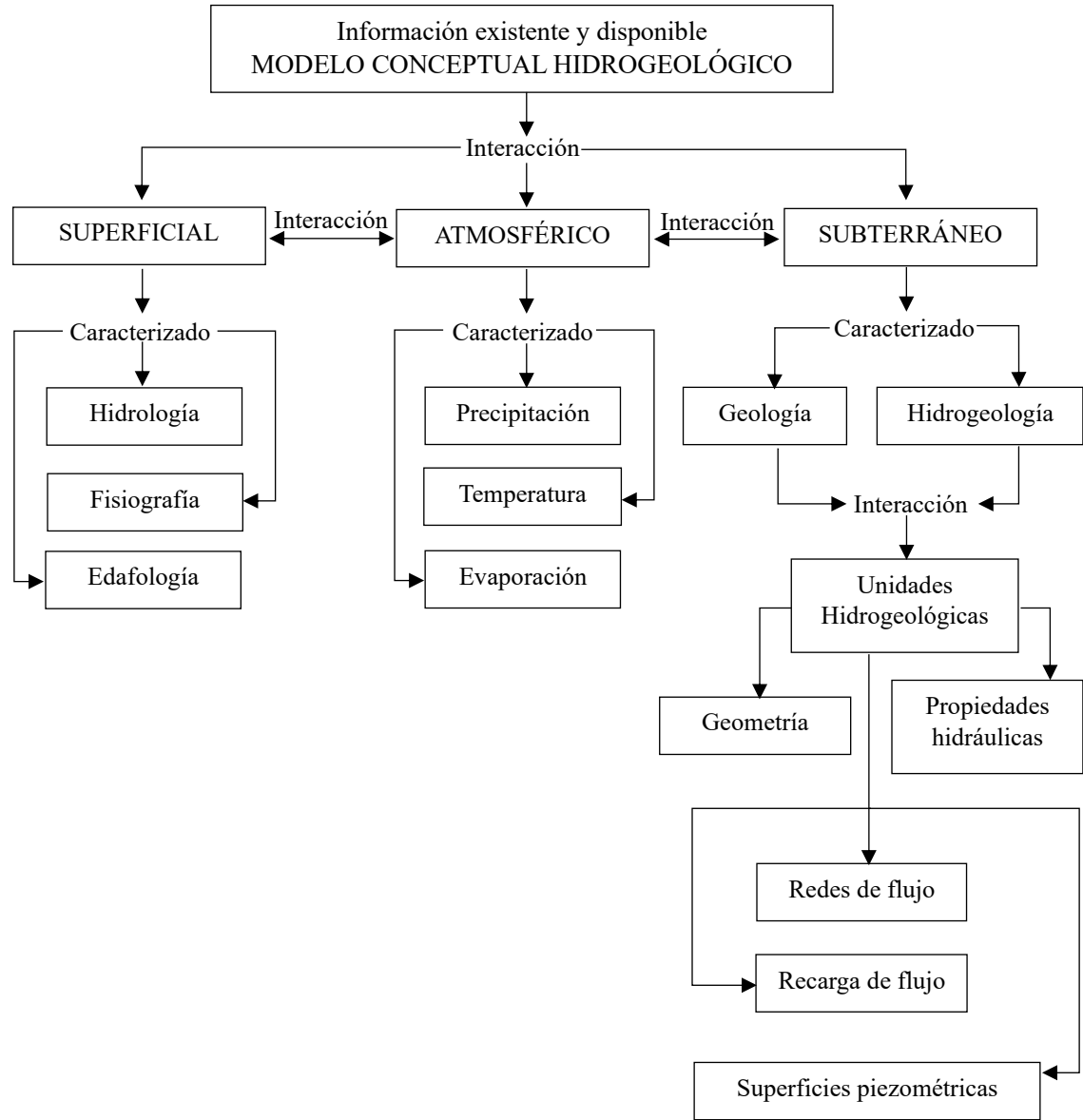


Figura 4.4. Diagrama metodológico para generar el modelo conceptual hidrogeológico del acuífero del VM (Modificado de Vélez, 2010).

4.3 Hidrogeoquímica del acuífero. Confección del Modelo Hidrogeológico definitivo.

La obtención de datos hidroquímicos y su posterior análisis representan una parte esencial de esta investigación, ya que brinda una comprensión sólida de la calidad del agua, identifica áreas de preocupación, el origen de los contaminantes y sienta las bases para la evaluación

del riesgo a la salud humana.

- *Validación y clasificación de la base de datos.*

La base de datos hidroquímica obtenida como resultado de los trabajos de campo se sometió a un riguroso proceso de validación. Esto incluyó la verificación del balance iónico con el empleo del SIG RockWord, un paso esencial para garantizar la integridad de los datos.

Posteriormente, se utilizó el software RockWorks para procesar y representar los datos en diagramas de Piper, tanto los de origen bibliográfico como de los trabajos de campo. Estos diagramas permitieron clasificar el tipo de agua existente en el acuífero, lo que es fundamental para comprender su calidad y origen.

- *Evaluación de la calidad del agua.*

La evaluación de la calidad del agua se realizó mediante la comparación de las concentraciones medidas con los índices establecidos en la normativa mexicana de agua potable, la NOM-127-2021. Este análisis arrojó luz sobre la conformidad del agua subterránea con los estándares de calidad, identificando áreas de posible preocupación y destacando la necesidad de medidas correctivas.

También se hizo un análisis de la evolución de los parámetros químicos medidos en la literatura y los obtenidos como resultado de los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Se tuvo en cuenta aquellos puntos muestreados más de una vez y los que coinciden en ambas fuentes de información para obtener resultados más concluyentes.

- *Modelo Hidrogeológico Conceptual definitivo.*

La información generada se integrará en el MHC preliminar obtenido en la etapa anterior para la confección del MHC definitivo, que será fundamental para evaluar el riesgo potencial a la salud humana asociado al consumo de aguas subterráneas en el VM.

4.4 Evaluación del riesgo a la salud humana

En México existe la Norma Oficial Mexicana NOM-048-SSA1-1993, la cual establece el método normalizado para la evaluación de riesgos a la salud como consecuencia de agentes ambientales. Sin embargo, a nivel internacional suele emplearse de forma difundida la

metodología establecida por la US.EPA.

Países e instituciones como Health Canada y Environment and Climate Change de Canadá, del Reino Unido la Agencia de Protección Ambiental (Environment Agency) y la Health and Safety Executive, organismos como la National Health and Medical Research Council (NHMRC) y la Australian Drinking Water Guidelines de Australia, la Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) de la Unión Europea, así como en América Latina las instituciones reguladoras del medio ambiente en países como Argentina y Perú, emplean enfoques basados en la evaluación de riesgos de la US.EPA para proteger la salud pública y el medio ambiente con carácter legislativo.

La NOM-048-SSA1-1993 y la metodología de la US.EPA difieren en su enfoque, alcance, criterios y proceso de evaluación. La NOM-048-SSA1-1993 requiere de un mayor número de ensayos y tiempo para la evaluación. No aborda la gestión del riesgo que es uno de los objetivos establecidos en este estudio. Establece una serie de límites máximos permisibles para agentes químicos y biológicos, estos límites son fijos e inamovibles y no considera las peculiaridades de cada escenario, otras fuentes existentes de exposición, la naturaleza del contaminante o la información científica actualizada al respecto.

Por su parte, la US.EPA utiliza diversos criterios, como los niveles de exposición, la dosis de ingesta o absorción y los valores de referencia de toxicidad registrados en los estudios recientes para evaluar los riesgos para la salud. Estos criterios se consideran suficientes para evaluar el riesgo y la metodología ofrece también la ventaja de terminar la investigación en el lapso establecido. Además, establece directrices y enfoques para la gestión y mitigación del riesgo.

Finalmente, para la estimación y cuantificación del riesgo a la salud humana se empleó la metodología de la US.EPA, con adaptaciones a las características del VM y al presupuesto. Se mantuvo el enfoque de sus directrices para lograr estimaciones aceptadas por la comunidad internacional respecto al riesgo a la salud humana que constituyen las aguas subterráneas del acuífero en los municipios de Apaxco, Atitalaquia,

Atotonilco de Tula y Tula de Allende y, las posibles medidas de gestión y mitigación del

riesgo que podrían ser implementadas para proteger la salud de la población afectada.

La ERS se realizó como un proceso escalonado. Inicialmente se realizó una evaluación preliminar, basada en la información limitada con la que se cuenta y la aplicación del principio de precaución mediante la consideración de escenarios que representan los mayores niveles de riesgo posibles. Posteriormente, se amplía y refinan los resultados obtenidos en la fase inicial, mediante análisis probabilísticos más complejos, cuando se obtuvo un “alto riesgo” a partir del enfoque determinístico (Uribe Vélez et al., 2007).

Las simplificaciones de los escenarios y estimaciones de las DEE y el riesgo, resultantes del “peor escenario posible” pueden provocar una sobrevaloración del riesgo, pero también ofrecer mayor protección ante la incertidumbre. De esto se deriva que el riesgo real puede ser inferior al estimado, por lo que, cuando se estima un riesgo bajo podemos asegurar que efectivamente el riesgo es bajo. Por el contrario, cuando se estima un riesgo alto, es difícil discernir si se trata realmente de un riesgo alto o de la causa de aplicar criterios conservadores. Por lo que es necesario pasar a metodologías probabilísticas un poco más complejas y generalmente costosas, al resultar “riesgo alto” (Martin-Olmedo, 2016 y US.EPA, 2004).

El criterio para clasificar riesgo alto o bajo generalmente corresponde al evaluador del riesgo. En Europa existen algunas directivas que establecen los límites aceptables de riesgo a la salud, algunas establecen umbrales y otros rangos en dependencia de nivel de incertidumbre en los datos. Para esta investigación, en ausencia de los medios y los recursos necesarios para cuantificar el riesgo real, es el propio proceso científico el que considera donde existe un riesgo admisible o no (Uribe Vélez et al., 2007).

Para el cumplimiento del objetivo se dividió esta etapa en cuatro subetapas metodológicas (Fig. 4.5), según los enfoques sugeridos en la metodología de la US.EPA (2004).

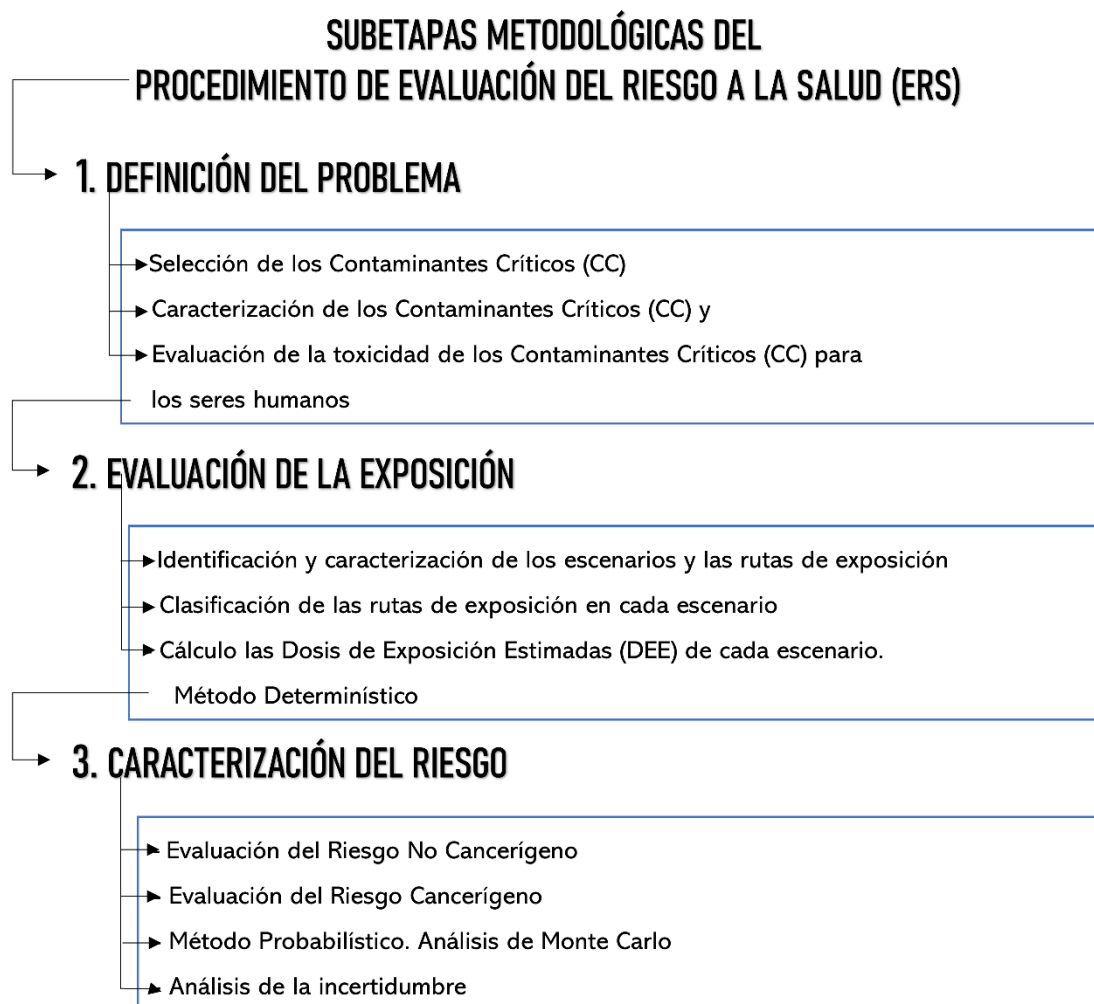


Figura 4.5. Diagrama metodológico para la evaluación del riesgo a la salud humana.

1) *Definición del problema.* Fase cualitativa que consiste en la identificación de todas aquellas situaciones o agentes capaces de generar efectos adversos en salud (CC) en un escenario concreto de exposición, así como en la caracterización de la naturaleza de tales efectos (carcinógeno y no carcinógeno) en función de la evidencia científica obtenida de estudios epidemiológicos, toxicológicos y de comparación de estructuras moleculares (US.EPA, 2004).

2) *Evaluación de la exposición.* Etapa con un carácter cualitativo en su fase inicial, donde se hace referencia a la distribución y concentración de un peligro en una matriz medioambiental, la caracterización de las vías de exposición, así como datos sobre las características

fisiológicas (Ej. peso, edad, sexo, etc.) y de comportamiento de la población potencialmente expuesta. Se desarrolla una segunda fase, de carácter cuantitativo, donde se realiza el cálculo de las dosis de exposición estimadas (DEE) de la población potencialmente expuesta que serán empleadas para la caracterización del riesgo. Esta estimación se aborda primeramente con un enfoque estocástico o determinista (US.EPA, 2004).

3) *Caracterización del riesgo*. En esta etapa se unen la evidencia, el razonamiento y las conclusiones obtenidas en la identificación de los CC, las DEE y la evaluación de la dosis-respuesta, teniendo en cuenta las incertidumbres asociadas. También se analiza la incertidumbre y la variabilidad asociada a los datos y modelos empleados. El objetivo es llegar a una conclusión sobre la probabilidad de que ocurra un efecto adverso causado por una sustancia química en circunstancias específicas de exposición, es decir, la probabilidad de que un CC produzca efectos adversos en la población dado un escenario específico (US.EPA, 2004).

Se realiza de forma diferente para sustancias que producen un efecto cancerígeno y las que no. Al concluir esta etapa se ofrece el Modelo Conceptual del Riesgo (MCR), como una ayuda invaluable para identificar las posibles medidas de gestión y mitigación del riesgo (US.EPA, 2004).

Finalmente, a partir de la información generada, se podrá emitir juicios respecto a las opciones de gestión de riesgos que serán consideradas en términos de sus efectos positivos y negativos según factores técnicos y económicos, seguridad ambiental, problemas sociales y capacidades organizacionales al medio ambiente. La estrategia elegida implicará mitigar el riesgo (US.EPA, 2004).

4.4.1 Definición del problema

La primera fase en el proceso de ERS es la definición del problema. Tiene como objetivo identificar todas las situaciones o agentes que pueden generar efectos adversos en la salud humana, para un contexto específico de exposición al que llamaremos y diferenciaremos en: "escenario". Para ello se busca en un primer momento identificar las sustancias tóxicas, seguidamente determinar CC y finalmente, usar la evidencia científica para conocer los efectos adversos de estos en la salud humana (US.EPA, 2004).

4.4.1.1 Selección de los Contaminantes Críticos

Para la selección de los CC se siguen los pasos que se observan en la figura 4.6.

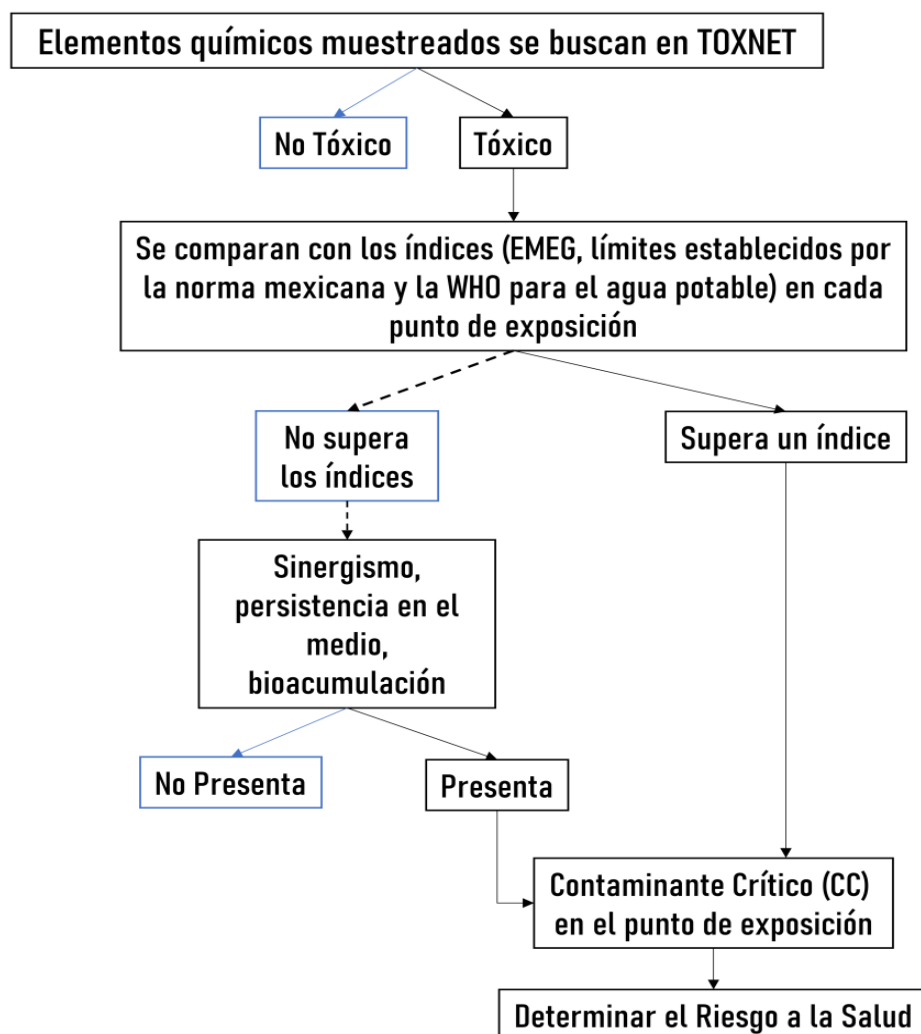


Figura 4.6. Diagrama de flujo metodológico para la selección de los CC.

En una primera etapa, se aplicó un primer filtro entre los 30 cationes y 7 aniones determinados, con el objetivo de identificar aquellos que presentan riesgos para la salud humana. Para llevar a cabo este filtrado inicial, se utilizó la base de datos HSDB del metabuscador TOXNET, enlazado a la Biblioteca Nacional de Medicina de los Estados Unidos disponible actualmente en PubChem. Este metabuscador permite realizar búsquedas simultáneas en diversas bases de datos que contienen información relevante sobre las

propiedades de sustancias químicas y sus posibles efectos en la salud humana. El acceso a esta base de datos está disponible en: [PubChem \(en inglés\) \(nih.gov\)](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/). Hay que aclarar que, aunque elementos muy tóxicos como el Pb fueron muestreados, no fueron cuantificados y por eso, no son considerados.

Una vez identificados los compuestos tóxicos presentes en el área de estudio, se procede a comparar sus concentraciones con los valores límite para el agua potable establecidos en la norma NOM-127-SSA-2021 de México, con los umbrales establecidos por la WHO (WHO, 2018) y con el valor de referencia de “Guía de Evaluación para Medios Ambientales” (EMEG, por sus siglas en inglés) (ATSDR, 2021).

Estos valores EMEG han sido propuestos por la ATSDR de los EE. UU. y sugerida en otras guías metodológicas de ERS (Díaz Barriga, 1999; López Seijas, 2000; ATSDR, 2023). Se emplean precisamente para determinar si las concentraciones de sustancias químicas en el medio ambiente pueden representar un riesgo no cancerígeno, para la salud humana o ambiental (ATSDR, 2021). Este índice de referencia es utilizado en varios estudios como: De Rosa, 1999; Pla Martínez et al., 2001; Orloff Kenneth, 1992; Michael, 2009 y Ortiz Poblete, 2018). Para su cálculo se emplea la ecuación 7.1:

$$EMEG = \frac{RfD(mg/kg/día)*PC(kg)}{TI(L/día)} \quad (\text{ec. 7.1})$$

Donde:

- RfD: la información sobre la RfD de cada sustancia se obtuvo del banco de datos IRIS del sistema TOXNET.
- PC: el peso corporal considerado para niños fue de 10 kg y para adultos de 70 kg. (Estas estimaciones se obtuvieron de la página web de la WHO y coinciden con los utilizados en la bibliografía existente de estimaciones de riesgo en América Latina y también en México);
- TI: la tasa de ingesta diaria de agua considerada para niños fue de 1 L/día y para adultos de 2 L/día. (Estas estimaciones se obtuvieron de la página web de la WHO y coinciden con los utilizados en la bibliografía existente de estimaciones de riesgo en América Latina y en México).

Se seleccionó el índice RfD para la vía oral para realizar el cálculo de la EMEG por considerarse que representa el escenario más crítico. Comúnmente esta es la vía donde a menores dosis aparecen respuestas negativas en las curvas dosis-respuesta ya que es en el aparato digestivo donde ocurre el mayor porcentaje de asimilación de sustancias en el organismo (Martin-Olmedo, 2016). El cálculo se realizó para niños menores de dos años, por ser la población más sensible y parte del escenario más crítico (ATSDR, 2021; US.EPA, 2004).

En la tabla 4.4 se da una relación de los valores asumidos para la RfD por vía oral de los compuestos tóxicos identificados en el área de estudio y la fuente bibliográfica de donde se obtuvo.

Tabla 4.4. Resumen de los valores empleados en el cálculo del índice EMEG de cada elemento tóxico cuantificado en el área de estudio y la referencia bibliográfica de donde se obtuvieron.

Elemento Tóxico	RfD oral (mg/L-día)	Referencia Bibliográfica
N-NO ₃ ⁻	1.6	US EPA, banco de datos IRIS (https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha)
N-NO ₂ ⁻	0.1	
F ⁻	0.05	
As	0.0003	
^a B	0.035	
^b Ba	0.2	
^c Mn	0.042	
Mo	0.005	
^d Sr	1.8	
Zn	0.3	
Cr	0.003	
Cu	0.04	
PC Niños (kg)	10	WHO, (2008). Guidelines for drinking-water quality, 3rd ed.
TI Niños (L/día)	1	
FE Niños	1	SESA (2016); Para F=6 años; DR=350 días/año y AT= 2190 días

^a derivado del RfD del ácido bórico

^b actualizado en 2005, NOAEL diferente al de la WHO

^c obtenido a partir de aplicar factor modificar 3 al RfD dieta del Mn de 0.42mg/kg-día como sugiera la EPA

^d se aplicó un factor modificador de 3 y un factor modificador de 10 al valor del RfD dietético del Sr igual a 0.6mg/kg-día

PC: peso corporal, TI: tasa de ingestión de agua, FE: Factor de exposición

Se estableció como criterio suficiente para considerar un elemento previamente clasificado como tóxico para la salud humana como un CC que, la concentración medida excediera al menos uno de los índices de referencia. Además de este criterio, se analizaron los posibles factores como la persistencia del elemento en el medio ambiente, su capacidad de bioacumulación y la posible presencia de sinergismo entre ellos, según lo establecido por la ATSDR en 2021 y US.EPA en 2004.

4.4.1.2 Caracterización de los Contaminantes Críticos

Esta fase de la evaluación de exposición se enfoca en el análisis cualitativo de cómo los CC pueden viajar desde su origen hasta áreas donde la población podría estar presente (ATSDR, 2021 y US.EPA, 2004). No se requirió de análisis cuantitativos complejos porque dependió, en gran medida, de la recopilación de información detallada y la aplicación de un enfoque lógico y de sentido común para evaluar el riesgo potencial de exposición. Se partió del MHC elaborado para el área de estudio en etapas anteriores de esta investigación.

En este apartado resulta imprescindible clasificar el efecto de los CC en función de los procesos biológicos. Para esto se diferenció entre efectos carcinógenos (que pueden causar cáncer) y no carcinógenos (que pueden causar otros efectos adversos en la salud), ya que la metodología establece métodos diferentes para cuantificar y caracterizar el riesgo en dependencia de su efecto en el organismo humano (US.EPA, 2023).

Esta diferenciación se basó en los datos de estudios epidemiológicos (que analizan la relación entre exposición y efectos en la población), estudios toxicológicos (que evalúan los efectos en función de la dosis y el tipo de exposición), y comparaciones de estructuras moleculares (que pueden indicar similitudes con agentes conocidos como peligrosos) que existen documentados en la bibliografía. Existen sustancias químicas con la capacidad de producir ambos efectos biológicos en los organismos (US.EPA, 2004).

Se clasifica también la toxicidad de los CC en función de los periodos de exposición. Se pueden clasificar en tres categorías: efectos agudos, que se manifiestan rápidamente después de una dosis única o exposición breve; efectos subcrónicos, que resultan de exposiciones continuas durante un periodo de meses; y efectos crónicos, que surgen debido a exposiciones repetidas durante la mayor parte de la vida de un individuo. Esta diferenciación es esencial ya que la mayoría de los estudios toxicológicos, así como las comparaciones de estructuras moleculares e inclusive los estudios epidemiológicos, se realizan y establecen umbrales para exposiciones crónicas. Resulta necesario tener claro este aspecto para hacer transformaciones de ser necesario (US.EPA, 2004).

4.4.2 Evaluación de la exposición

Una vez definido el problema se procede a la segunda subetapa metodológica para realizar una evaluación de la exposición. Esta subetapa inicialmente se desarrolla de forma cualitativa, donde a partir de la interpretación de lo documentado durante los trabajos de campo y los resultados de las encuestas aplicadas, se determinan las formas y mecanismo en los que ocurre la exposición. Dichas formas y mecanismos definen los escenarios de estudio. Seguidamente, se procedió de forma cuantitativa para obtener las DEE (ATSDR, 2021 y US.EPA, 2004).

4.4.2.1 Identificación y caracterización de las rutas de exposición

El concepto de ruta de exposición se refiere al camino que sigue un contaminante desde su fuente hasta la población que puede estar expuesta. Estas rutas de exposición están compuestas por varios componentes clave que deben ser identificados (US.EPA, 2004):

- *Fuente de Contaminación:* Este es el punto de origen de los CC. Es el lugar donde se liberan los contaminantes al medio ambiente.
- *Medio Ambiente:* El medio ambiente es el espacio donde los contaminantes se dispersan y pueden moverse. Puede incluir el aire, el agua, el suelo, la vegetación y otros elementos naturales. Los contaminantes pueden viajar a través de diferentes medios ambientales antes de llegar a la población.
- *Punto de Exposición:* Este es el lugar donde la población entra en contacto con los contaminantes, pueden ser pozos de agua potable, manantiales y/o norias. Se utilizan tanto datos bibliográficos como las mediciones de campo para identificar aquellos puntos con CC. Esto permitió una mejor caracterización y distribución espacial de los puntos de exposición en los municipios del área de estudio, facilitando una evaluación de riesgos más precisa con la información disponible. En caso de múltiples mediciones en un mismo punto a lo largo del tiempo, se consideró la concentración más alta para el análisis.
- *Vía de Exposición:* La vía de exposición se refiere a cómo las personas entran en contacto con los contaminantes. Puede ser a través de la inhalación del aire

contaminado, la ingestión de alimentos o agua contaminados, y la absorción dérmica (a través de la piel), entre otros. Cada vía de exposición tiene diferentes implicaciones para la salud.

- *Población Receptora*: Se refiere a la población que está expuesta a los CC a lo largo de la ruta de exposición. Puede incluir a las personas que viven cerca de la fuente de contaminación, trabajadores expuestos en la fuente, y en general, cualquier individuo que pueda verse afectado por la exposición a los contaminantes. Los niños se consideran especialmente vulnerables porque a menudo son más sensibles a los riesgos ambientales, esto debido a que sus sistemas biológicos aún están en desarrollo y pueden absorber y metabolizar sustancias de manera diferente a los adultos.

Los niños menores de 2 años representan una subpoblación especialmente vulnerable a las sustancias carcinógenas, ya que su riesgo de desarrollar neoplasias malignas por esta causa es 10 veces mayor que el de los adultos y 3 veces mayor que el de los adolescentes de 3 a 15 años (Preston, 2004).

En la elaboración del escenario se tienen en cuenta los cinco elementos esenciales asociados con una vía de exposición específica. El análisis de la ruta de exposición es fundamental en la evaluación de riesgos ambientales y en la protección de la salud pública. En la gestión adecuada de las fuentes de contaminación y la protección de los puntos de exposición son elementos claves para reducir la exposición a sustancias peligrosas en cada escenario.

4.4.2.2 Clasificación de las rutas de exposición

En dependencia de la ocurrencia total o parcial de los cinco elementos de una ruta de exposición definidos en el subepígrafe 4.4.2.1 y de la certeza en la información disponible, estas pueden clasificarse en (US.EPA, 2004):

- *Rutas Completas*: Son rutas en las que se tienen datos sólidos y una certeza alta que relaciona la fuente de contaminación, los medios ambientales, el punto de exposición y la población afectada, ya sea para exposiciones pasadas, presentes o futuras.
- *Rutas Potenciales*: Estas rutas carecen de uno o más elementos clave de la ruta o tienen información menos segura. Puede existir incertidumbre sobre la exposición

actual o futura, y se recomienda considerarlas como potenciales cuando no hay evidencia actual de contaminación en el punto de exposición.

- *Rutas Descartables:* Son rutas que se descartan de antemano debido a la baja probabilidad de exposición pasada, presente o futura. Esto se basa en la información disponible y las características del sitio, pero no incluye proyectos futuros que puedan generar contaminación sin medidas de control ambiental.

La clasificación de las rutas de exposición permite identificar las rutas que requieren una mayor atención y control, así como aquellas que pueden ser menos críticas en términos de riesgos para la salud humana en cada escenario. La toma de decisiones y las acciones de mitigación se basan en estas clasificaciones.

4.4.2.3 Cálculo de las Dosis de Exposición. Método Determinístico

Existen tres métodos principales para estimar las DEE en la evaluación de riesgos y la toxicología: método directo, método indirecto usando escenarios de exposición, y la reconstrucción de dosis usando biomonitorización y modelos (CEPIS, 2016 y US.EPA, 2004). Cada método usa fuentes diferentes de información para la cuantificación.

Para alcanzar los objetivos de esta investigación, se empleó el método indirecto que utiliza escenarios de exposición, partiendo inicialmente del método de “point estimate” o evaluación determinística. Este enfoque es ampliamente utilizado como una primera etapa exploratoria para determinar la necesidad de un análisis más detallado, especialmente cuando el resultado indica un "alto riesgo". Además, se utiliza para identificar poblaciones con una mayor exposición potencial o una susceptibilidad especial, sobre las cuales se pueden llevar a cabo estudios epidemiológicos o de evaluación de la exposición utilizando cualquiera de los otros dos métodos disponibles. Es también el menos costoso y no requiere de muestras biológicas (CEPIS, 2016).

Estas DEE se calculan para cada CC, vía de exposición identificada y para la población receptora considerada en cada escenario de exposición. Estos cálculos se realizaron elaborando una plantilla de Excel.

La fórmula general para calcular la dosis de exposición por vía oral es la ecuación 7.2:

$$DEE_{oral} = \frac{C*TC*FE}{PC} \quad (\text{ec. 7.2})$$

Donde:

- DEE oral es la dosis de exposición estimada por vía oral (mg/L/días),
- C es la concentración del compuesto considerado CC en el agua (mg/L), en esta investigación, en caso de haberse muestreado en las dos campañas el punto de exposición, se empleó entonces la concentración máxima del CC obtenida de entre los dos resultados del muestreo,
- TC es la ingesta promedio de la cantidad de agua que se ingiere al día (en litros),
- PC es el peso corporal promedio del individuo (en kg),
- FE es el factor de exposición (adimensional).

Para obtener el Factor de Exposición (FE) se emplea la ecuación 7.3:

$$FE = \frac{F*DR}{AT} = \frac{\text{días/años*años expuestos}}{\text{años de promediación del efecto*365 días/año}} \quad (\text{ec. 7.3})$$

Donde:

- F es la frecuencia de exposición en días del año,
- DR es la duración de la exposición,
- AT es el periodo por el cual la dosis es promediada.

Para escenarios donde una persona está expuesta al contaminante a través del agua de forma diaria en sus años de vida, se asume un FE = 1 (Martin-Olmedo, 2016).

Sustituyendo la ecuación 7.3 en la ecuación 7.2 se obtiene una ecuación única para el cálculo de la DEE por la vía oral como se expresa en la ecuación 7.4:

$$DEE_{oral} = \frac{C*TC*F*DR}{PC*AT} \quad (\text{ec.7.4})$$

1. La fórmula para calcular la dosis de exposición por vía dérmica se expresa en la ecuación 7.5:

$$DEE_{d\acute{e}rmica} = \frac{C*AS*TA*DC*FE}{PC} \quad (ec.7.5)$$

Donde:

- $DEE_{d\acute{e}rmica}$ es la dosis de exposición estimada por vía dérmica (mg/L/día),
- C es la concentración del compuesto en el agua (mg/L) igualmente, en caso de haberse muestreado en los dos años el punto de exposición se empleó entonces la concentración máxima del CC obtenida de entre los dos resultados del muestreo,
- AS es la superficie de la piel expuesta al agua (en cm²),
- TA es la tasa de absorción (cm/h),
- DC es la duración del contacto con el agua (en horas),
- PC es el peso corporal del individuo (en kg).

Para determina el FE se emplea la ecuación 7.3. Sustituyendo la ecuación 7.3 en la ecuación 7.5 se obtiene una ecuación única para el cálculo de la DEE por la vía dérmica como se expresa en la ecuación 7.6:

$$DEE_{d\acute{e}rmica} = \frac{C*AS*TA*DC*F*DR}{PC*AT} \quad (ec. 7.6)$$

Los valores empleados para cada parámetro varían en dependencia de la población receptora, la vía de exposición y el escenario en cuestión. En la tabla 4.5 se puede apreciar una relación de los parámetros con su simbología, unidad de medida, el valor asumido y la fuente bibliográfica de donde se obtuvieron, empleados en el cálculo de las dosis de exposición del Escenario I.

El Escenario I se definió como el residencial, donde se emplea agua tanto en viviendas como en centros de trabajo y escuelas para diversos fines domésticos. Este escenario abarca una amplia gama de actividades humanas que involucran el uso cotidiano del agua, lo que puede potencialmente aumentar la exposición a contaminantes presentes en ella.

Tabla 4.5. Valores de los parámetros empleados en los cálculos de las DEE por vía oral y dérmica para niños (menores de dos años) y adultos (mayores de 16 años) en el Escenario I.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Referencia
TC	Consumo de agua de un adulto	2	L/día	WHO (2008)
	Consumo de agua de un niño	1	L/día	WHO (2008)
PC	Peso Corporal de un adulto	70	kg	US.EPA (2011)
	Peso Corporal de un niño	10	kg	WHO (2008)
FE	Factor de Exposición de un adulto	1	adim.	SESA (2016), US.EPA (2011)
	Factor de Exposición de un niño	1	adim.	SESA (2016), US.EPA (2011)
AS	Superficie de la piel expuesta, adulto	19583	cm ²	US.EPA (2011)
	Superficie de la piel expuesta, niño	3960	cm ²	US.EPA (2011)
DC	Duración del contacto para adulto	0.71	h/día	US.EPA (2011)
	Duración del contacto para un niño	0.54	h/día	US.EPA (2011)
kp	Constante de permeabilidad del agua	0.001	cm/h	US.EPA (2011)
FC	Factor de Conversión	0.001	L/cm ²	US.EPA (2011)

adim.: adimensional

En la tabla 4.6 se resume la relación de parámetros con su simbología, unidades de medidas, el valor asumido y la fuente bibliográfica de donde se obtuvieron, para el cálculo de las dosis de exposición del Escenario II.

El Escenario II corresponde a los balnearios de agua termal. En estos lugares, la exposición al agua es específicamente recreativa y terapéutica, lo que plantea un conjunto único de consideraciones de riesgo. Ambos escenarios requieren un análisis detallado para evaluar adecuadamente los riesgos para la salud pública y diseñar estrategias de gestión y mitigación efectivas.

Tabla 4.6. Valores de los parámetros empleados en los cálculos de las DEE por vía oral y dérmica para niños (menores de dos años) y adultos (mayores de 16 años) en el Escenario II.

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad de Medida	Referencia
TC	Consumo de agua de un adulto	21	ml/h	US.EPA (2011)
	Consumo de agua de un niño	49	ml/h	US.EPA (2011)
PC	Peso Corporal de un adulto	70	kg	US.EPA (2011)
	Peso Corporal de un niño	10	kg	WHO (2008)
F	Frecuencia de Exposición de un adulto	2	días/año	US.EPA (2011)
	Frecuencia de Exposición de un niño	2	días/año	US.EPA (2011)
DR	Duración de la exposición de un adulto	30	años	US.EPA (2011)
	Duración de la exposición de un niño	6	años	USEPA (2011)
AT	Tiempo promedio de un adulto	10950	días	US.EPA (1996)
	Tiempo promedio de un niño	2190	días	Zeng et al. (2009)
AS	Superficie de la piel expuesta, adulto	14687.3	cm ²	US.EPA (2011)
	Superficie de la piel expuesta, niño	2970	cm ²	US.EPA (2011)
DC	Duración del contacto para adulto	145	min/mes	US.EPA (2011)
	Duración del contacto para un niño	135	min/mes	US.EPA (2011)
kp	Constante de permeabilidad del agua	0.001	cm/h	US.EPA (2011)
FC	Factor de Conversión	0.001	L/cm ²	US.EPA (2011)

Aunque la metodología recomienda utilizar para cada escenario descriptores de tendencia central, estimados límites y estimado de alto nivel (Martin-Olmedo, 2016 y US.EPA, 2004) por no contarse con los datos necesarios se realizó la estimación con las concentraciones máximas de los CC en cada punto de exposición obtenidas durante las dos campañas de muestreo. Esto cumpliendo con el principio precautorio y creando el peor escenario posible (Martin-Olmedo, 2016, US.EPA, 2004).

4.4.3 Caracterización del riesgo

La caracterización del riesgo puede llevarse a cabo de manera cualitativa, cuantitativa o, más comúnmente y como se realiza en este estudio, utilizando ambas aproximaciones. La caracterización del riesgo implica evaluar dos aspectos fundamentales según como se muestra en la ecuación 7.7 (CEPIS, 2000; US.EPA, 2004 y Martin-Olmedo, 2016):

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} * \text{Gravedad} \quad (\text{ec. 7.7})$$

- *Probabilidad de Ocurrencia:* Este aspecto se refiere a la posibilidad de que ocurra un efecto adverso para la salud como resultado de la exposición a un peligro químico, físico o biológico. Se busca determinar cuán probable es que la exposición a dicho peligro conduzca a un efecto adverso en la salud de las personas (US.EPA, 2004).
- *Gravedad del Efecto en la Salud:* Este aspecto se refiere a la severidad o gravedad del efecto adverso en la salud que podría ocurrir como resultado de la exposición al peligro. Se evalúa qué tan perjudicial podría ser dicho efecto en la salud de las personas expuestas (US.EPA, 2004).

La estimación de ambos aspectos del riesgo, como se ha mencionado con anterioridad, es diferente para las sustancias no carcinógenas y carcinógenas, debido a las diferencias en la naturaleza de ambos efectos adversos en la salud humana. La clave de esta diferencia radica en la presencia o ausencia de un umbral seguro de exposición. Las sustancias no carcinógenas permiten establecer umbrales seguros, es decir, existe una dosis por debajo de la cual es poco probable que causen un efecto adverso a la salud (CEPIS, 2016, US.EPA, 2004).

Por otra parte, las sustancias carcinógenas se evalúan en términos de probabilidad de riesgo, ya que no se ha identificado un nivel de exposición que no implique algún riesgo de cáncer, o lo que es lo mismo, cualquier exposición supone un riesgo. Esto lleva a enfoques de evaluación de riesgos diferentes para estos dos tipos de sustancias (CEPIS, 2000; EPA, 2004, Martin-Olmedo, 2016).

4.4.3.1 Evaluación del riesgo no cancerígeno

La evaluación del riesgo no cancerígeno para cada ruta de exposición identificada en cada escenario se realizó a partir de la integración de los resultados obtenidos tanto de manera cualitativa como cuantitativa. La estimación cualitativa del riesgo se basa en la comparación de las DEE con un umbral seguro. Los efectos biológicos de estas sustancias están condicionados a las dosis y, por lo tanto, se puede establecer límites seguros de exposición a partir del umbral más bajo de efecto a la salud. La estimación cuantitativa del riesgo se basó en el cálculo del Coeficiente de Peligro, HQ por sus siglas en inglés (CEPIS, 2000; EPA, 2004 y Martin-Olmedo, 2016).

- *Estimación cualitativa del riesgo no cancerígeno.*

La relación dosis-efecto se entiende cómo la cantidad de una sustancia (dosis) que se relaciona con la magnitud o gravedad del efecto en un individuo. Se asume que un aumento en la dosis conlleva un aumento en la intensidad del efecto. En una población expuesta, la mayoría de las personas experimentarán efectos similares a una dosis dada, pero puede haber grandes variaciones entre individuos debido a factores como raza, sexo, edad, características de absorción y respuesta a la sustancia, entre otros (CEPIS, 2000; EPA, 2004 y Martin-Olmedo, 2016).

Algunos individuos pueden mostrar una gran tolerancia (hiposensibilidad), experimentando efectos mínimos a dosis relativamente altas, mientras que otros pueden ser muy sensibles (hipersensibilidad), experimentando efectos máximos a dosis bajas. Por lo que, en la caracterización del peligro es preferible emplear la relación dosis-respuesta, que se refiere a cómo la cantidad de una sustancia (dosis) se relaciona con el porcentaje de individuos que experimentan un efecto específico (CEPIS, 2000; EPA, 2004; Martin-Olmedo, 2016).

Para esta investigación fueron considerados los siguientes umbrales (CEPIS, 2000; EPA, 2004; Martin-Olmedo, 2016):

- RfD (dosis de referencia o *reference dose*): Es una estimación diaria de la cantidad de sustancia que una persona puede ingerir de forma continua a lo largo de su vida sin apreciar riesgos significativos para la salud. Se utiliza para establecer límites de exposición seguros en el agua potable y los alimentos.
- NOAEL (nivel donde no se observan efectos adversos o *no observed adverse effect level*): Es el nivel más alto de exposición a una sustancia química en un estudio de toxicidad en el que no se observan efectos medibles en los sujetos de prueba. Se utiliza como punto de partida en la evaluación de riesgo para establecer niveles de exposición seguro.
- LOAEL (nivel de efecto adverso más bajo observado o *lowest observed adverse effect level*): Es el nivel más bajo en un estudio de toxicidad en el que se observan efectos adversos medibles en los sujetos de prueba. Se utiliza como un indicador de exposición a niveles que pueden causar efectos adversos.

Estos límites o niveles máximos de exposición en seres humanos se establecen considerando un efecto adverso específico (el que ocurre al exponerse a menores dosis), una vía de exposición particular (como la ingestión, la inhalación o la absorción a través de la piel) y un período de tiempo determinado. Es importante conocer todos estos factores para ajustarlos al escenario de estudio (CEPIS, 2000; US.EPA, 2004; Martin-Olmedo, 2016). En la tabla 4.7 se resumen dichos aspectos para los CC estudiados en el área de estudio.

Tabla 4.7 Resumen de los umbrales empleados en la evaluación cualitativa del riesgo no cancerígeno, sus valores, el efecto adverso a la salud para el cual se determinaron y las referencias bibliográficas respectivas.

CC	VE	Umbral	Valor (mg/kg-día)	PE	Efecto adverso	Referencia Bibliográfica
NO ₃ ⁻	oral	RfD NOAEL LOAEL	1.6 1.6 1.8	crónico	metahemoglobina infantil (casos registrados de bebés)	IRIS, US.EPA 2023 Accesible: https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha
	dérmico	RfD	3.52			ATSDR, 2023 Accesible: https://wwwn.cdc.gov/TSP/index.aspx
F ⁻	oral	RfD NOAEL LOAEL	0.05 0.06 0.12	crónico	fluorosis dental (estudio epidemiológico en niños)	IRIS, US.EPA 2023 Accesible: https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha
		RfD NOAEL LOAEL	0.05 0.15 0.25			ATSDR, 2003 (https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp11-c3.pdf) Morales Arredondo, JI; Armienta, M.A. y Rodríguez, R., 2020
						ATSDR, 2023 Accesible: https://wwwn.cdc.gov/TSP/index.aspx
	dérmico		0.0582			
As	oral	RfD NOAEL LOAEL	0.0003 0.0009 0.014	crónico	necrosis celular, hiperpigmentación y posibles complicaciones vasculares (estudios en seres humanos)	IRIS, US.EPA 2023 Accesible: https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha
	dérmico	RfD	0.000124			ATSDR, 2023 Accesible: https://wwwn.cdc.gov/TSP/index.aspx

CC: Contaminante Crítico; VE: Vía de Exposición; PE: Período de Exposición

*La US.EPA establece un consumo diario para un adulto de 70kg que bebe 2L de agua diario de 0.12mg/kg-día por más de 15 años como un criterio de exposición seguro para este criterio de valoración más grave en adultos.

Como las condiciones en los estudios empleados para la estimación de los umbrales de CC corresponden con las de los escenarios del área de estudio, no fue necesario emplear en ellos ningún factor de corrección.

- *Estimación cuantitativa del riesgo no cancerígeno individual.*

La caracterización cuantitativa del riesgo no carcinógeno implica calcular el cociente entre la dosis de exposición estimada (DEE) y la dosis umbral definida como "dosis de referencia" (RfD), siguiendo el estándar utilizado por la U.S. EPA y otras agencias reguladoras. El cociente resultante de esta comparación se conoce como "Cociente de Peligro" (en inglés, *Hazard Quotient* o HQ), y su cálculo se realiza mediante la ecuación 7.8 (US.EPA, 2004; CEPIS, 2000):

$$HQ = \frac{DEE}{Umbral} = \frac{DEE}{RfD} \quad (\text{ec. 7.8})$$

Cuando:

- $HQ < 1$: el riesgo de efectos adversos se considera insignificante.
- $HQ > 1$: indica la posibilidad de efectos adversos, aunque sin una probabilidad estadística precisa.

No se puede comparar directamente HQs entre sustancias, ya que los umbrales de exposición seguros pueden variar en términos de efectos críticos. A medida que los HQs aumentan por encima de 1, aumenta la probabilidad de efectos adversos, pero no se puede cuantificar de manera exacta el significado del incremento.

4.4.3.2 Evaluación del riesgo cancerígeno

La evaluación del riesgo cancerígeno para cada ruta de exposición identificada por escenarios se realizó a partir de las conclusiones a las que se llegó tanto de manera cualitativa como cuantitativa. La evaluación de riesgo para estas sustancias se divide en dos etapas: primero, se realiza una evaluación cualitativa que analiza la fuerza de la evidencia sobre la capacidad carcinogénica de la sustancia. Luego, se lleva a cabo una evaluación cuantitativa que estima la probabilidad de riesgo de cáncer utilizando el factor de pendiente o potencia cancerígena (CEPIS, 2000; EPA, 2004, Martin-Olmedo, 2016).

- *Estimación cualitativa del riesgo cancerígeno*

En esta etapa se conoce como "evaluación del peso de la evidencia". En esta fase, se lleva a cabo un análisis exhaustivo de las pruebas disponibles relacionadas con los efectos carcinogénicos. Esto implica una evaluación crítica de la evidencia de estudios en animales, datos de estudios en humanos y cualquier información adicional proporcionada por estudios complementarios. Además, se realiza una valoración de la calidad de estos estudios según una serie de criterios establecidos, considerando también la cantidad de estudios disponibles como un factor importante en este proceso (CEPIS, 2000; EPA, 2004 y Martin-Olmedo, 2016).

Adicionalmente se hizo una recopilación de casos de estudios publicados donde se asocian concentraciones de As en agua potable con incidencia de algún tipo de cáncer. No se siguió ningún criterio de selección en particular. Se reunieron algunos estudios sistémicos de exposición al As, que fueron debidamente citados, y se resumieron aspectos de interés. Se agruparon en rangos los puntos de exposición según la concentración de As y se relacionaron con las concentraciones medias o rangos de exposición en los casos de estudio. El objetivo de esta recopilación fue analizar la asociación entre la exposición al As en el agua potable del área de estudio y el riesgo de desarrollar cáncer.

- *Estimación cuantitativa del riesgo cancerígeno*

La caracterización del riesgo para sustancias carcinógenas se expresa como un Exceso de Riesgo de Cáncer (RIC), que calcula el aumento en la probabilidad de desarrollar cáncer a lo largo de la vida debido a la exposición a una sustancia carcinógena potencial. Para calcularlo, se combina la dosis de exposición estimada (DEE) con el Factor de Pendiente de Potencia Carcinógena (SF), cómo se observa en la ecuación 7.9 (CEPIS, 2000; EPA, 2004, Martin-Olmedo, 2016):

$$RIC = DEE * SF \quad (\text{ec. 7.9})$$

Donde:

- RIC: riesgo incremental de cáncer (adimensional)
- DEE: Dosis de exposición calculada para cada vía de exposición y población considerada (mg/kg/día).
- SF: Factor de pendiente del CC para la vía oral [(mg/kg/día)⁻¹].

El SF utilizado para calcular el riesgo unitario del agua potable, se deriva de un enfoque de formulación relacionado con el tiempo y la dosis del modelo multietapa, respaldado por la US.EPA. Además, se reconoce que están respaldados por un amplio cuerpo de evidencia científica y epidemiológica, lo que sugiere una alta confiabilidad en los resultados (US.EPA, 1988).

Para el caso del As, no se cuenta con un SF determinado para la vía dérmica, tampoco existe en la literatura suficiente información sobre los mecanismos y formas de ocurrencia para

evaluar esta exposición., por lo que se determinó el RIC para adultos y niños solamente por la vía oral.

En el caso de los niños, que son una población vulnerable, cuando existen datos específicos de susceptibilidad infantil a una sustancia y estos se han utilizado para calcular el Factor de Pendiente (SF), se utiliza este SF. En ausencia de datos de susceptibilidad específica en la infancia, la U.S. EPA recomienda aplicar factores de corrección ajustados a la edad (ADAF, por sus siglas en inglés) a los valores de pendiente de potencia carcinogénica (SF) para exposición a través del agua y la inhalación, siguiendo los siguientes criterios (CEPIS, 2000; EPA, 2004, Martin-Olmedo, 2016):

- Para niños menores de 2 años: SF multiplicado por 10.
- Para niños de 2 a 16 años: SF multiplicado por 3.

Estos factores de corrección ajustados a la edad se utilizan para tener en cuenta la vulnerabilidad de diferentes grupos de edad en la caracterización del riesgo. Con base en ello la ecuación quedaría como (ecuación 7.10) (US.EPA, 2004; CEPIS, 2000):

$$RIC_{\text{niños}} = DEE * SF * ADAF \quad (\text{ec. 7.10})$$

Los valores empleados en la estimación del riesgo cancerígeno se resumen en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Resumen de los valores empleados en la evaluación cuantitativa del riesgo cancerígeno y las referencias bibliográficas respectivas.

Parámetro	Valor (Adimensional)	Referencia Bibliográfica
SF _{As oral}	1.50	IRIS, US.EPA 2023 Accesible: https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha
ADAF adulto	1.00	US.EPA, 2004; CEPIS, 2000
ADAF niño	10.00	US.EPA, 2004; CEPIS, 2000

En el caso de sustancias cancerígenas no existe una dosis a la que no exista el riesgo. Se estima que pueden causar efectos incluso a dosis extremadamente bajas, aunque la probabilidad de ocurrencia sea más reducida. En estos casos se dice por tanto que son sustancias para las que no es posible establecer un grado seguro de exposición (US.EPA, 2004; CEPIS, 2000; Martin-Olmedo, 2016; SEA, 2023). El límite generalmente aceptable para el aumento individual de riesgo de cáncer (RIC) tanto en niños como adultos es de 1 en 1,000,000, lo que significa que hay una probabilidad de un caso de cáncer por cada millón de personas expuestas (US.EPA, 2004; CEPIS, 2000; Martin-Olmedo, 2016; SEA, 2023).

Es importante resaltar que el RIC es una estimación basada en promedios, que en el área de estudio se determinó a partir del peor escenario posible y que puede variar según las características individuales de cada persona como la edad, el sexo, los antecedentes familiares, hábitos de vida y otros factores de riesgo. También que se está refiriendo a probabilidades y no es una garantía de que suceda (Mayo Clinic, 2023). Con el objetivo de entender el impacto del RIC en la población se normalizaron los valores obtenidos por cada 50 personas (RIC/50) y el riesgo por cada 100 personas (RIC/100).

4.4.3.3 Método Probabilístico. Análisis de Monte Carlo

El método de Monte Carlo se utilizó en este contexto para realizar un análisis de riesgo probabilístico en aquellos puntos de exposición, ruta y para CC del escenario que, según el método determinístico, representan un “alto riesgo” a la salud humana (fig. 4.7); como se indica en los documentos de la US. EPA del 2023 y 2014: “Principios rectores para el análisis de Monte Carlo” y en el “Foro de Evaluación de Riesgos White Paper: Métodos de Evaluación de Riesgos Probabilísticos y Estudios de Caso” respectivamente.

De forma escalonada se partió del análisis cualitativo y se realizó el análisis cuantitativo en receptores y puntos de exposición donde fuese necesario una evaluación más detallada del riesgo.

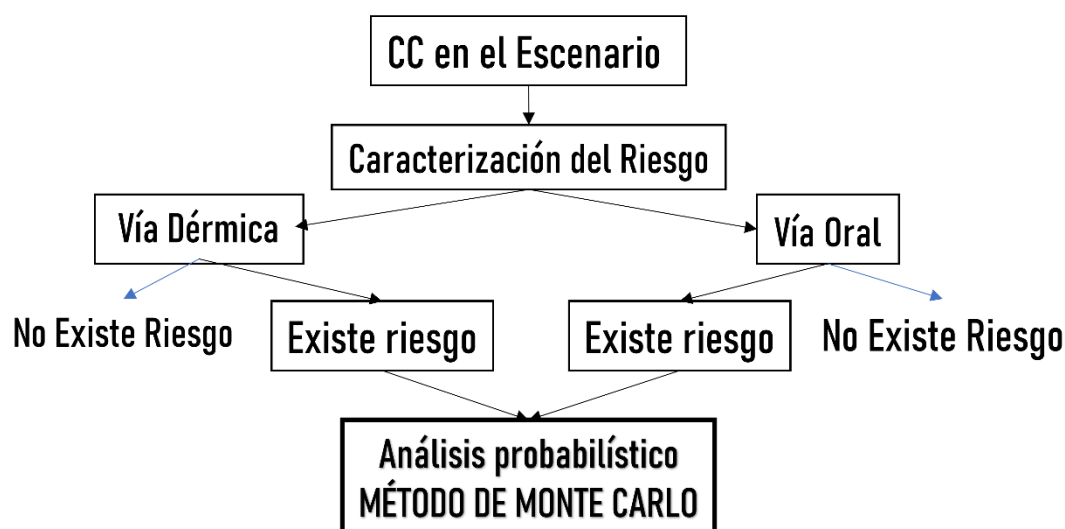


Figura 4.7 Diagrama de flujo metodológico para la selección de las vías, receptores y escenarios que requieren un análisis probabilístico del riesgo.

Este método permite evaluar la variabilidad asociada a los datos de entrada y calcular una distribución de probabilidad de los resultados en lugar de un único valor puntual. Partiendo de esta variabilidad inherente a los datos y de abordarla para conseguir una representación más realista de los resultados. Los escenarios de evaluación basados en la acumulación de “peores casos posibles” se transforman en escenarios más realistas y, al reducir la incertidumbre sobre el tipo e intensidad de los efectos esperados, puede reducirse también el margen de seguridad necesario (US.EPA, 2004; CEPIS, 2000; Martin-Olmedo, 2016; SEA, 2023).

Se consideraron los parámetros y las distribuciones resumidas en la tabla 4.9. La elección de la función probabilística adecuada para describir cada parámetro se determinó a partir de la naturaleza de los datos y de cómo se distribuyen según fuentes bibliográficas relacionadas en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Relación de las variables con la distribución y los valores empleados en la simulación de Monte Carlo y sus respectivas referencias bibliográficas.

Símbolo	Variables	^a UM	Distribución	Valores de los Parámetros	^b Referencia
C	Concentración (As, F ⁻ , NO ₃ ⁻ , B)	mg/L	lognormal	(estimados a partir de los datos químicos)	USEPA (2011)
TC	Consumo de agua de un niño	L/día	triangular	a= 0.5; b= 1.5; c= 1	Zhai et al. (2017); USEPA (2011)
	Consumo de agua de un adulto	L/día		a= 0.8; b= 3; c= 2	WHO (2013), USEPA (2011)
PC	Peso Corporal de un niño	kg	triangular	a= 5; b= 18; c= 10	ICMR (2010); USEPA (2011, 2008)
	Peso Corporal de un adulto	kg		a= 50; b= 100; c= 70	ICMR (2010); USEPA (2011)
FE	Factor de Exposición	días/año	lognormal	$\mu= 1$; $\sigma= 0.5$	USEPA (1996), USDOE

^a Unidad de Medida

^b Referencia empleada en la selección de la distribución de la variable considerada.

Se generaron 10 000 simulaciones, (mutaciones o iteraciones, el término depende del autor con el que se esté más familiarizado) donde se varían los valores de los parámetros de entrada definidos en forma aleatoria (de acuerdo con las distribuciones de probabilidad asignadas a cada uno) para cada punto de exposición, vía y población receptora definidas en este escenario. Los resultados generados se almacenaron en hojas Excel (las diez mil simulaciones realizadas en cada punto de exposición determinado para cada CC y población receptora).

A partir de estas simulaciones, se obtuvieron resultados estadísticos que permitieron estimar la probabilidad de ocurrencia de diferentes DEE a CC. A todo esto, se realizó un resumen estadístico con el cual se caracterizó la distribución de probabilidad (valor mínimo, primer cuartil, media, mediana, tercer cuartil y valor máximo).

Una vez obtenidas las DEE se hizo inicialmente una estimación cualitativa del riesgo determinando el porcentaje de la distribución que supera el RfD, y para alcanzar un mayor grado de detalle se realizó este mismo procedimiento con los umbrales del NOAEL y el LOAEL. Para la visualización de los datos se confeccionaron diagramas de violín que integra la información contenida en un diagrama de cajas y bigotes, con las curvas de la distribución de los datos. A partir de los resultados de la evaluación cualitativa, se realizó la estimación cuantitativa del riesgo a partir del cálculo de los HQ para los casos necesarios.

Para la caracterización del riesgo cancerígeno se evaluó el umbral de riesgo admisible en cada RIC calculado para niños y adultos por punto de exposición. Todo ello permite evaluar el riesgo máximo, el riesgo medio y el riesgo mínimo para conseguir estimaciones y conclusiones coherentes (Fig. 4.8).

Se desarrolló un código propio para realizar el análisis probabilístico de Monte Carlo con lenguaje R. Se empleó la herramienta *RStudio* que proporciona una interfaz de usuario amigable y hace más sencillo escribir código R, ejecutar análisis de datos y crear visualizaciones para generar el modelo que se ajusta a las necesidades. R es un lenguaje de programación y entorno de análisis de datos utilizado en estadísticas y ciencia de datos. El código se puede consultar en el Anexo 5. Para la confección de los diagramas de violín y demás visualizaciones de datos se utilizó la librería de *ggplot2* de *RStudio*.

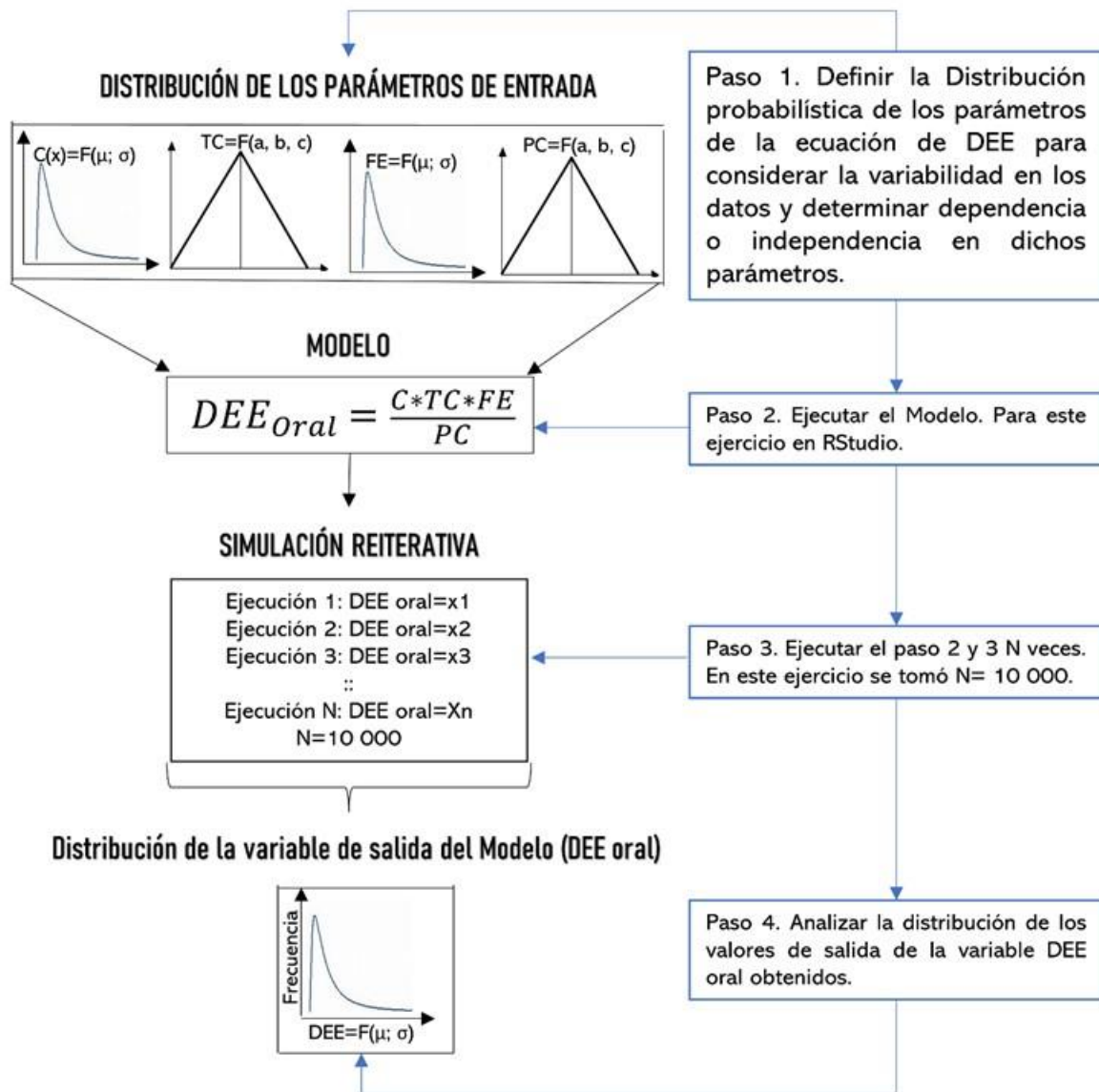


Figura 4.8. Diagrama de flujo metodológico para el análisis de Monte Carlo.

4.5 Análisis de la incertidumbre

El análisis de la incertidumbre en la evaluación de riesgos es esencial para comprender la fiabilidad de los resultados obtenidos. La incertidumbre implica la posibilidad de que los resultados de una decisión sean diferentes de lo esperado. Evaluarla permite tener en cuenta esta posibilidad y tomar decisiones más informadas y cautelosas. Además, ayuda a identificar las limitaciones y las fuentes de error, lo que mejora la calidad y confiabilidad de los

resultados en la investigación científica y técnica. Es también una de las directrices de la metodología para las ERS (CEPIS, 2000; EPA, 2004; Martin-Olmedo, 2016; SEA, 2023)

Se reconoce que el método determinístico presenta limitaciones, ya que la calidad de las estimaciones depende en gran medida de la calidad de los datos de entrada y de la precisión de los modelos utilizados. La incertidumbre inherente a las estimaciones puede conducir tanto a una subestimación como a una sobreestimación del riesgo (White Paper Monte Carlo, US.EPA, 2014). Para abordar estas incertidumbres, se clasificaron en tres categorías principales: incertidumbre del escenario, del modelo y de los parámetros de entrada (White Paper Monte Carlo, US.EPA, 2014).

La incertidumbre del escenario se refiere a errores derivados de una especificación incorrecta o incompleta del escenario de riesgo, que incluye suposiciones sobre las fuentes de emisiones, las poblaciones receptoras y las vías de exposición (White Paper Monte Carlo, US.EPA, 2014). La incertidumbre del modelo se relaciona con la precisión de los modelos matemáticos o computacionales utilizados para predecir resultados. Por otro lado, la incertidumbre en los datos de entrada en este estudio surge de que no se realizaron mediciones u observaciones directas de factores de exposición y consumo de la población, por lo que se adoptaron de la bibliografía la cual hace referencia a hábitos conductuales de la población promedio de los Estados Unidos (White Paper Monte Carlo, US.EPA, 2014).

Para abordar la incertidumbre del modelo, se realizó la validación del modelo probabilístico mediante la comparación con los resultados del método determinístico. Además, el análisis de Monte Carlo permite caracterizar la variabilidad, especialmente la variabilidad interindividual y la de los parámetros de entrada. Se determinaron las mayores incertidumbres en los datos de entrada mediante análisis de sensibilidad. En conjunto, estas estrategias proporcionan una evaluación robusta de la incertidumbre y la variabilidad en la evaluación del riesgo (White Paper Monte Carlo, US.EPA, 2014). Se realizaron estos estudios con el empleo de la herramienta RStudio.

- *Análisis de sensibilidad*

Un análisis de sensibilidad es una técnica estadística utilizada para evaluar cómo varían los resultados de un modelo o sistema cuando se modifican los valores de ciertos parámetros o

variables de entrada. Su objetivo principal es identificar qué factores tienen el mayor impacto en los resultados y cuantificar la influencia de cada uno de ellos en la incertidumbre del modelo (White Paper Monte Carlo, US.EPA, 2014). El análisis fue realizado con la herramienta RStudio con una perspectiva local (ver código en Anexo 6). Las técnicas locales se concentran en estimar el impacto de un parámetro a la vez en la salida del modelo, a partir de la variación numérica de este y de estimar el coeficiente de correlación de Pearson.

Para este análisis se realizaron un conjunto de técnicas estadísticas enfocadas en determinar el impacto que tienen las variaciones en las variables: C (concentración del CC), TC (consumo de agua), PC (peso corporal) y el FE (factor de exposición) en la ecuación del cálculo de la DEE *oral*. El resto de los parámetros de entrada del modelo se consideraron valores constantes.

Para conocer la influencia relativa de cada parámetro en las variables dependientes (DEE *oral*) se utilizaron las mismas distribuciones y valores de cada variable que las que se emplearon para el análisis de Monte Carlo. Para mantener constante un parámetro se empleó el mismo valor que el empleado en el cálculo de las DEE por método determinístico. Finalmente, para conocer el % de la variación que explica cada parámetro de entrada definido, se realizó una regresión lineal a las distribuciones obtenidas como resultado del análisis de sensibilidad, en Excel.

- *Validación del método probabilístico con el método determinístico*

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos mediante los métodos determinísticos y la simulación de Monte Carlo. Esto permitió evaluar la robustez de los hallazgos y determinar si la incertidumbre se ha tenido en cuenta adecuadamente. Para esto se estimó el intervalo de confianza (IC) del 95% y se pasó a validar que la DEE por el método determinístico estuviera dentro de este rango. Para determinar el IC de cada distribución obtenida (624 en total) se empleó el Método de Máxima Verosimilitud en RStudio (ver código en Anexo 7).

Posteriormente, se emplearon funciones lógicas para que arrojara “Verdadero” si la DEE obtenida por el método determinístico (datos de tipo vectorial) estaban entre los límites establecidos para el IC de las 624 distribuciones (datos de tipo *data frame*). Para la

representación visual de los resultados obtenidos se hizo uso de la librería ggplot2 de RStudio.

A priori se tiene que, si el valor determinístico cae significativamente fuera del intervalo de confianza del 95%, esto podría indicar discrepancias entre el modelo o suposiciones determinísticas y la realidad representada por los datos y la incertidumbre. Ello sugiere la necesidad de revisar el modelo o las suposiciones subyacentes. En caso contrario, cuando un valor obtenido mediante un método determinístico cae dentro del IC del 95% derivado de análisis de Monte Carlo a los mismos datos, se estará reconociendo que el valor es plausible en el contexto de las variabilidades e incertidumbres en esos datos (US.EPA, 2023).

4.6 Modelo Conceptual del Riesgo

Con el procesamiento e interpretación de la información recopilada y la generada se confecciono el Modelo Conceptual del Riesgo (MCR). El MCR permite identificar el camino que sigue el contaminante para llegar a la población. Se consideraron aquellas rutas que si representan un riesgo potencial y se descartaron las que como resultado del análisis cuantitativo y cualitativo del riesgo resultaron en la no probabilidad de riesgo como se indica en la Fig. 4.9.

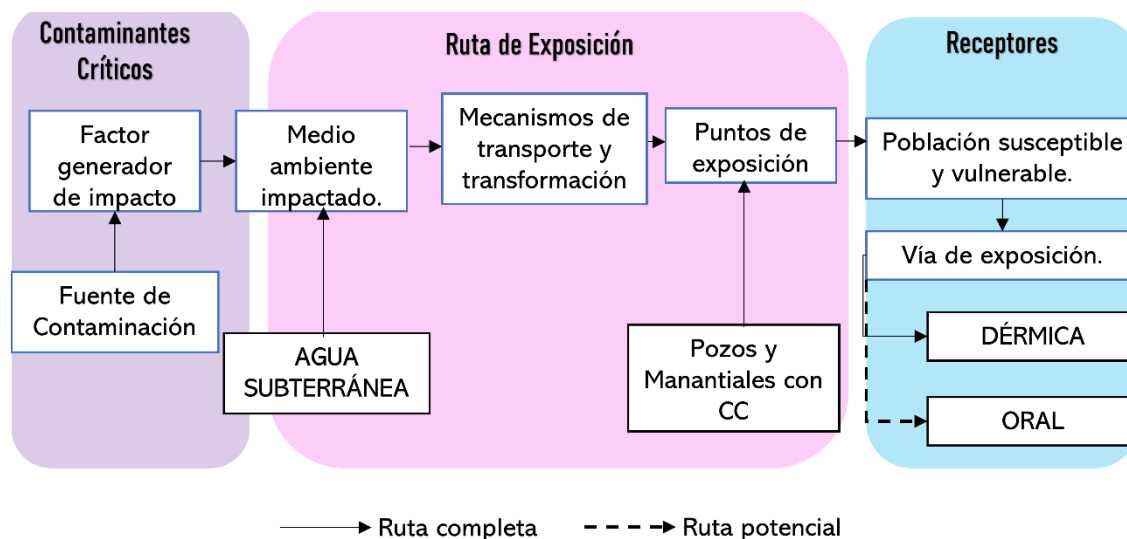


Figura 4.9. Diagrama de flujo metodológico para la confección del MCR esquemático.

Por consiguiente, a través de la identificación de sus componentes, se podrían diseñar las barreras que impidan la exposición humana a los CC. Es desde donde se partió para proponer las medidas de mitigación en los casos en que se determinó que existe un riesgo potencial a la salud humana.

Para confeccionar el modelo conceptual de riesgo se utilizó el software de código abierto Inkscape. Es una herramienta para ilustradores enfocada en la elaboración de gráficos vectoriales. Ofrece muchas capacidades de diseño detallado y control estético en la confección de esta modalidad de gráficos, es gratuita y permite exportar los resultados en varios formatos.

4.7 Propuesta de medidas de gestión/mitigación

Finalmente, se presentaron las posibles medidas de gestión y mitigación del riesgo que podrían ser implementadas para proteger la salud de la población afectada. A partir de la información generada y modelos conceptuales, se pudo emitir juicios respecto a las opciones de gestión de riesgos que podrían ser consideradas en términos de sus efectos positivos y negativos según factores técnicos y económicos, seguridad ambiental, problemas sociales y capacidades organizacionales al medio ambiente. La estrategia elegida implicaría mitigar el riesgo.

Para proponer medidas de gestión y mitigación del riesgo se tuvieron en cuenta varios factores:

- Comprender claramente los peligros específicos y las sustancias químicas involucradas.
- Cuantificar y caracterizar adecuadamente las rutas de exposición y las poblaciones afectadas.
- Reconocer y abordar la incertidumbre en los datos y suposiciones utilizados en la ERS.
- Comprender la hidrodinámica y la hidrogeoquímica del acuífero es esencial para diseñar medidas efectivas de mitigación, como barreras de contención, extracción de aguas subterráneas contaminadas o tratamiento in situ según corresponda.

- Familiarizarse con las regulaciones y estándares pertinentes, así como las recomendaciones asociadas a los niveles de CC dadas por organismos internacionales rectores en la materia como la WHO.
- Evaluar los costos y beneficios de las medidas propuestas, considerando tanto los impactos económicos como los impactos en la salud y el medio ambiente.

En resumen, proponer las medidas de gestión y mitigación del riesgo requirió de una comprensión profunda de los peligros, la exposición y la respuesta en la salud, así como la consideración de factores como la incertidumbre y las características del acuífero. Estas medidas están alineadas con objetivos claros de salud y seguridad, regulaciones aplicables y consideraciones de costo-beneficio.

Capítulo 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el desarrollo de este capítulo se presentan los resultados detallados de las mediciones, análisis estadísticos y evaluaciones de riesgo, destacando tanto los aspectos favorables como aquellos que demandan una pronta atención y medidas correctivas. La relevancia de estos hallazgos radica en su potencial contribución a la toma de decisiones informadas en materia de gestión hídrica y salud pública, enfocadas en la protección y preservación de este vital recurso natural y de la vida humana.

5.1 Confección de la Base de Datos

Esta etapa fue fundamental para el proyecto, ya que proporcionó una base sólida de datos geoespaciales, sobre las características hidrodinámicas y de calidad del agua, además de todo lo referente a umbrales toxicológicos necesarios para la estimación del riesgo.

5.1.1 Recopilación de la información bibliográfica

En el Anexo 4 se resumen los datos, parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los puntos de muestreo reportados en la bibliografía. En la tabla 5.1 se resumen los datos relacionados a la localización y el uso de estos puntos.

Tabla 5.1 Resumen de los datos de localización, tipo de captación y uso de los puntos identificados en la bibliografía empleados en la base de datos.

ID de campo	Tipo	Longitud (X)	Latitud (Y)	Municipio	Uso	Fecha de muestreo (mes/año)
MZ-347	Pozo	483767	2210938	Apaxco	Publico Urbano	01/2008
MZ-357	Pozo	480281	2203221	Apaxco	Publico Urbano	02/2008
MZ-360	Pozo	482959	2208111	Apaxco	Publico Urbano	02/2008
MZ-100	Pozo	475323	2215489	Atitalaquia	Potable	01/2008
MZ-100	Pozo	475323	2215489	Atitalaquia	Potable	11/2012
MZ-103	Pozo	475816	2217081	Atitalaquia	Publico Urbano	01/2008
MZ-104	Pozo	475159	2217376	Atitalaquia	Publico Urbano	01/2008
MZ-106	Pozo	477657	2216823	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2012
MZ-111	Pozo	474754	2218607	Atitalaquia	Publico Urbano	01/2008
MZ-111	Pozo	474754	2218607	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2012
MZ-114	Noria	474829	2219050	Atitalaquia	Doméstico	11/2012
MZ-378	Pozo	473278	2216897	Atitalaquia	Industrial	11/2012
MZ-79	Pozo	474029	2216134	Atitalaquia	Publico Urbano	01/2008
MZ-79	Pozo	474029	2216134	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2012
MZ-118	Pozo	472475	2212001	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	01/2008
MZ-326	Pozo	480165	2212460	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	01/2008
MZ-326	Pozo	480165	2212460	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	11/2012
MZ-327	Manantial	478884	2211744	Atotonilco de Tula	Recreativo	01/2008
MZ-328	Manantial	478872	2211747	Atotonilco de Tula	Recreativo/Domestico	12/2012
MZ-367	Pozo	468944	2206445	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	02/2008
MZ-441	Pozo	475893	2204702	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	02/2008
MZ-92	Noria	474622	2213104	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	11/2012
MZ-323	Pozo	478550	2216592	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	01/2008
MZ-36	Pozo	468658	2221087	Tula de Allende	Industrial	01/2013
MZ-38	Pozo	470156	2221200	Tula de Allende	Industrial	01/2013
MZ-427	Noria	466620	2219660	Tula de Allende	Sin Uso	11/2012
MZ-430	Noria	471915	2217959	Tula de Allende	Sin Uso	02/2008
MZ-44	Pozo	470957	2220437	Tula de Allende	Publico Urbano	12/2007
MZ-453	Pozo	470927	2218989	Tula de Allende	Industrial	01/2013
MZ-46	Pozo	471529	2223179	Tula de Allende	Publico Urbano	12/2007
MZ-52	Pozo	469852	2220429	Tula de Allende	Cerrado	12/2007
MZ-64	Pozo	468634	2222767	Tula de Allende	Industrial	01/2013
MZ-65	Pozo	467930	2223477	Tula de Allende	Industrial	12/2007
MZ-76	Noria	469072	2218894	Tula de Allende		01/2008
MZ-80	Pozo	466556	2220135	Tula de Allende	Publico Urbano	01/2008
MZ-82	Pozo	465767	2215842	Tula de Allende	Publico Urbano	01/2008
MZ-80	Pozo	466556	2220135	Tula de Allende	Publico Urbano	11/2012

ID: Identificador

En la Fig. 5.1 se puede apreciar la distribución espacial de estos puntos identificados en la bibliografía y empleados en la presente investigación.

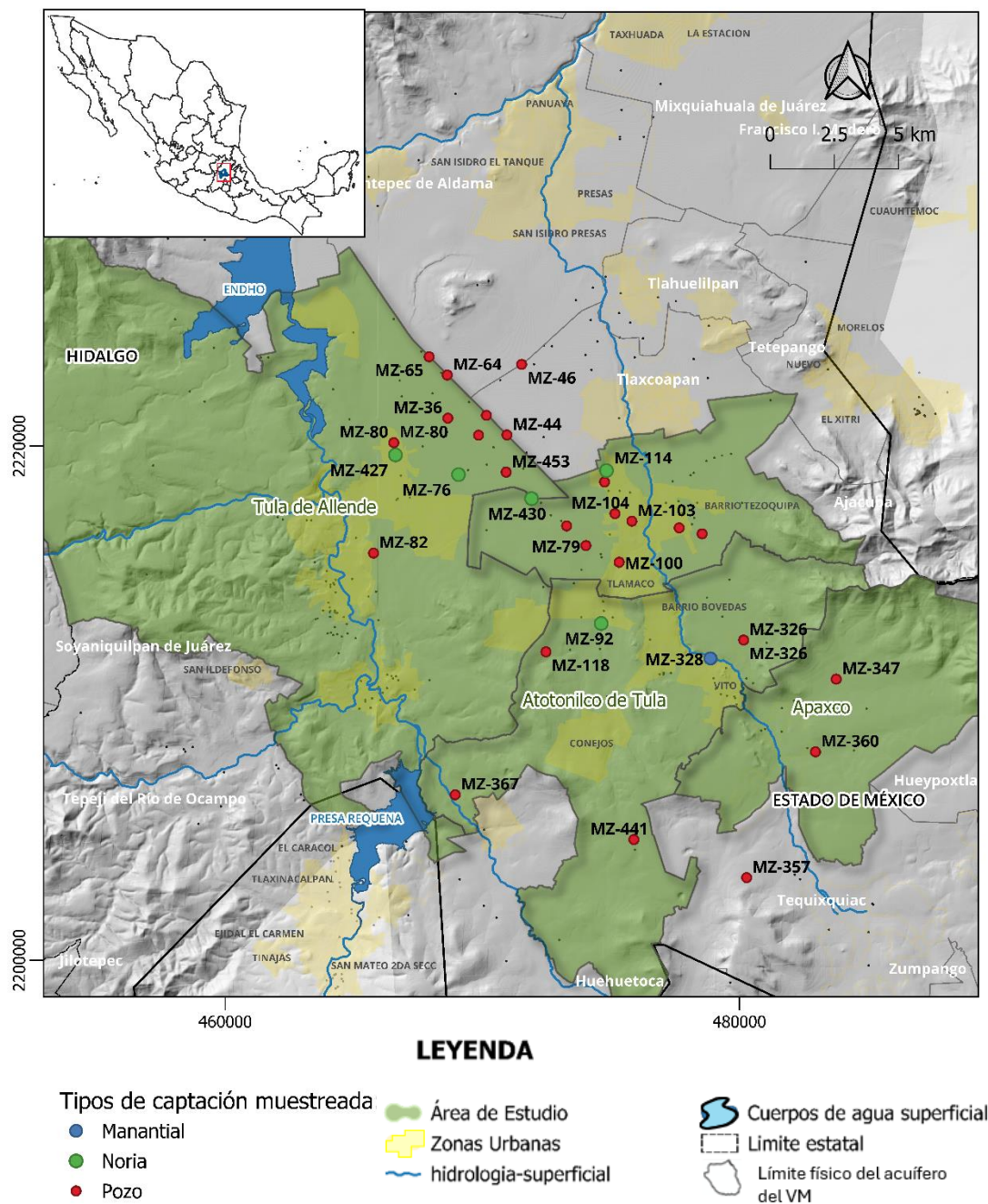


Figura 5.1. Mapa de localización de puntos de muestreo identificados en la literatura empleados en la investigación.

5.1.2 Campañas de muestreo

En el Anexo 2 y 3 se resumen los datos, los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los puntos de muestreo analizados durante ambas campañas de muestreo. En la tabla 5.2 se resumen los datos relacionados a la localización y el uso de estos puntos.

Tabla 5.2 Resumen de los datos de localización, tipo de captación y uso de los puntos analizados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998

ID de campo	Tipo	Longitud (X)	Latitud (Y)	Municipio	Uso	FM
AP-01	Pozo	485035	2211180	Apaxco	Publico Urbano	11/2022
AP-01	Pozo	485035.4	2211180.3	Apaxco	Publico Urbano	06/2023
AP-02	Pozo	480844	2202696	Apaxco	Publico Urbano	11/2022
AP-04	Pozo	486456	2209494	Apaxco	Publico Urbano	11/2022
AP-05	Pozo	483098	2210091	Apaxco	Publico Urbano	11/2022
AP-05	Pozo	483098	2210091	Apaxco	Publico Urbano	06/2023
MZ-360	Pozo	482959	2208111	Apaxco	Agua Residual	11/2022
MZ-360	Pozo	482959	2208111	Apaxco	Recreativo	06/2023
MZ-104	Pozo	475159	2217384	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2022
MZ-104	Pozo	475159.3	2217377.2	Atitalaquia	Publico Urbano/Agrícola	06/2023
MZ-106	Pozo	477654	2216820	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2022
MZ-106	Pozo	477657.9	2216823.9	Atitalaquia	Publico Urbano	06/2023
MZ-108	Pozo	476880	2219525	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2022
MZ-110	Pozo	475405	2218270	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2022
MZ-110	Pozo	475406	2218264	Atitalaquia	Publico Urbano	06/2023
MZ-111	Pozo	474752	2218599	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2022
MZ-111	Pozo	474754	2218607	Atitalaquia	Publico Urbano	06/2023
MZ-316	Pozo	478237	2217971	Atitalaquia	Publico Urbano	11/2022
MZ-312	Pozo	479359	2219791	Atitalaquia	Publico Urbano	06/2023
CNL-R	Canal	467928	2217138	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	06/2023
MZ-322	Pozo	478163	2216588	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	11/2022
MZ-326	Pozo	480167	2212483	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	06/2022
MZ-326	Pozo	480165.8	2212460.8	Atotonilco de Tula	Recreativo	06/2023
MZ-334	Manantial	479692	2211439	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	06/2023
MZ-89	Pozo	474639	2213653	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	06/2023
Pozo- 7	Pozo	469044	2206042	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	11/2022
Pozo- 7	Pozo	474944	2201400	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	06/2023
TOTO-03	Pozo	475757	2199570	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	11/2022
TOTO-04	Pozo	474944	2201400	Atotonilco de Tula	Publico Urbano	11/2022
MZ-60	Manantial	472576.6	2224818.7	Tezontepec de Aldama	Publico Urbano	06/2023
CN-2	Manantial	465768.3	2213389.4	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
LC	Manantial	467746	2215967	Tula de Allende	Recreativo	06/2023
MZ-161	Pozo	462794	2217399	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
MZ-162	Pozo	462536	2217232	Tula de Allende	Publico Urbano	11/2022
MZ-225	Pozo	463406	2225356	Tula de Allende	Recreativo	11/2022
MZ-225	Pozo	463406	2225356	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
MZ-39	Pozo	470580	2220373	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
MZ-68	Pozo	467890.6	2217151.4	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
MZ-80	Pozo	466571	2220120	Tula de Allende	Publico Urbano	11/2022
MZ-80	Pozo	466556.4	2220135	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
MZ-82	Pozo	465767	2215842	Tula de Allende	Publico Urbano	06/2023
TU-01	Pozo	452392	2222601	Tula de Allende	Publico Urbano	11/2022

ID: Identificador; FM: Fecha del muestreo (mes/año).

En la Fig. 5.2 se puede apreciar la distribución espacial de los puntos de muestreo empleados en esta investigación como resultado de las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.

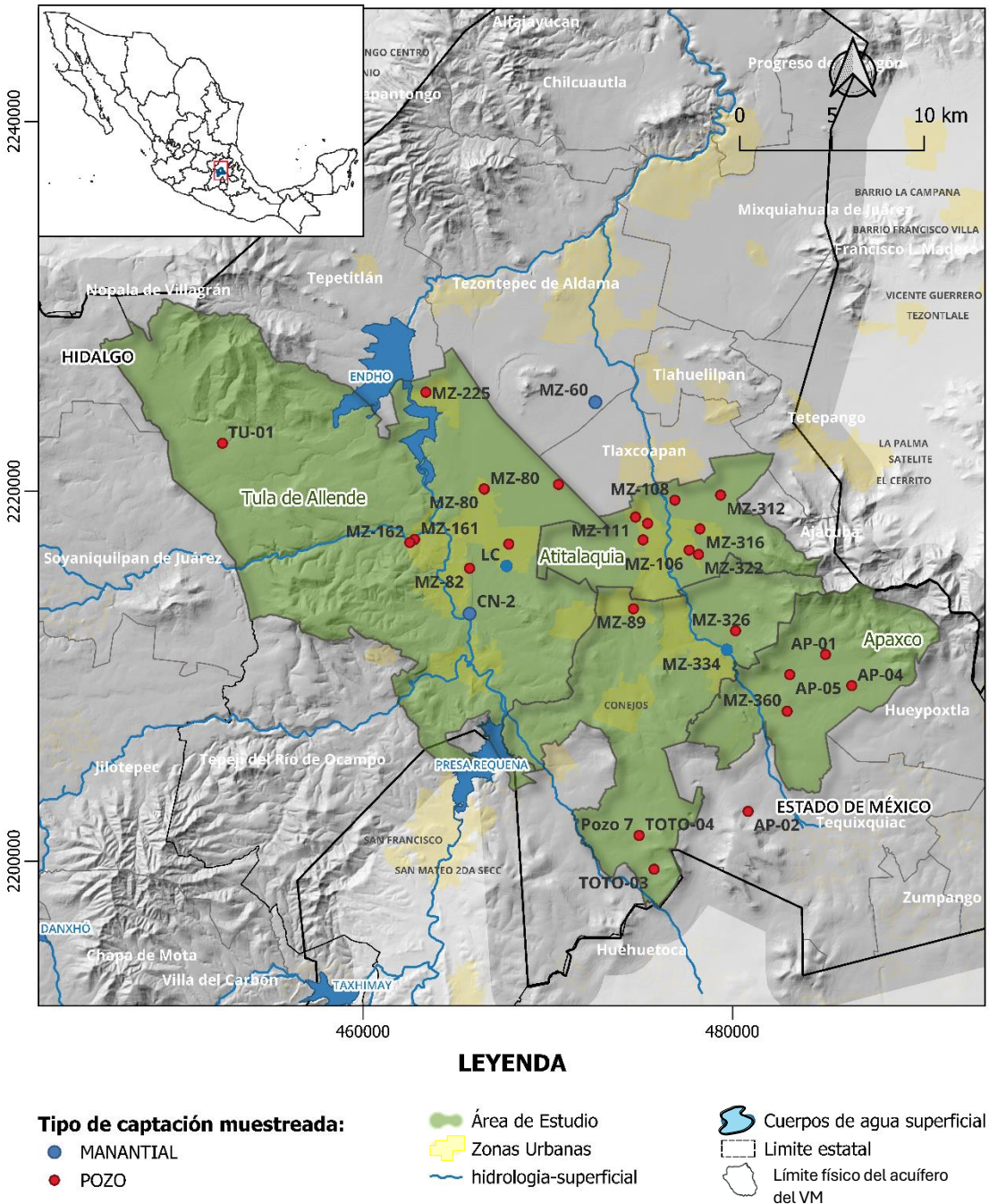


Figura 5.2. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo analizados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998

En la tabla 5.3 se resumen aquellos puntos muestreados en más de una ocasión ya sea en los trabajos antecedentes, en las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998. En los trabajos de campo se buscaron puntos que coincidiesen con los de la literatura.

Tabla 5.3 Resumen del total de muestreos de puntos analizados en múltiples ocasiones (durante los trabajos antecedentes, campañas de muestreo del PRONAI 318998 y/o en ambos momentos).

ID de campo	Años muestreados			Total de muestreos
	2007	2012	2022	
AP-01			x	2
AP-05			x	2
MZ-360	x		x	3
MZ-100	x	x		2
MZ-104	x		x	2
MZ-106		x	x	3
MZ-110			x	2
MZ-111	x	x	x	4
MZ-79	x	x		2
MZ-326	x	x	x	4
Pozo - 7			x	2
MZ-225			x	2
MZ-80	x	x	x	4
MZ-82	x		x	2

ID: Identificador

5.1.3 Aplicación y procesamiento de encuestas

Los resultados de la encuesta aplicada resumen las principales tendencias y patrones de la población local respecto al agua subterránea. Aportan una perspectiva valiosa para la investigación y la gestión del riesgo en cuanto a los hábitos de la población, la gestión y uso del agua subterránea captada. Tanto el formato de las encuestas aplicadas como los resultados obtenidos se ofrecen en el Anexo 8.

De estas encuestas se obtuvo que el tratamiento en los puntos de captación de agua subterránea se limita a su cloración, la cual resulta ineficiente ante la contaminación química. No se utilizan filtros en las viviendas. Aunque si cabe destacar que la mayoría de los pozos estaban delimitados correctamente y presentaban mucha limpieza, así como que el pozo 7 de Atotonilco si posee su propia planta de tratamiento. También se obtuvo como resultado sobresaliente que, el promedio de la población no bebe directamente esta agua y que su empleo es mayormente doméstico (ver Anexo 8).

5.2 Hidrodinámica del acuífero. Confección del Modelo Hidrogeológico preliminar.

Se actualizó en un esquema tridimensional el modelo conceptual de funcionamiento del sistema desde el punto de vista de las aguas subterráneas (Fig. 5.3), lo que constituye el Modelo Conceptual Hidrogeológico (MCH) preliminar y la base sobre la que se fundamenta esta investigación. El esquema se confeccionó a partir de información ya existente del funcionamiento del acuífero.

Con base en los trabajos previos (del Arenal, 1985; Lesser et al., 2012) se obtuvo la geometría del acuífero y las unidades hidroestratigráficas, sus características hidrodinámicas (parámetros hidráulicos y piezometría), así como de los elementos claves del balance hídrico. Como resultado de los trabajos desarrollados en el marco del PRONAH 318998 previos a esta investigación se contaba con la cartografía de variables físicas, modelo digital de elevación y de la vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea. Estos insumos se presentaron en los capítulos 2 y 3, como también se explicó en el apartado metodológico presentado en el Capítulo 4.

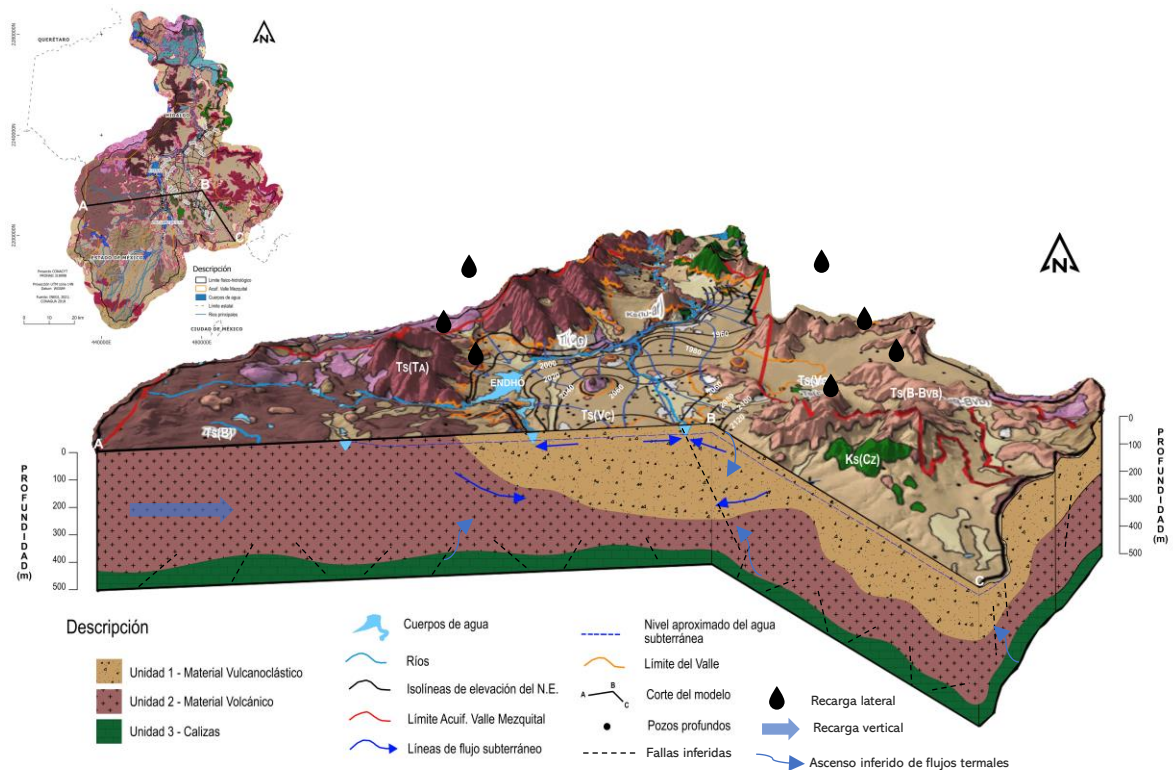


Figura 5.3. Modelo Hidrogeológico Conceptual preliminar (modificado del informe de la Etapa I del proyecto PRONAH 318998).

En el modelo se representa tanto la recarga lateral (entrada por flujo subterráneo como la recarga vertical que según CONAGUA (2015). Esta misma fuente asume una recarga vertical producto de lluvias y escurrimientos superficiales, así como de recarga inducida por excedente de riego agrícola y los canales de aguas residuales no revestidos de los distritos de riego aunado a fugas en las redes de agua potable y el sistema de alcantarillado en zonas urbanas. Según el informe de la Etapa I del PRONAI 318998 se tiene que el río Salado en temporadas aporta al acuífero y en otras recibe del acuífero.

El esquema muestra la primera Unidad Hidroestratigráfica correspondiente al acuífero libre superior. Este acuífero está localizado irregularmente en los aluviones cuaternarios de origen fluvial formado por una alternancia de materiales granulares aluviales, rocas volcánicas y sedimentos piroclásticos con permeabilidad media y espesor promedio de 400 m. Seguidamente se muestra la Unidad 2, parcialmente confinada y localizada principalmente en material volcánico representado en mayor porcentaje por basaltos. Más detalles se dan en el capítulo 2 de esta investigación. Es en estos dos acuíferos donde ocurre la mayor recarga con aguas residuales y a los que se atribuye el origen de manantiales fríos en la región como el Cerro Colorado.

Finalmente se observa la Unidad 3, localizada en las calizas cretácicas y de la cual se infiere se comporta como un acuífero parcial o completamente confinado en la zona artesiana de San Salvador, localizada prácticamente en el centro del área y desde hace muchos años (anterior a 1985) que se evidencia una surgencia casi constante. Por otra parte, se representan las deformaciones estructurales que se infieren en el área de estudio y se asocian al ascenso de los flujos hidrotermales y como parte del ambiente geotectónico asociado al orógeno de la Sierra Madre Oriental (DOF, 2020, Expósito Castillo et al 2022). A este fenómeno se atribuye el origen de los manantiales calientes analizados en esta investigación como son Agua de Vito y La Cantera.

Se representa el flujo principal circulando por el acuífero libre con dirección preferente a las corrientes de aguas superficiales de la región con dirección preferencial de norte a sur. Este flujo es interceptado de manera parcial por numerosos pozos de explotación para diferentes usos. La profundidad del nivel se explica por la dirección general de flujo del

agua subterránea, el cual va de las elevaciones que se encuentran al este, oeste y en la parte sur del acuífero, en la porción correspondiente al Estado de México y se sigue a dirección de los escurrimientos superficiales (Se recomienda consultar el Capítulo 2 de esta investigación para más información).

Este modelo además de derivarse del preexistente se ajusta al descrito en estudios realizados más al norte del área (plataforma El Doctor y parte oeste de la plataforma del Valle san Luis de Potosí (M. Carrillo comunicación verbal citado por del Arenal, 1985). También corresponde con lo descrito para termalismos cercanos como Pathé, Humedades y Dios Padre (del Arenal, 1985) y con lo descrito para acuíferos con presencia de aguas geotérmicas asociados a la Franja Volcánica Trans-mexicana (Cortés et al., 2006).

5.3 Hidrogeoquímica del acuífero

A continuación, se representarán y discutirán los resultados obtenidos del análisis hidrogeoquímico de los datos de origen bibliográfico y de los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998.

Según los datos bibliográficos en el agua subterránea muestreada en pozos abastecidos principalmente de la segunda unidad hidroestratigráfica (basaltos), predominan las de tipo bicarbonatadas sódicas y las mixtas. En el caso de las aguas analizadas en esta investigación se representaron en el diagrama de Piper las mayores concentraciones medidas (Fig. 5.4) para su clasificación y en la tabla 5.3 se resumen las clasificaciones para los tipos de agua obtenidos en cada punto muestreado durante las dos campañas de muestreo. En el Anexo 1 se pueden observar los diagramas de Stiff confeccionados para cada punto muestreado.

De estos resultados se deriva que también se clasificaron como bicarbonatadas, mixtas y por su catión predominante claramente sódicas (Na) y también magnésicas (Mg). De estos también se puede intuir procesos de mezcla de agua para las muestras en los cuadrantes 4 y 3 del diagrama de Piper según la modificación de Kelly (2006).

A partir del diagrama de Piper se distinguen aguas sulfatadas que se caracterizan por mayores temperaturas y valores de sólidos totales disueltos (STD) vinculadas a procesos hidrotermales y al ascenso de flujos profundos a través de las fallas, igualmente se presentan en aguas mixtas como resultado de mezclas. Son estas también las que tienen mayor

contenido de As y F^- .

Las aguas bicarbonatadas y magnésicas que se observan en el diagrama de Piper se caracterizan por tener temperaturas más bajas y menor contenido de sólidos totales disueltos (STD). Corresponden también a las muestreadas en el municipio de Apaxco que se asocia con la zona de recarga.

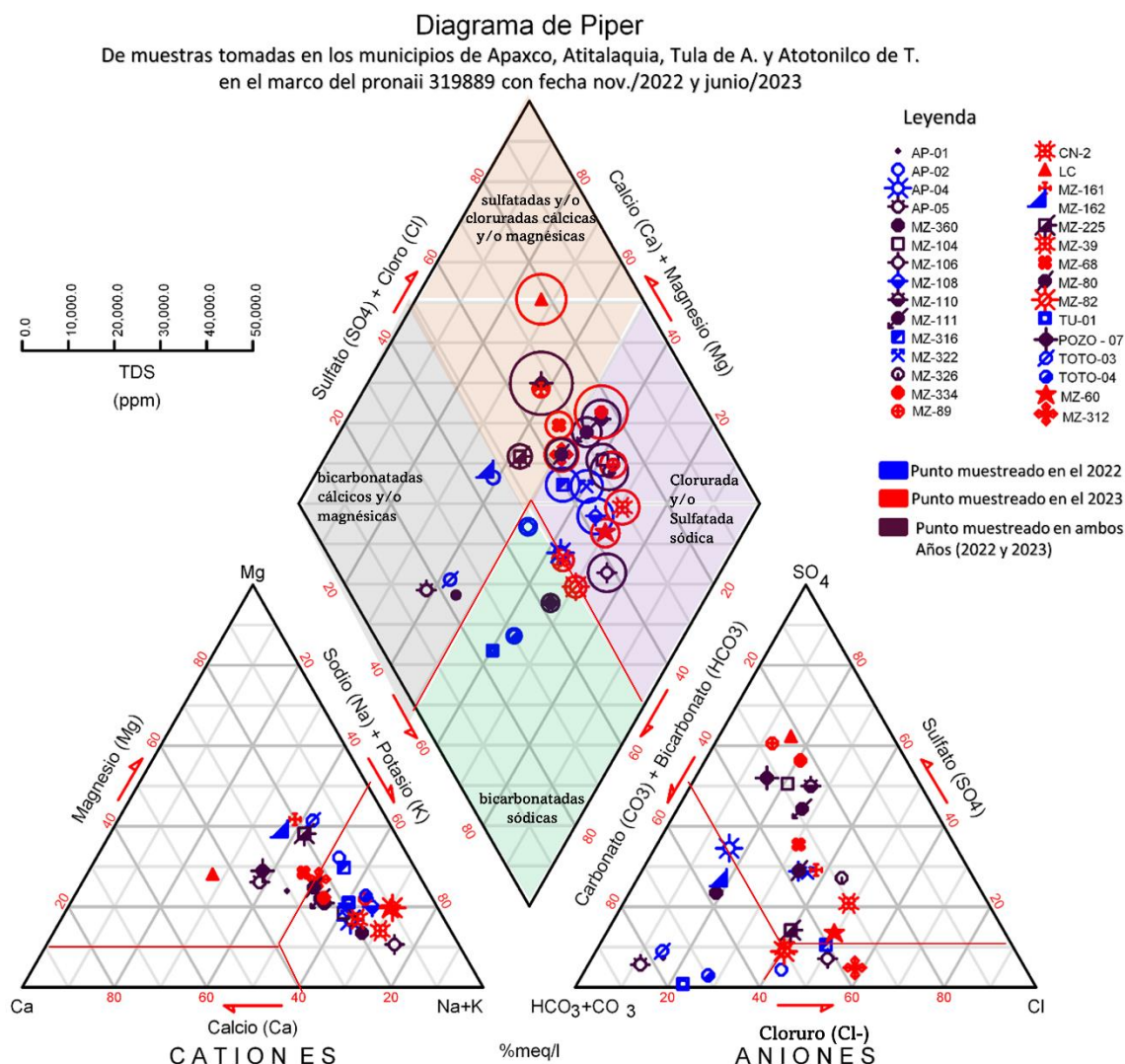


Figura 5.4. Diagrama de Piper para los resultados de análisis químicos obtenidos durante los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998.

En la tabla 5.4 se resumen las clasificaciones de familias de agua por puntos de muestreo según los resultados obtenidos a partir del diagrama de Piper para mejor claridad y facilidad de interpretación.

Tabla 5.4. Resumen de las relaciones de cationes principales y la clasificación de familias de aguas presentes en el área de estudio a partir de los resultados de las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAH 318998.

Id	Na/ Cl	HCO₃⁻ /Ca	Ca/ Mg	SO₄/ Mg	SO₄ /Ca	Clasificación de familias de agua
AP-01	3.5	3.8	2.1	0.6	0.3	bicarbonatada cálcica-magnésica
AP-02	1.5	5.3	0.8	0.3	0.3	bicarbonatada cálcica-magnésica
AP-04	6.7	2.7	2.0	3.0	1.5	mixta (clorurada-sulfatada sódica)
AP-05	3.9	3.8	2.2	0.5	0.2	bicarbonatada cálcica-magnésica
MZ-360	6.0	7.2	1.2	2.9	2.5	bicarbonatada sódica
MZ-104	4.3	1.8	1.9	4.6	2.4	mixta (clorurada-sódica)
MZ-106	1.7	4.8	2.2	1.4	0.7	bicarbonatada sódica
MZ-108	2.5	3.8	1.2	2.7	2.3	mixta (clorurada-sódica)
MZ-110	3.1	1.3	1.9	4.0	2.1	mixta (clorurada-sulfatada-cálcico-magnésica)
MZ-111	2.6	1.6	1.8	3.6	2.0	mixta (clorurada-sulfatada-cálcico-magnésica)
MZ-316	1.2	4.6	0.8	0.8	1.0	mixta (clorurada-sulfatada-cálcico-magnésica)
MZ-322	2.0	2.7	1.7	2.9	1.7	mixta (clorurada-sulfatada sódica)
MZ-326	1.7	2.2	2.0	3.3	1.6	mixta (clorurada-sulfatada sódica)
MZ-334	3.6	1.3	1.7	4.5	2.6	mixta (clorurada-sulfatada-cálcico-magnésica)
MZ-89	9.0	2.0	1.1	3.8	3.5	mixta (clorurada-sulfatada sódica)
Pozo-7	2.9	1.6	1.4	3.1	2.2	mixta (clorurada-sulfatada-cálcico-magnésica)
Toto-3	3.7	7.0	0.6	0.4	0.7	bicarbonatada cálcica-magnésica
Toto-4	3.2	6.6	1.0	0.2	0.2	mixta (clorurada-sulfatada-cálcico-magnésica)
MZ-60	1.7	5.5	0.9	1.4	1.6	mixta (clorurada-sulfatada sódica)
MZ-312	1.0	2.6	1.4	0.4	0.3	sulfatada-cálcica
CN-2	2.1	3.5	1.8	1.0	0.5	bicarbonatada sódica
LC	2.7	0.6	2.6	3.2	1.2	sulfatada-cálcica
MZ-161	1.3	2.3	0.8	1.2	1.6	sulfatada-cálcica
MZ-162	2.2	3.4	1.1	1.3	1.2	bicarbonatada cálcica-magnésica
MZ-225	1.3	3.4	0.9	0.7	0.8	bicarbonatada cálcica-magnésica
MZ-39	1.9	2.9	1.8	2.8	1.6	sulfatada-cálcica
MZ-68	2.0	2.0	1.4	2.3	1.6	sulfatada-cálcica
MZ-80	1.7	2.4	1.6	2.4	1.5	sulfatada-cálcica
MZ-82	2.6	6.4	0.8	0.7	0.9	sulfatada-cálcica
TU-01	2.5	7.8	1.5	0.1	0.1	bicarbonatada sódica

Id: identificador de campo del punto de muestreo

Los puntos MZ-334, MZ-312, MZ-161, MZ-39, MZ-68, MZ-80, MZ-82, Toto-4, Pozo-7 y LC corresponden a aguas de tipo sulfatadas lo que es indicativo de mezclas de aguas con influencia de aguas termales (MZ-334 y LC corresponden a los manantiales termales) y de la infiltración de las aguas residuales.

- *Evaluación de la calidad del agua.*

De la bibliografía se conoce que existen puntos que superan el valor umbral establecido por la NOM-127-2021 en STD, Na⁺, Cl⁻, SO₄⁻, F⁻, As y coliformes totales. Hay que destacar que, en la campaña del 2007, un punto en Al y Fe, y 20 para el Pb superaron el valor límite

de la NOM-127 para luego no volver a ser detectada esta situación. Estos puntos se encuentran bien identificados y localizados espacialmente, sus datos se pueden consultar en el Anexos 3. En la tabla 5.5 se resumen los puntos muestreados en el 2022 y el 2023 que incumplen con la NOM-127.

Tabla 5.5. Relación de los resultados de los análisis fisicoquímicos de los muestreos del 2022 y 2023 en comparación con la NOM-127-SSA1-2021. En negrita, valores que incumplen la NOM-127-2021.

Año	Municipio	Id	pH	STD	SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	F ⁻	As
2022	Apaxco	AP-01	7.4	338	32.0	4.0	0.5	<l.c.
2023	Apaxco	AP-01	7.6	372	14.3	3.4	0.5	ND
2022	Apaxco	AP-02	7.4	744	42.0	7.5	0.4	0.006
2022	Apaxco	AP-04	8.0	480	212.0	0.05	0.4	0.034
2022	Apaxco	AP-05	7.5	432	31.7	6.6	0.3	<l.c.
2023	Apaxco	AP-05	7.6	476	36.1	6.9	0.4	ND
2022	Apaxco	MZ-360	7.1	768	193.4	0.3	0.5	0.118
2023	Apaxco	MZ-360	7.1	786	215.9	0.3	0.6	0.113
2022	Atitalaquia	MZ-104	7.1	1942	811.0	6.3	1.3	0.105
2023	Atitalaquia	MZ-104	7.0	1720	819.1	5.3	1.5	0.092
2022	Atitalaquia	MZ-106	6.5	1420	152.4	24.1	0.7	0.086
2023	Atitalaquia	MZ-106	6.8	1492	113.8	22.6	0.9	0.089
2022	Atitalaquia	MZ-108	7.2	1718	553.2	10.9	0.7	0.071
2022	Atitalaquia	MZ-110	7.2	2278	983.0	8.0	0.9	0.082
2023	Atitalaquia	MZ-110	6.8	2248	1054.1	9.6	1.2	0.091
2022	Atitalaquia	MZ-111	6.9	1562	693.5	10.6	0.9	0.042
2023	Atitalaquia	MZ-111	6.9	1590	784.2	10.4	1.1	0.043
2022	Atitalaquia	MZ-316	6.7	1480	217.9	15.5	0.7	<l.c.
2022	Atotonilco de Tula	MZ-322	6.3	1504	508.1	8.3	0.9	0.066
2022	Atotonilco de Tula	MZ-326	6.7	1850	571.2	13.9	0.7	0.122
2023	Atotonilco de Tula	MZ-326	6.7	1874	609.0	16.1	0.9	0.120
2023	Atotonilco de Tula (MT)	MZ-334	6.4	3132	1561.9	0.1	3.9	0.340
2023	Atotonilco de Tula	MZ-89	7.8	1652	716.5	6.3	0.8	0.035
2022	Atotonilco de Tula (PT)	Pozo 7	5.9	3610	1871.0	0.4	2.1	0.658
2023	Atotonilco de Tula (PT)	Pozo 7	6.3	3600	1655.8	0.3	2.6	0.603
2022	Atotonilco de Tula	Toto-03	7.4	642	56.2	2.9	0.5	<l.c.
2022	Atotonilco de Tula	Toto-04	7.3	456	21.9	5.7	0.4	<l.c.
2023	Tezontepec de Aldama (MF)	MZ-60	6.9	1302	210.3	21.3	0.8	0.020
2023	Atitalaquia	MZ-312	6.8	1556	96.4	24.8	0.2	ND
2023	Tula de Allende	CN-2	7.1	942	102.9	15.5	1.4	0.189
2023	Tula de Allende (MT)	LC	6.2	3396	1536.5	0.2	3.3	0.374
2023	Tula de Allende	MZ-161	7.1	944	270.5	12.2	0.6	ND
2022	Tula de Allende	MZ-162	7.6	624	177.4	0.0	0.5	<l.c.
2022	Tula de Allende	MZ-225	7.4	1072	190.7	18.9	0.6	<l.c.
2023	Tula de Allende	MZ-225	7.2	1102	184.0	20.0	0.7	ND
2023	Tula de Allende	MZ-39	6.9	1690	384.5	21.1	0.4	0.032
2023	Tula de Allende	MZ-68	6.9	1762	526.9	13.5	1.8	0.329
2022	Tula de Allende	MZ-80	7.0	1576	516.3	12.2	0.8	0.091
2023	Tula de Allende	MZ-80	6.9	1710	531.6	12.3	1.0	0.090
2023	Tula de Allende	MZ-82	6.9	898	92.9	12.6	1.5	0.198
2022	Tula de Allende	TU-01	7.7	178	2.0	1.0	0.2	<l.c.
Límite Máximo Permisible de la NOM-127			6.5-8.5	1000	400	11	1.5	0.025

Todas las concentraciones están dadas en mg/L; Id: identificador; <l.c.: límite de cuantificación; N.D: no determinado, MT manantial termal, PT, pozo termal, MF manantial frío)

De la tabla anterior se deriva que el agua supera los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-2021 en los siguientes parámetros:

- pH: en 4 puntos resultó ligeramente más ácida (13.3% del total de puntos muestreados), de los cuales 3 corresponden al municipio de Atotonilco de Tula (representa aproximadamente el 42.86% de los puntos muestreados en este municipio) de los cuales uno corresponde al balneario recreativo “Agua de Vito” (ID: 334) que no aplica a este límite permisible por no emplearse como agua para consumo humano y uno en Tula de Allende (10%) que corresponde al balneario de aguas termales “La Cantera” (ID: LC) que no se emplea como agua potable por lo que tampoco aplica a la norma en cuestión. El otro punto corresponde al pozo termal (Pozo 7, Atotonilco de Tula) que si es usado para abastecimiento una vez el agua es potabilizada con un sistema de osmosis inversa.
- Sólidos totales disueltos (STD): se incumplió en 16 del total de puntos muestreados (53.33%), de los cuales 6 corresponden a Atitalaquia (100%), excluyendo los balnearios y el pozo termal, 4 corresponden a Atotonilco de Tula (57.14%) y 4 en Tula de Allende (40%, siendo uno el balneario). El manantial Cerro Colorado (MZ-60) evaluado en Tezontepec de Aldama también incumple este parámetro.
- SO_4^- : en 12 puntos del total muestreado se superó este índice (40%), 4 en Atitalaquia (57.14%), 5 en Atotonilco de Tula (71.43%) de los cuales uno vuelve a corresponder al balneario termal y otro al pozo termal, y 3 en Tula de Allende (30%) pero uno es también del muestreo en el balneario termal.
- N-NO_3^- en 14 puntos (46.67%), 5 en Atitalaquia (71.43%), 1 en Atotonilco de Tula (14.29%), 7 en Tula de Allende (70%) y el último en el manantial Cerro Colorado en Tezontepec de Aldama.
- F^- en 8 puntos (26.67%), 1 en Atitalaquia (14.29%), 2 en Atotonilco de Tula (28.57%) que corresponden al balneario de aguas termales y al pozo7 que cuenta con su propia planta de potabilización, 4 en Tula de Allende (40%) y uno corresponde al balneario de aguas termales.
- As en 20 puntos (66.67%), 2 en Apaxco (40%), 5 de Atitalaquia (71.43%), 5 en Atotonilco (71.42%, balneario y pozo termal), 7 en Tula de Allende (70%, uno es nuevamente el balneario) y el manantial Cerro Colorado en Tezontepec de Aldama

(MZ-60).

Cuando estos elementos superan los límites establecidos en las normas de agua potable, tanto en los datos bibliográficos como en los muestreos realizados durante las dos campañas, se considera que el agua no es segura para el consumo humano sin un tratamiento adecuado. Esto destaca la importancia de monitorear y gestionar la calidad del agua para garantizar la salud de la población y justifica una evaluación del riesgo a la salud humana.

En el caso de las concentraciones de NO_3^- se asocian a la influencia de la agricultura y las aguas residuales, lo que coincide con los autores que estudiaron la zona y con la tendencia general del incremento de las concentraciones a través de los años muestreados, así como sus bajas concentraciones en el municipio de Apaxco que se ubica en la zona de recarga del acuífero y no presenta actividad agrícola.

Para contaminantes como As y el F^- se puede observar en la figura 5.5 su relación con la T. En ambas variables se observa que existe una relación positiva con la T, es decir, la tendencia al aumento de ambas concentraciones con el incremento de la T lo que se evidencia en que son los puntos de captación de aguas termales los que contienen las mayores concentraciones de F^- y As. Sin embargo, la dispersión de los puntos y los valores de R^2 indican una relación moderada donde el 40.57% de la variabilidad observada en As se explica por los cambios en la temperatura y el 57.06% de la variabilidad del F^- .

La pendiente (0.0144) en la ecuación del As sugiere que, por cada aumento de 1 °C, su concentración aumenta en 0.0144 mg/L. En el caso del F^- la pendiente sugiere un incremento de 0.1056 mg/L por cada incremento de la T en 1 °C. Sin embargo, la poca varianza de las temperaturas ambientales que oscilan en el rango de 19 a 30 °C provocan que las concentraciones de ambas variables oscilen en rangos muy próximos, incluidos manantiales fríos.

Contrario a estas conclusiones se comporta el pozo MZ-68 que a pesar de ser un pozo frío presenta concentraciones más elevadas tanto de As como F^- en comparación al resto de captaciones frías muestreadas en el área de estudio. Esta anomalía puede justificarse por la mezcla o influencia con aguas termales de circulación más profunda.

Estos resultados son indicativos de que los procesos hidrogeoquímicos de liberación de As

y F^- están influenciados positivamente con la T. Se puede hablar entonces de la influencia de los procesos geotermales que se conocen en el área de estudio, con la presencia en el acuífero de As y F^- . Se atribuye consecuentemente un origen de carácter geogénico, aunque la relación moderada sugiere que otros factores podrían estar influyendo en sus concentraciones además de la T, como las características geológicas en el área de estudio.

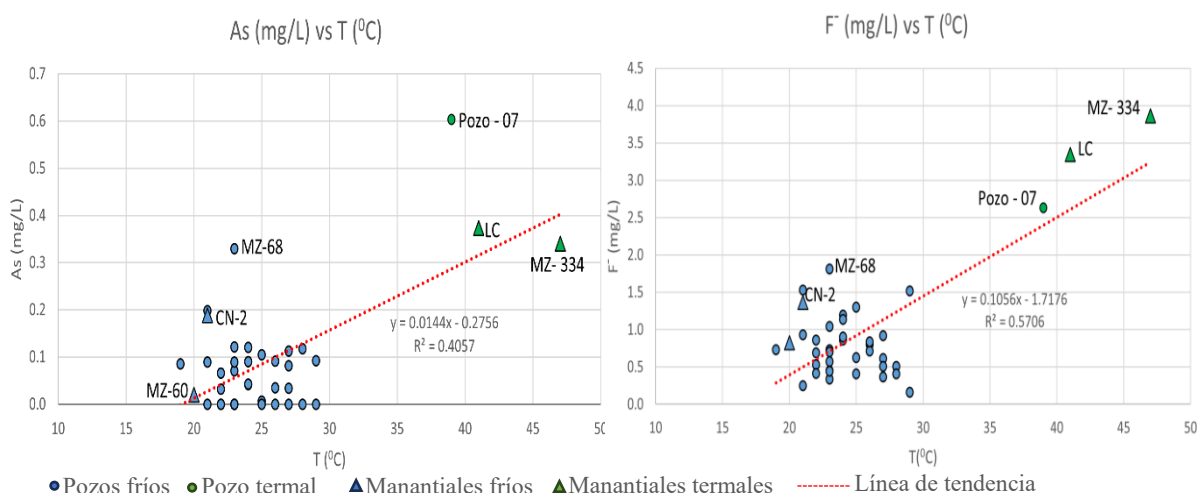


Figura 5.5. Gráficos de dispersión de las concentraciones de As y F^- (mg/L) vs la temperatura ($^{\circ}C$) (Fuente: los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998).

En la figura 5.6 se puede observar una relación positiva entre las concentraciones de As y F^- en el agua subterránea. Esto significa que, a medida que aumenta la concentración de As, también tiende a aumentar la concentración de F^- . El valor de la pendiente (5.2231) indica que por cada incremento de 1 mg/L en As, la concentración de F^- aumenta en 5.2231 mg/L.

El intercepto de 0.4908 indica el valor estimado de F^- cuando el As es cero. El valor de $R^2=0.7189$ sugiere una relación relativamente fuerte entre las dos variables, explicando el 71.89% de la variabilidad observada en F^- por los cambios en As.

La relación positiva y fuerte entre ambos componentes podría indicar que los mismos procesos geoquímicos o fuentes geológicas están contribuyendo a la liberación o la presencia de ambos elementos en el agua subterránea. Lo que concuerda con lo publicado

con otros estudios en el acuífero y con la influencia positiva de la temperatura (relacionada con procesos geotermales) en ambas concentraciones.

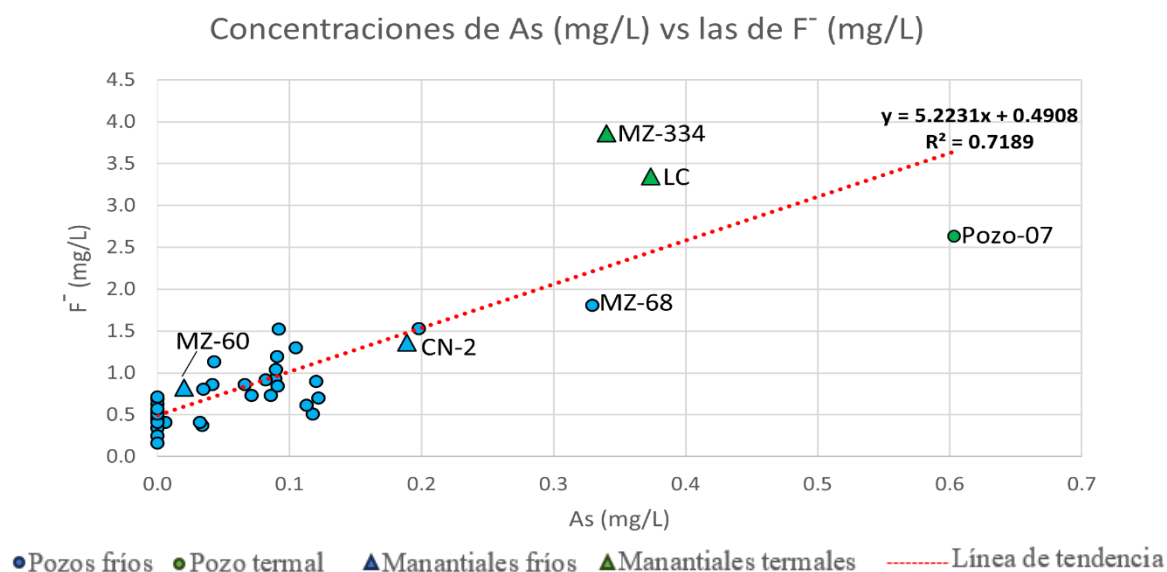


Figura 5.6. Gráficos de dispersión de las concentraciones de As vs F⁻ en mg/L elaborado con los datos obtenidos de los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998.

5.3.1 Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio.

El Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio incluyó su caracterización fisicoquímica, la génesis determinada para elementos que superaron la norma mexicana de consumo de agua potable y el modelo hidrodinámico del acuífero, lo que permite visualizar las vías de exposición (fig. 5.7).

El esquema muestra lo establecido en el MCH más los contaminantes y su origen. Se representa la infiltración de contaminantes asociados a la actividad agrícola (N-NO_3^-) y las aguas residuales y los asociados a procesos naturales de disolución, adsorción como interacción del sistema agua-roca (F^- y As). El MHC estará sujeto a variación en función al análisis y desarrollo de los datos y resultados faltantes.

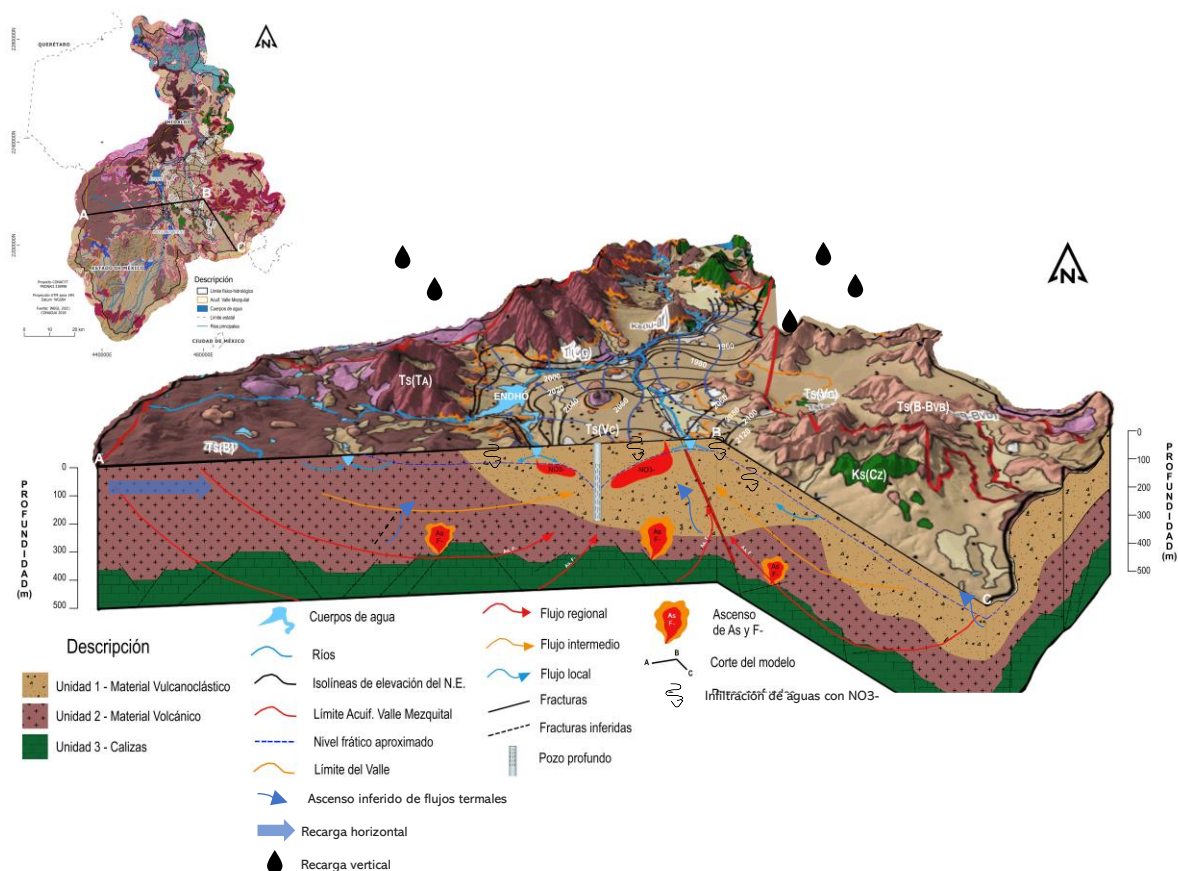


Figura 5.7. Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio. (Modificado del informe de la etapa II del proyecto PRONAH 318998).

5.4 Evaluación del riesgo a la salud humana

En esta sección, se presentan los resultados de la evaluación del riesgo a la salud humana, brindando un panorama completo de las implicaciones sanitarias asociadas al consumo de aguas subterráneas en el Valle Mezquital.

5.4.1 Definición del problema

A continuación, se discutirán los resultados obtenidos en el desarrollo de esta subetapa metodológica.

5.4.1.1 Selección de Contaminantes Críticos

De los 37 elementos químicos cuantificados en el área de estudio, se consideran tóxicos: N-NO₃⁻, N-NO₂⁻, F⁻, As, B, Ba, Cu, Mn, Mo, Sr, Zn y el Cr. En la tabla 5.8 se resumen los índices calculados de la EMEG y los establecidos por la WHO y en la NOM-127-2021 para el agua potable de los elementos tóxicos identificados.

Tabla 5.6. Relación de elementos tóxicos cuantificados en el área de estudio y sus límites permisibles establecidos por la WHO, NOM-127-2021 y la EMEG calculada.

ET	EMEG	WHO	LMP
N-NO ₃ ⁻	16	*	11
N-NO ₂ ⁻	1	0.2	0.9
F ⁻	0.5	1.5	1.5
As	0.003	0.01	0.025***
B	0.35	0.5	NE
Ba	2	0.7	1.3
Cu	0.05	2	2
Mn	0.42	0.4	0.15
Mo	0.05	0.07	NE
Sr	18	**	NE
Zn	3	3	5
Cr	0.03	0.05	0.05

ET: elemento tóxico; EMEG: Guía de Evaluación para medios Ambientales de la ATSDR; WHO: índice de referencia para el agua potable establecido por la Organización Mundial de la Salud en mg/L; LMP: Límites permisibles de la calidad del agua establecidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127) en mg/L.

NE: no establecido *no determinado para exposiciones crónicas. **ofrecido en Bq/litre. ***este año entra en vigor 0.01mg/L.

Hay que señalar que, aunque se reconoce la toxicidad de los elementos, la NOM-127-2021 no establece un índice máximo permisible para el B, el Mo y el Sr, y los valores establecidos son superiores a las recomendaciones de la WHO para el N-NO₂⁻, el Ba y el Zn. Esto sugiere la necesidad de revisar y ajustar los estándares de calidad del agua para garantizar la protección de la salud pública frente a la exposición a estos contaminantes.

El resultado de comparar las concentraciones de las sustancias tóxicas con los índices de la NOM-127-2021, la WHO y la EMEG en cada punto de muestreo se detalla en el Anexo 3. En la tabla 5.9, se da esta relación para aquellos elementos que superan al menos un índice y se resaltan con un formato diferente.

Tabla 5.7. Resumen de concentraciones máximas de CC determinadas durante los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAH 318998.

Id	N-NO ₃ ⁻	F ⁻	As	B	Id	N-NO ₃ ⁻	F ⁻	As	B
	(mg/L)					(mg/L)			
AP-01	3.982	0.450	<l.c.	0.112	MZ-326	16.118	0.901	0.120	0.851
AP-01	3.398	0.532	ND	0.143	MZ-89	6.272	0.803	0.035	1.614
AP-02	7.514	0.410	0.006	0.383	Pozo - 07	0.364	2.050	0.658	4.453
AP-04	0.046	0.370	0.034	1.200	Pozo - 07	0.281	2.630	0.603	5.029
AP-05	6.595	0.340	<l.c.	0.149	Toto-03	2.886	0.480	<l.c.	0.178
AP-05	6.866	0.441	ND	0.202	Toto-04	5.668	0.410	<l.c.	0.442
MZ-360	0.251	0.510	0.118	1.167	MZ-60	21.292	0.826	0.020	1.217
MZ-360	0.321	0.612	0.113	1.271	MZ-312	24.791	0.250	ND	0.497
MZ-104	6.266	1.300	0.105	1.510	CN-2	15.521	1.365	0.189	1.267
MZ-104	5.342	1.521	0.092	1.672	MZ-161	12.178	0.624	ND	0.184
MZ-106	24.120	0.730	0.086	1.427	MZ-162	0.002	0.510	<l.c.	0.161
MZ-106	22.590	0.928	0.089	1.702	MZ-225	18.901	0.570	<l.c.	0.711
MZ-108	10.919	0.730	0.071	1.720	MZ-225	20.015	0.712	ND	0.729
MZ-110	7.980	0.920	0.082	1.510	MZ-39	21.114	0.412	0.032	1.798
MZ-110	9.602	1.194	0.091	1.769	MZ-68	13.497	1.811	0.329	1.234
MZ-111	10.596	0.860	0.042	0.801	MZ-80	12.191	0.840	0.091	1.233
MZ-111	10.423	1.135	0.043	0.934	MZ-80	12.265	1.040	0.090	1.383
MZ-316	15.527	0.690	<l.c.	0.520	MZ-82	12.596	1.528	0.198	0.988
MZ-322	8.296	0.860	0.066	0.970	TU-01	0.955	0.160	<l.c.	0.019
MZ-326	13.855	0.700	0.122	0.752	LC	2.753	3.346	0.374	2.753
MZ-334	3.102	3.863	0.340	3.102					

Id: Identificador; ND: no determinado; <l.c.: menor al límite de cuantificación

*no determinado para exposiciones crónicas. NE: no establecido

De lo anterior se deriva que los CC en el área de estudio son el As, el F⁻, el N-NO₃⁻ y el B. Respecto al B, debido a que no aparece en la Norma Mexicana de uso y consumo de agua potable y que la US.EPA a pesar de considerarlo como un cancerígeno no cuenta con estudios para estimar su Factor de Pendiente se imposibilita la estimación del riesgo a partir de los modelos probabilísticos que emplea esta metodología, por lo que no será analizado en este estudio.

En la figura 5.8 se representa en un diagrama de Venn de tres círculos los puntos muestreados durante las dos campañas de muestreo que presentan uno, dos o los tres CC.

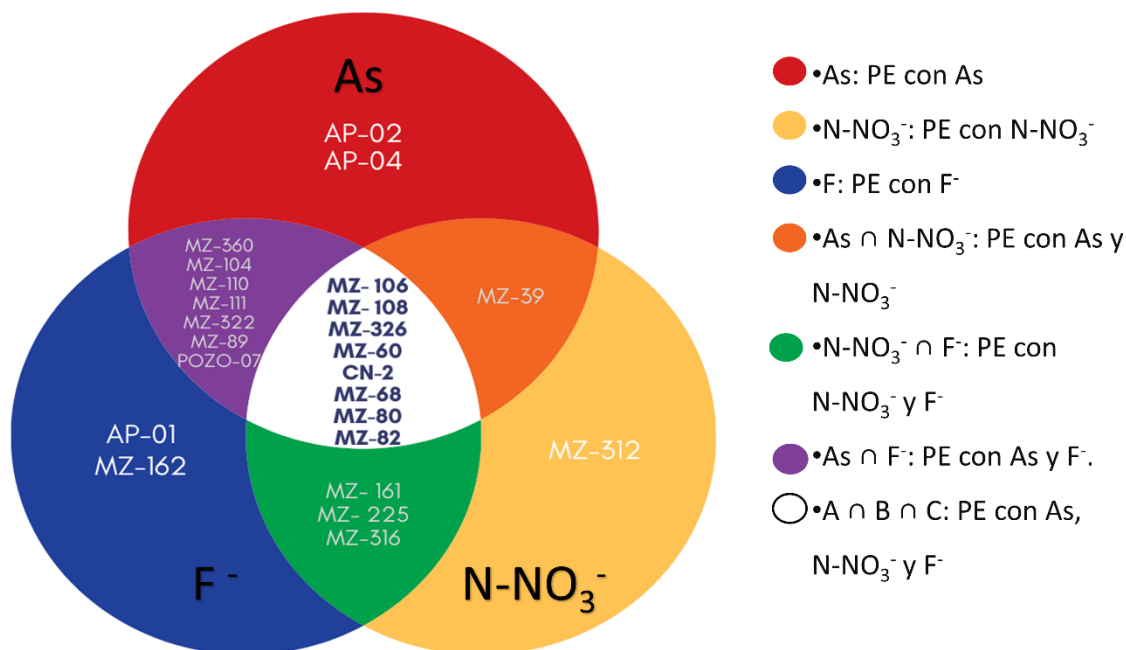


Fig.5.8. Diagrama de Venn de los CC obtenidos a partir de los resultados de los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAH 318998.

De forma visual se comprueba que es común que aparezcan juntos los tres CC y el As con el F⁻. Hasta la fecha el menos común es el N-NO₃⁻ pero es necesario tener en cuenta su origen antropogénico y consecuentemente el incremento de sus concentraciones en el acuífero en los próximos años al tratarse de un elemento muy soluble (Capítulo 3).

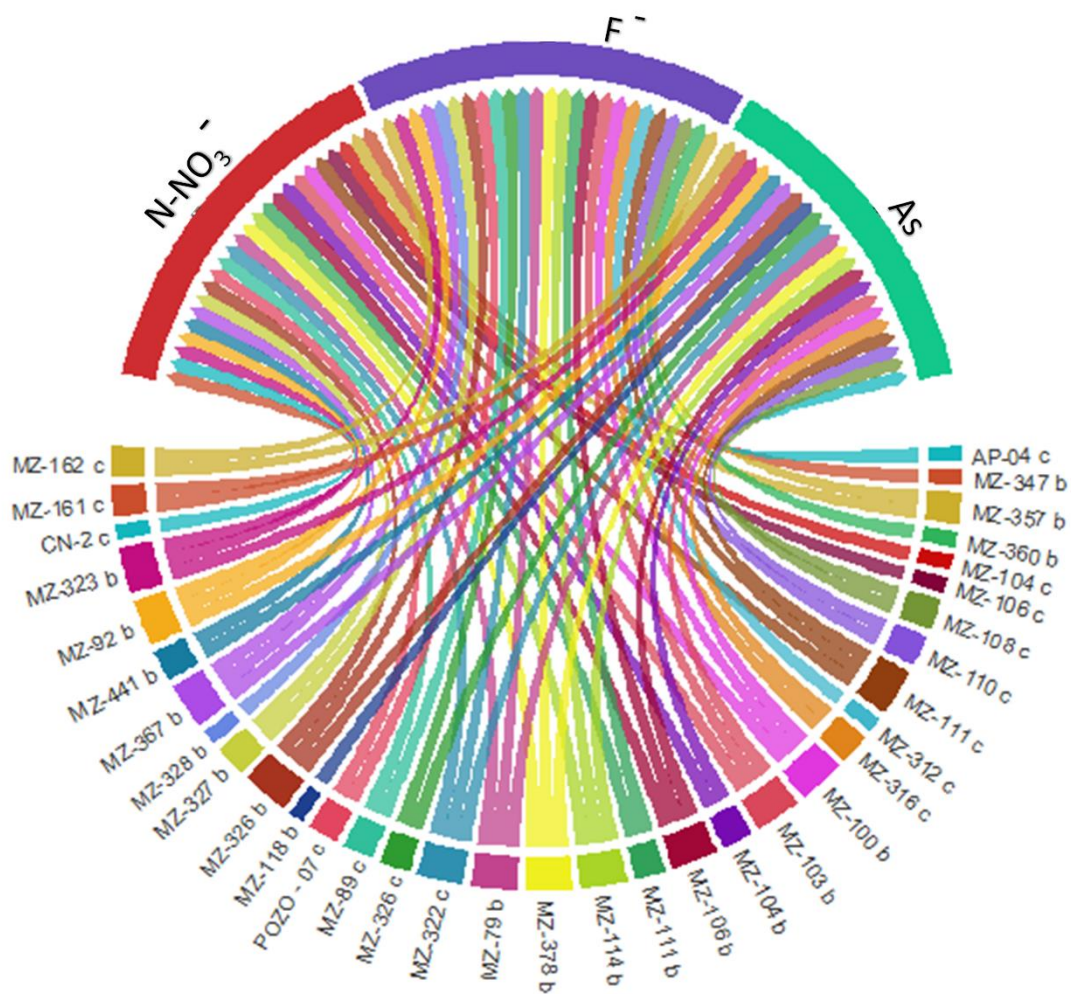
En la tabla 5.10 se relaciona la concentración máxima de CC y el municipio al que pertenecen identificados en los datos bibliográficos.

Tabla 5.8. Resumen de concentraciones máximas de CC determinadas en la bibliografía por municipios del área de estudio.

Municipio	Id	N-NO ₃ ⁻	F ⁻	As
		mg/L		
Apaxco	MZ-347	SD	1.32	ND
Apaxco	MZ-357	SD	1.14	ND
Apaxco	MZ-360	SD	1.41	ND
Atitalaquia	MZ-100	3.67	2.83	0.09
Atitalaquia	MZ-103	SD	1.74	ND
Atitalaquia	MZ-104	SD	3.91	0.10
Atitalaquia	MZ-106	19.83	0.93	0.07
Atitalaquia	MZ-111	8.51	2.49	0.06
Atitalaquia	MZ-114	8.36	0.33	0.08
Atitalaquia	MZ-378	4.09	0.14	0.07
Atitalaquia	MZ-79	6.86	2.77	0.05
Atotonilco de Tula	MZ-118	SD	4.37	0.10
Atotonilco de Tula	MZ-326	10.5	2.34	0.12
Atotonilco de Tula	MZ-327	SD	4.43	0.42
Atotonilco de Tula	MZ-328	0.90	3.03	0.37
Atotonilco de Tula	MZ-367	SD	1.10	ND
Atotonilco de Tula	MZ-441	SD	2.90	ND
Atotonilco de Tula	MZ-92	3.30	0.23	0.03
Atotonilco de Tula	MZ-323	SD	2.02	ND
Tula de Allende	MZ-36	7.76	2.09	0.15
Tula de Allende	MZ-38	14.75	1.20	0.20
Tula de Allende	MZ-427	11.46	0.16	0.01
Tula de Allende	MZ-430	12.57	1.52	0.02
Tula de Allende	MZ-44	SD	0.78	ND
Tula de Allende	MZ-453	8.34	0.86	0.04
Tula de Allende	MZ-46	SD	1.33	ND
Tula de Allende	MZ-52	SD	1.04	ND
Tula de Allende	MZ-64	20.98	0.72	0.03
Tula de Allende	MZ-65	SD	1.52	ND
Tula de Allende	MZ-76	SD	2.65	0.05
Tula de Allende	MZ-80	8.70	1.76	0.10
Tula de Allende	MZ-82	SD	3.26	0.21

Id: Identificador; ND: no determinado; SD: sin datos de referencia.

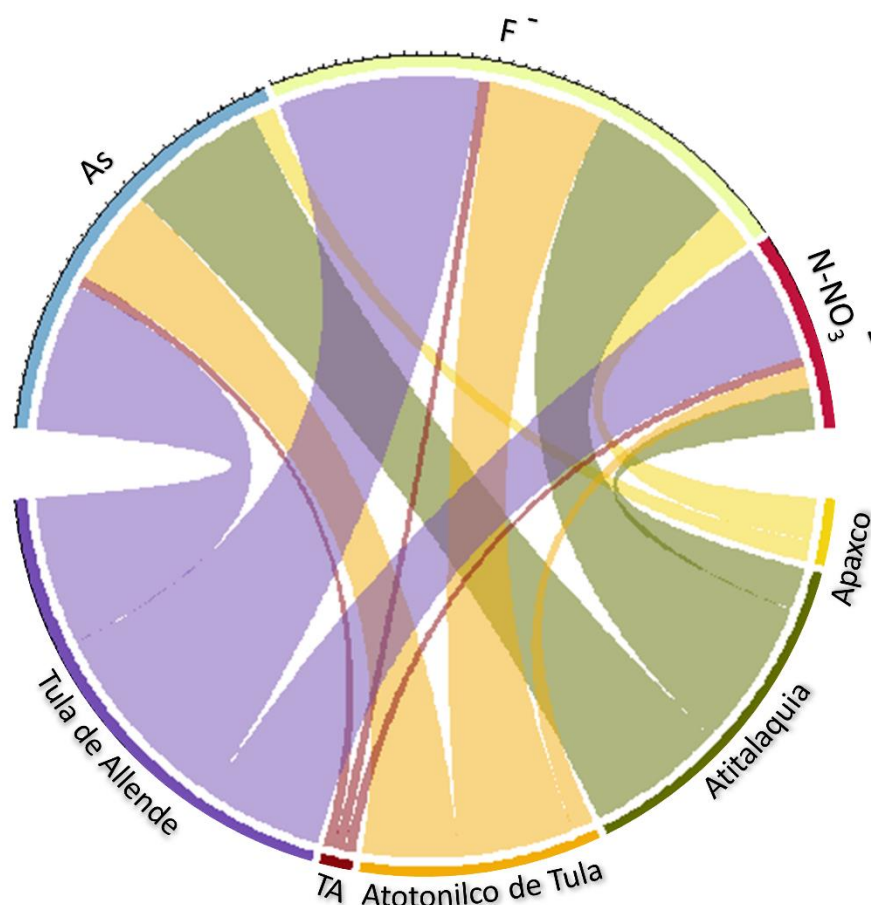
En la figura 5.9 se observa un gráfico de cuerdas que representa la relación de todos los puntos identificados a partir de los datos resultantes de las campañas de muestreo y aquellos surgidos de la bibliografía estudiada con los CC que cada uno presentan.



AP-04: Identificador del punto de muestreo
 "c": dato obtenido de las campañas de muestreo.
 "b": dato obtenido de fuentes bibliográficas.

Fig.5.9. Diagrama de cuerdas de CC determinados a partir de los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAH 318998 y los datos bibliográficos.

En la Fig.5.10 se representa por medio de un diagrama de cuerdas la relación de los CC por municipios del área de estudio.



TA: Tezontepec de Aldama

Figura 5.10. Diagrama de cuerdas de CC obtenidos durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998 y los datos bibliográficos, por municipios del área de estudio.

Concerniente a la distribución espacial de los CC en cada municipio, en este diagrama se observa que predominan los puntos de exposición al F^- . No existe contaminación por $N-NO_3^-$ en Apaxco, lo que se valida en la ausencia de una actividad agrícola intensa (Capítulo 2). Aunque no se pueden hacer comparaciones entre municipios, porque los resultados en la visualización dependen de la densidad de puntos y es diferente en cada uno de ellos, se puede apreciar que en Tula de Allende existe una gran distribución respecto a los tres CC y que en Atotonilco de Tula y Atitalaquia predominan el As y F^- en comparación con el $N-NO_3^-$.

5.4.1.2 Características de los Contaminantes Críticos

El origen de As como del F^- en el área de estudio está asociado a procesos geogénicos y flujos hidrotermales. Una mayor profundización de las características de los CC presentes en el acuífero se da en el capítulo 2 de esta investigación. A continuación, se hace un resumen del efecto de los CC identificados en función de los procesos biológicos y en función de la exposición sin ánimos de ser reiterativos.

- Clasificación de los CC en función de los procesos biológicos:

El As es un elemento extremadamente tóxico y un carcinógeno para el organismo humano del Grupo A (según la clasificación de la EPA) y del grupo 1 (según la clasificación IAC, 2013). Por lo que no hay dudas respecto a su efecto carcinógeno y no solo en concentraciones altas, donde la exposición causa efectos agudos que pueden llegar a ser letales, sino también tiene efectos negativos crónicos para la salud a través de la ingesta de agua por largos periodos a bajas concentraciones (capítulo 2).

Por su parte los F^- y el $N-NO_3^-$, según la información epidemiológica y toxicológica revisada (capítulo 2), se clasifican como elemento tóxico a la salud humana.

- Clasificación de los CC en función de la exposición:

Se consideró una exposición crónica en ambos escenarios al tratarse de agua de uso doméstico y recreativo.

5.4.2. Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición se realizó teniendo en cuenta dos escenarios. El Escenario I se definió como el residencial, donde se emplea agua tanto en viviendas como en centros de trabajo y escuelas para diversos fines domésticos. Este escenario abarca una amplia gama de actividades humanas que involucran el uso cotidiano del agua, lo que puede potencialmente aumentar la exposición a contaminantes presentes en ella.

Por otro lado, el Escenario II corresponde a los balnearios de agua termal. En estos lugares, la exposición al agua es específicamente recreativa y terapéutica, lo que plantea un conjunto único de consideraciones de riesgo. Ambos escenarios requieren un análisis detallado para

evaluar adecuadamente los riesgos para la salud pública y diseñar estrategias de gestión y mitigación efectivas.

5.4.2.1 Identificación de las rutas de exposición

- Medio ambiente de estudio

Para esta investigación el medio físico de interés es únicamente el agua subterránea. Esto no es indicativo de que no existan otras matrices ambientales con acumulación significativa de contaminantes tóxicos en el área de estudio, lo cual es altamente probable debido a sus características.

- Fuente de la contaminación

En el área de estudio existen tanto la contaminación geogénica como antropogénica. El N-NO_3^- se asocia tanto a la actividad agrícola como a la infiltración de aguas residuales. El F^- y el As se vincula a la interacción del sistema agua-roca y a la influencia de las aguas termales.

- Puntos de exposición

Los puntos de exposición a la contaminación son todas aquellas obras de captación de aguas subterráneas donde se identificó la existencia de al menos un CC. Manantiales como el del Cerro Colorado que, son utilizados para abastecer la población junto con pozos y norias, tienen un uso doméstico y estos son evaluados en el Escenario I. Los manantiales termales Agua de Vito y La Cantera que son empleados como piscinas u otros usos recreativos, son evaluados en el Escenario II.

En la figura 5.11, 5.12 y 5.13 se observa la distribución espacial de los puntos de exposición al N-NO_3^- , los F^- y el As respectivamente.

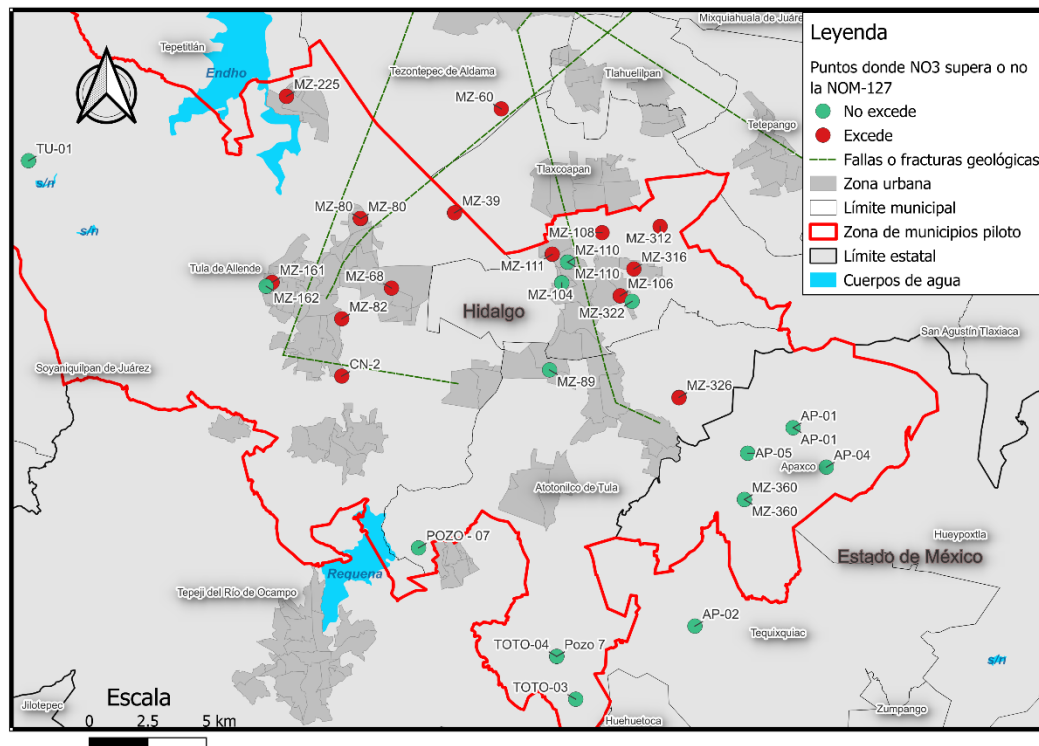


Figura 5.11. Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al NO_3^- identificados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.

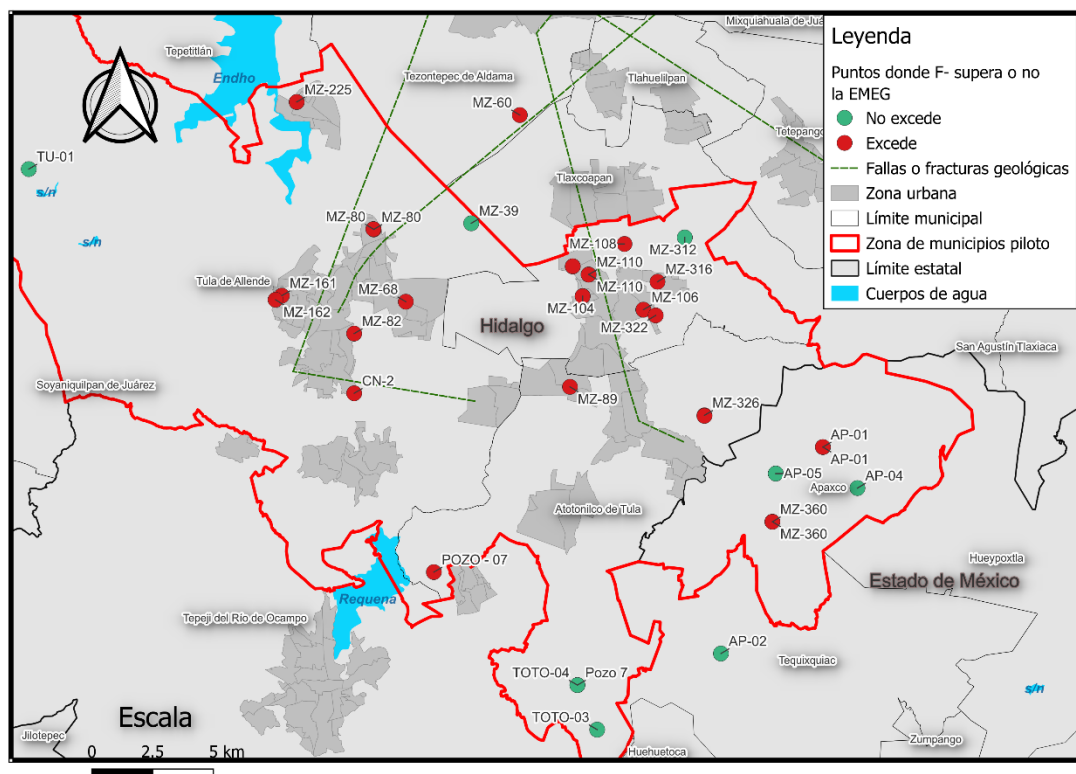
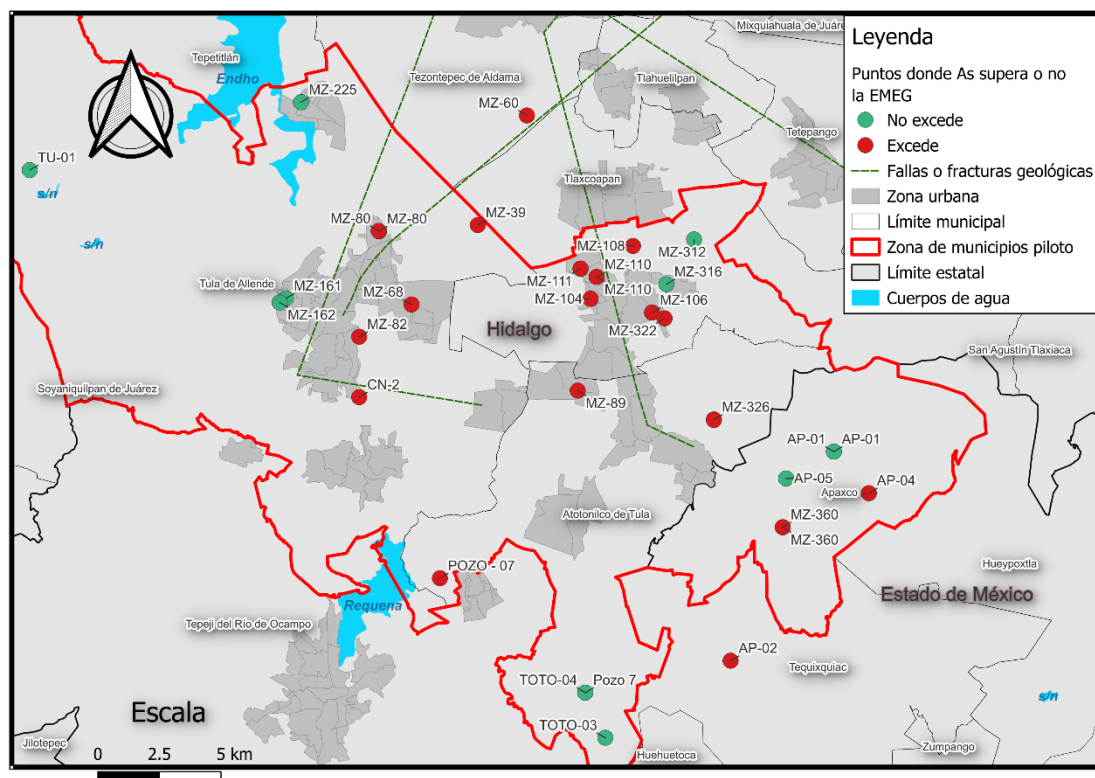


Figura 5.12. Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al F^- identificados durante las campañas de muestreo desarrolladas en el marco del PRONAI 318998.



En la figura 5.14, 5.15 y 5.16 se observan los mapas con la distribución espacial de los puntos de exposición al N-NO_3^- , los F^- y el As respectivamente para estos datos.

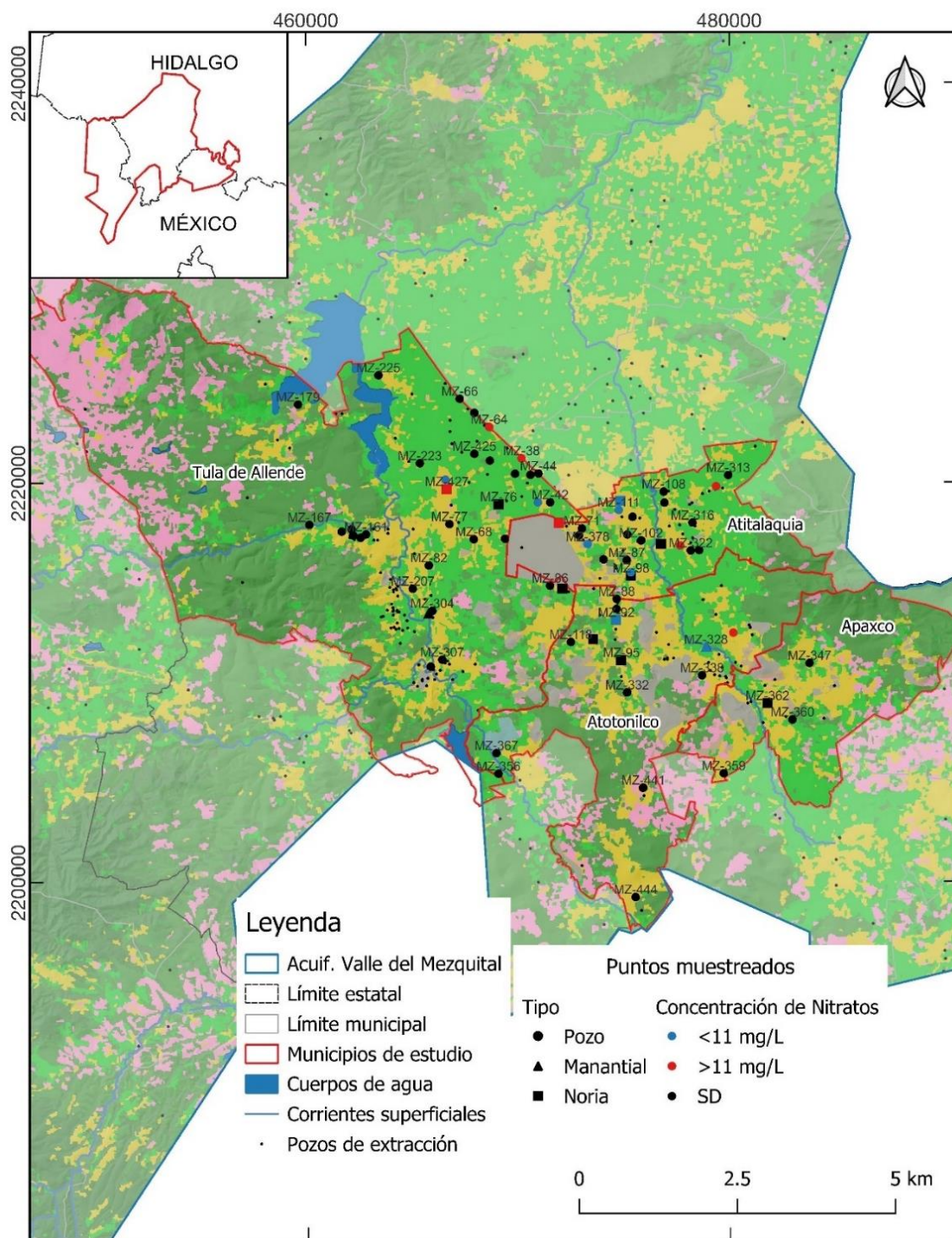


Figura 5.14. Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al N-NO_3^- identificados en la literatura.

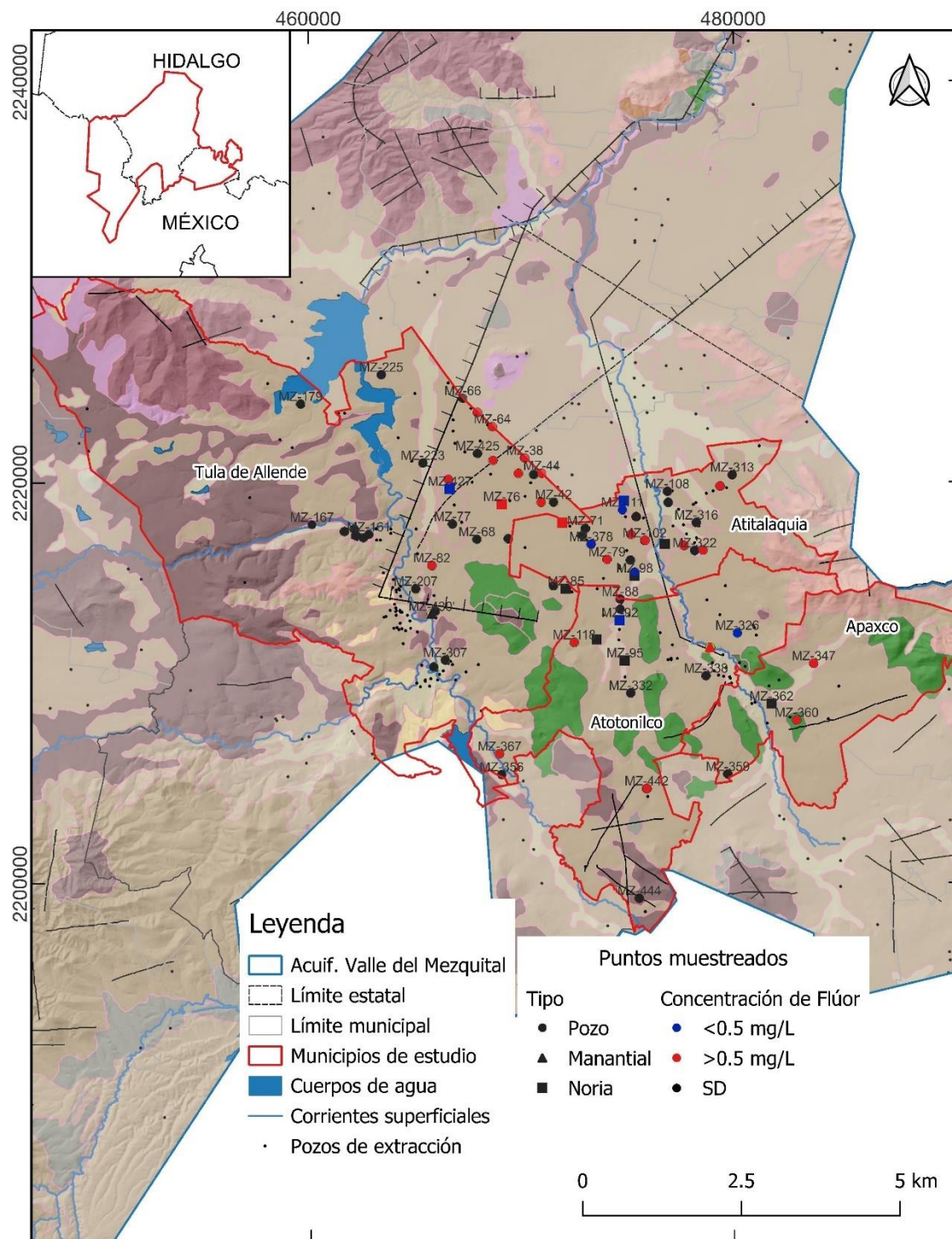


Figura 5.15. Mapa de distribución espacial de puntos de exposición a F^- identificados en la literatura.

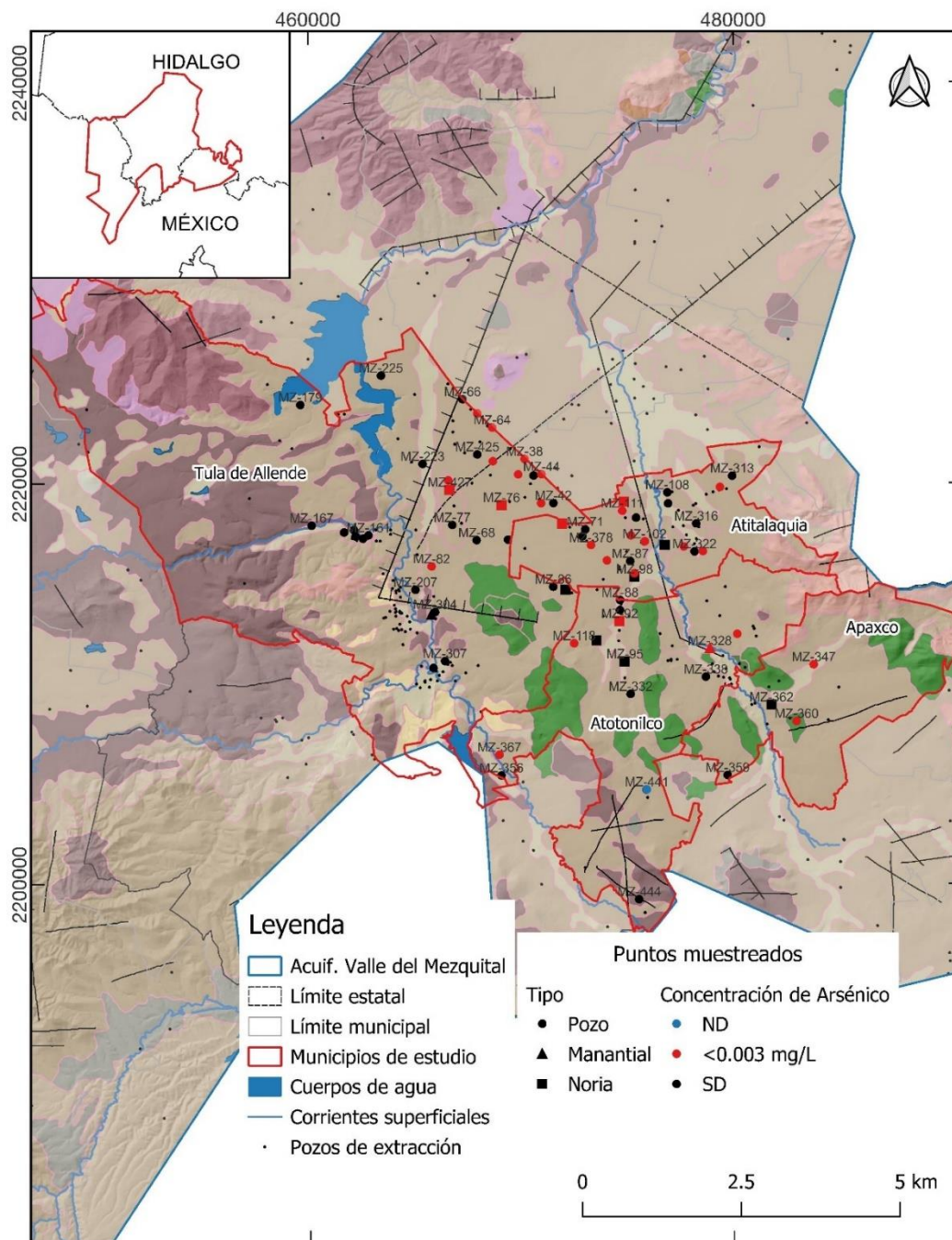


Figura 5.16. Mapa de distribución espacial de puntos de exposición al As identificados en la literatura.

- Vía de exposición

Las vías de exposición consideradas para el Escenario I son la ingestión directa del agua

contaminada (en lo adelante se hace referencia a esta como vía oral) y por contacto y reacción dérmico y ocular, es decir, la posibilidad de ser absorbidos por la piel o los ojos (en lo adelante se hace referencia a esta como vía dérmica). Para el Escenario II, considerando que se trata de balnearios recreativos únicamente se considera la vía dérmica como forma de exposición a los CC disueltos en el agua.

Aunque la evidencia científica es poca, si existe en la literatura casos documentados (Capítulo III) y se conoce la capacidad del As y el F⁻ para atravesar la membrana de la piel. Aunque la magnitud del riesgo dependerá fundamentalmente del tamaño de la dosis y del tiempo de contacto de la exposición.

Se conoce que para el medio físico en cuestión es posible que exista una ruta de exposición por inhalación secundaria. Ejemplos de lo que se plantea sería la inhalación de trihalometanos, cloro o compuestos orgánicos volátiles presentes en el agua durante duchas y baños prolongados o incluso mientras se limpia o se lavan los platos. Sin embargo, dada la baja volatilidad (Capítulo 3) y las características climatológicas en el área de estudio (Capítulo 2) del As, N-NO₃⁻ y los compuestos F⁻, se determinó que no existe en los escenarios de estudio las condiciones para que ocurra la volatilización de los CC.

- Población receptora

Respecto a la población potencialmente afectada, se realizó este estudio considerando a la población adulta que reside en las cercanías o se abastece de los puntos de exposición muestreados, en el área de estudio y para los niños menores de dos años.

5.4.2.2 Clasificación de las rutas de exposición

En el Escenario I, por medio de las encuestas aplicadas se supo que existe el hábito en la población de comprar agua de garrafón para beber y que el agua del grifo se emplee con fines domésticos. Aunque se conoce que la población no bebe el agua, por lo que no debe existir una vía de exposición oral, con fines de estimar el riesgo potencial si será considerada esta ruta. Dado que pudiesen existir familias de bajos ingresos económicos que estén optando por beberla, niños en las escuelas o en las propias casas que realicen esta actividad o la incertidumbre de la representatividad de la población muestreada, a diferencia de la casi nula probabilidad de riesgo por una ruta de inhalación secundaria, si existe un riesgo

potencial en esta vía de exposición.

Con base en este análisis, para el Escenario I se identificaron dos rutas de exposición a través de la cual la población puede estar en contacto con los CC: por vía oral y por la vía dérmica. En base a la evidencia recopilada se clasifican como Ruta Potencial y Ruta Completa, respectivamente. Para el Escenario II, se clasificó la vía dérmica como una Ruta Completa. La vía inhalatoria se consideró como una Ruta Descartable.

5.4.2.3 Cálculo de las Dosis de Exposición Estimadas por método determinístico

Los valores de DEE por el método determinístico fueron empleados en la caracterización cualitativa y cuantitativa del riesgo en cada escenario. El análisis de las DEE se realizó por escenarios.

- *Escenario I (residencial)*

A continuación, se ofrecen los resultados del cálculo de las DEE tanto para niños como para adultos a partir de las concentraciones máximas en mg/L de cada CC identificado, por las vías oral y dérmica, en las condiciones del Escenario I.

En la tabla 5.9 se ofrecen los valores de DEE para el $N-NO_3^-$ en la tabla 5.10. para F^- y en la tabla 5.11 para el As.

Tabla 5.9 Resumen de DEE para el $N-NO_3^-$ estimadas por el método determinístico en receptores infantiles y adultos, por las vías oral y dérmica, en el Escenario I.

ID	DEE Oral, Niño	DEE Dérmico, Niño	DEE Oral, Adulto	DEE Dérmico, Adulto
MZ-106	2.412	5.158E-03	6.891E-01	4.791E-03
MZ-108	1.092	2.335E-03	3.120E-01	2.169E-03
MZ-111	1.060	2.266E-03	3.027E-01	2.105E-03
MZ-316	1.553	3.320E-03	4.436E-01	3.084E-03
MZ-326	1.612	3.447E-03	4.605E-01	3.201E-03
MZ-60	2.129	4.553E-03	6.083E-01	4.229E-03
MZ-312	2.479	5.301E-03	7.083E-01	4.924E-03
CN-2	1.552	3.319E-03	4.434E-01	3.083E-03
MZ-161	1.218	2.604E-03	3.479E-01	2.419E-03
MZ-225	2.002	4.280E-03	5.719E-01	3.976E-03
MZ-39	2.111	4.515E-03	6.033E-01	4.194E-03
MZ-68	1.350	2.886E-03	3.856E-01	2.681E-03
MZ-80	1.226	2.623E-03	3.504E-01	2.436E-03
MZ-82	1.260	2.694E-03	3.599E-01	2.502E-03

ID: Identificador del punto de exposición.

Tabla 5.10 Resumen de DEE para el F⁻ en receptores infantiles y adultos, por las vías oral y dérmica, en el Escenario I.

ID	DEE Oral, Niño	DEE Dérmico, Niño	DEE Oral, Adulto	DEE Dérmico, Adulto
AP-01	5.318E-02	1.137E-04	1.519E-02	1.056E-04
MZ-360	6.117E-02	1.308E-04	1.748E-02	1.215E-04
MZ-104	1.521E-01	3.253E-04	4.346E-02	3.021E-04
MZ-106	9.283E-02	1.985E-04	2.652E-02	1.844E-04
MZ-108	7.300E-02	1.561E-04	2.086E-02	1.450E-04
MZ-110	1.194E-01	2.554E-04	3.413E-02	2.372E-04
MZ-111	1.135E-01	2.427E-04	3.243E-02	2.254E-04
MZ-316	6.900E-02	1.475E-04	1.971E-02	1.371E-04
MZ-322	8.600E-02	1.839E-04	2.457E-02	1.708E-04
MZ-326	9.010E-02	1.927E-04	2.574E-02	1.790E-04
MZ-89	8.035E-02	1.718E-04	2.296E-02	1.596E-04
Pozo 7	2.630E-01	5.623E-04	7.513E-02	5.223E-04
MZ-60	8.261E-02	1.766E-04	2.360E-02	1.641E-04
CN-2	1.365E-01	2.919E-04	3.900E-02	2.711E-04
MZ-161	6.240E-02	1.334E-04	1.783E-02	1.239E-04
MZ-162	5.100E-02	1.091E-04	1.457E-02	1.013E-04
MZ-225	7.118E-02	1.522E-04	2.034E-02	1.414E-04
MZ-68	1.811E-01	3.872E-04	5.173E-02	3.596E-04
MZ-80	1.040E-01	2.224E-04	2.971E-02	2.066E-04
MZ-82	1.528E-01	3.267E-04	4.364E-02	3.034E-04

ID: Identificador del punto de exposición.

Tabla 3.13. Resumen de DEE para el As en receptores infantiles y adultos, por las vías oral y dérmica, en el Escenario I.

ID	DEE Oral, Niño	DEE Dérmico, Niño	DEE Oral, Adulto	DEE Dérmico, Adulto
AP-02	6.100E-04	1.304E-06	1.743E-04	1.212E-06
AP-04	3.370E-03	7.206E-06	9.629E-04	6.694E-06
MZ-360	1.176E-02	2.515E-05	3.360E-03	2.336E-05
MZ-104	1.045E-02	2.235E-05	2.986E-03	2.076E-05
MZ-106	8.910E-03	1.905E-05	2.546E-03	1.770E-05
MZ-108	7.120E-03	1.523E-05	2.034E-03	1.414E-05
MZ-110	9.060E-03	1.937E-05	2.589E-03	1.800E-05
MZ-111	4.270E-03	9.131E-06	1.220E-03	8.481E-06
MZ-322	6.600E-03	1.411E-05	1.886E-03	1.311E-05
MZ-326	1.217E-02	2.602E-05	3.477E-03	2.417E-05
MZ-89	3.450E-03	7.377E-06	9.857E-04	6.853E-06
POZO - 07	6.576E-02	1.406E-04	1.879E-02	1.306E-04
MZ-60	2.010E-03	4.298E-06	5.743E-04	3.992E-06
CN-2	1.889E-02	4.039E-05	5.397E-03	3.752E-05
MZ-39	3.200E-03	6.843E-06	9.143E-04	6.356E-06
MZ-68	3.291E-02	7.037E-05	9.403E-03	6.537E-05
MZ-80	9.100E-03	1.946E-05	2.600E-03	1.808E-05
MZ-82	1.980E-02	4.230E-05	5.650E-03	3.930E-05

ID: Identificador del punto de exposición.

- *Escenario II (recreativo)*

En la tabla 5.12 se relacionan los resultados del cálculo de las DEE tanto para niños como para adultos a partir de las concentraciones máximas en mg/L de cada CC identificado, por la vía dérmica, en las condiciones del Escenario II.

Tabla 5.12 Resumen de DEE para F⁻ y As en receptores infantiles y adultos, por la vía dérmica, en el Escenario II.

CC	Identificador	DEE Dérmico, Niño	DEE Dérmico, Adulto
As	MZ-334	5.53E-07	5.67E-05
	LC	6.08E-07	6.23E-05
F	MZ-334	6.29E-06	6.44E-04
	LC	5.44E-06	5.58E-04

5.4.3 Caracterización del riesgo

A continuación, se analizan los resultados obtenidos de la evaluación cualitativa y cuantitativa del riesgo en ambos escenarios, a partir de las DEE por el método determinístico.

5.4.3.1 Evaluación del riesgo no cancerígeno

Se analizan los resultados por CC y vía de exposición para el riesgo no cancerígeno evaluado cualitativamente para el Escenario I y el Escenario II.

- *Estimación cualitativa del riesgo no cancerígeno Escenario I (residencial).*

En la Fig.5.17 se presenta, en un gráfico de columnas agrupadas, la comparación de las DEE para el NO₃⁻ obtenidas para niños y adultos por la vía oral con los umbrales establecidos (LOAEL, NOAEL, RfD). En la gráfica se observa que para receptores infantiles por vía oral las DEE superan los umbrales RfD y NOAEL en los puntos MZ-106 y MZ-312 de Atitalaquia, MZ-326 de Atotonilco de Tula, MZ-60 del municipio Tezontepec de Aldama, MZ-225 y MZ-39 de Tula de Allende para un 42.86%.

Un total de 5 puntos de exposición (MZ-106, MZ-60, MZ-312, MZ-225 y MZ-39) presentan DEE que superan el LOAEL lo que representa un 35.71%. Es importante señalar que, de no tomarse medidas, la tendencia en el área de estudio será al incremento en la concentración de este contaminante. Como resultado, se considera que puede existir un riesgo potencial para receptores infantiles en los siguientes puntos de exposición: MZ-106, MZ-326, MZ-60, MZ-312, MZ-225 y MZ-39.

En el caso de receptores adultos por vía oral, en la gráfica se observa que ninguna de las DEE superan los umbrales. Al tratarse de un umbral establecido considerando poblaciones infantiles y la susceptibilidad de las mismas, y ser las DEE a partir de las concentración

máxima en el área de estudio y resultar muy inferiores a los umbrales, se puede asegurar que no existe ningún riesgo por exposición al NO_3^- en la vía oral para receptores adultos.

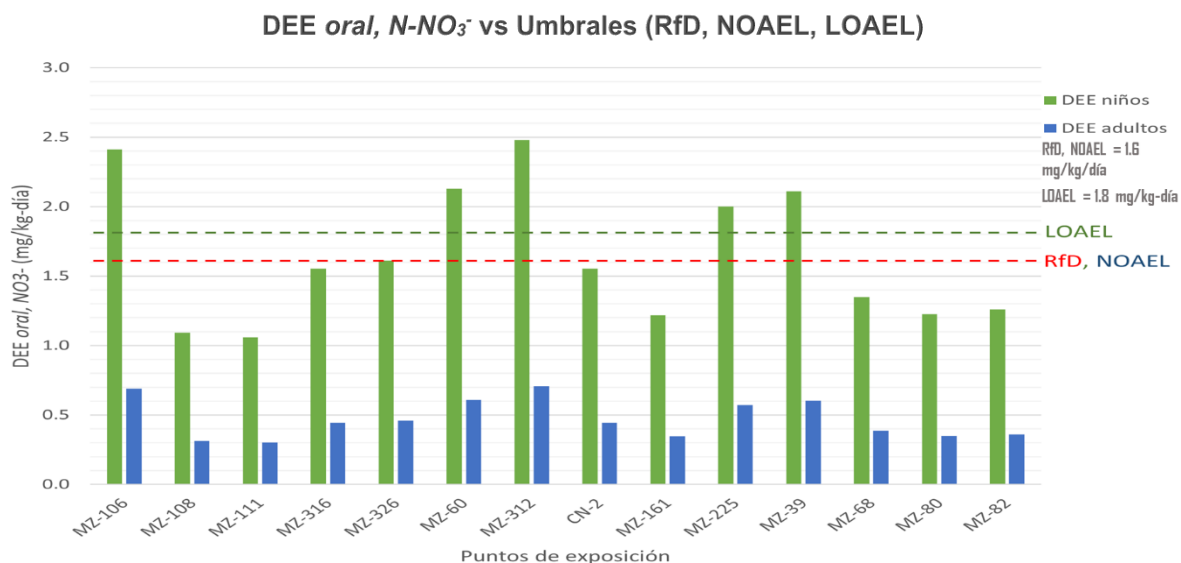


Figura 5.17. Gráfico de columnas agrupadas de las $\text{DEE}_{\text{niños, adultos}}$ para el N-NO_3^- por vía oral respecto a los umbrales de referencia (RfD, NOAEL y LOAEL) definidos para el efecto de metemoglobina infantil por exposición crónica a NO_3^- en el agua potable en el Escenario I.

La comparación de las DEE para el N-NO_3^- obtenidas para niños y adultos por la vía dérmica con el umbral del RfD se detalla en la Fig.5.18. Se aprecia que las DEE para adultos y niños están significativamente por debajo del umbral RfD. Se concluye que no existe el riesgo por esta vía para ninguno de los receptores considerados, ya que al calcularse las DEE con las concentraciones máximas de N-NO_3^- en un escenario conservador ante un umbral de seguridad igualmente conservador, que además considera las poblaciones sensibles, se obtienen DEE hasta mil veces menor tanto para receptores infantiles como adultos por la vía dérmica.

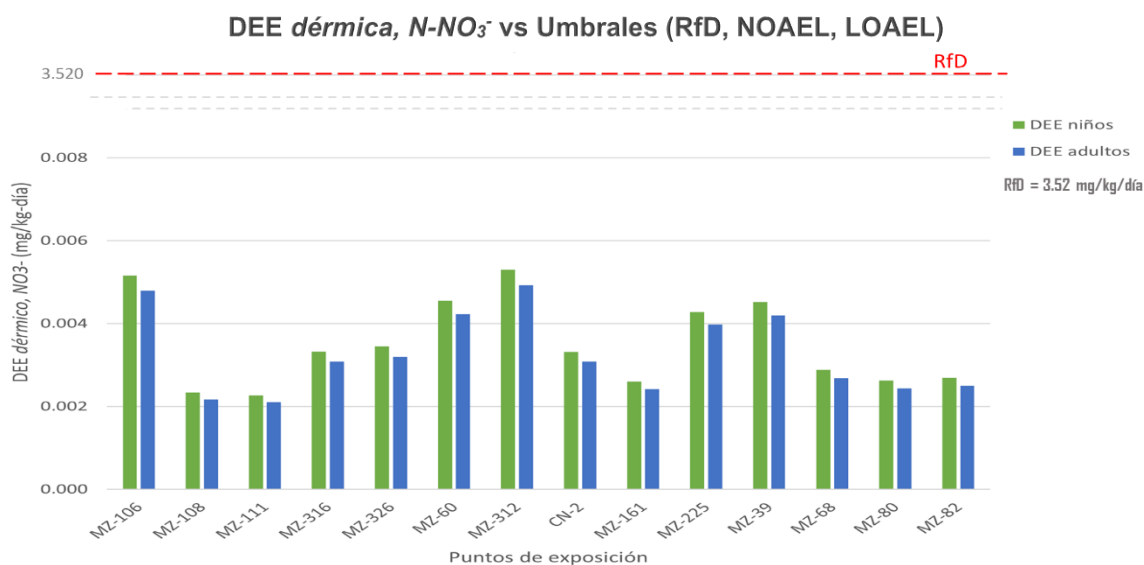


Figura 5.18. Gráfico de columnas agrupadas de las DEE_{niños, adultos} para el $N\text{-NO}_3^-$ por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica a NO_3^- en el agua potable por vía dérmica en el Escenario I.

En la Fig.5.19 compara las DEE para los F^- obtenidas para niños y adultos por la vía oral con los valores de LOAEL, NOAEL, RfD. El 100% de las DEE de receptores infantiles superan el umbral de seguridad del RfD. En el caso del el umbral del NOAEL, exceptuando el AP-01 y el MZ-162, en los restantes 18 puntos de exposición las DEE lo superan (90%). El 25 % (5 puntos de exposición) superan el LOAEL en MZ-104 (Atitalaquia), Pozo-07 (Atotonilco de Tula), CN-2, Mz-68 y el MZ-82 (Tula de Allende). Los pozos MZ-110 y MZ-111 se aproximan al umbral. Siendo umbrales derivados de estudios en niños con alta confiabilidad, existe la probabilidad de un riesgo potencial de presentar fluorosis dental con la exposición a F^- por la vía oral de receptores infantiles.

Las DEE en los puntos de exposición siguiente: MZ-111, Mz-110 y MZ-104 de Atitalaquia; CN-2, MZ-68 y MZ-82 de Tula de Allende y el Pozo-07 de Atotonilco de Tula superan el límite de 0.12mg/kg-día establecido como seguro para la fluorosis esquelética de adultos. Así, los niños están en riesgo potencial de desarrollar fluorosis esquelética. Ambos efectos (la fluorosis esquelética y la fluorosis dental) son enfermedades que adquieren una gran prevalencia a tempranas edades de la vida y con periodos de exposición prolongados.

En el caso de receptores adultos, las DEE sobrepasan el RfD en dos puntos de exposición (10%) el Pozo-07 (Atotonilco de Tula) y el MZ-68 (Tula de Allende). En el caso particular del Pozo-07 que también supera el NOAEL, como se ha venido diciendo cuenta con su propia planta de tratamiento de ósmosis inversa por lo que mientras dicha planta funcione correctamente no existe un riesgo real. Igualmente se descarta la probabilidad de ocurrencia de los efectos (fluorosis dental) asociados al umbral del RfD para el pozo MZ-68, porque solo es mayor al umbral en razón de 1.03 y se trata de un umbral determinado para la fluorosis dental en niños de edad escolar, por lo que se necesitaría una exposición mucho mayor para tener efectos en adultos (Armienta, 2010).

Las DEE tampoco superan el umbral de seguridad de la ATSDR y la EPA para la fluorosis esquelética, considerando el agua como la única fuente de ingestión de F^- . Se concluye que no existe un riesgo para receptores adultos para la vía oral en el área de estudio.

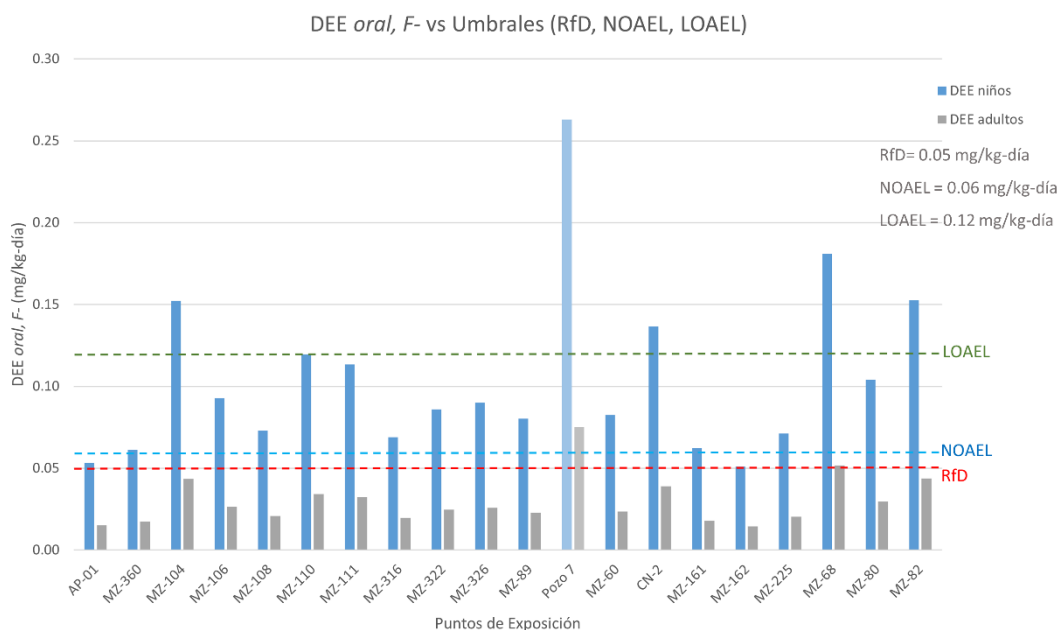


Figura 5.19 Gráfico de columnas agrupadas de las $DEE_{niños, adultos}$ para los F^- por vía oral respecto a los umbrales de referencia (RfD, NOAEL y LOAEL) definidos para el efecto de fluorosis dental en niños por exposición crónica a F^- en el agua potable en el Escenario I.

La comparación de las DEE para los F^- obtenidas para niños y adultos por la vía dérmica con el umbral RfD se expone en la Fig. 5.20. Cómo se puede observar las DEE para adultos y niños están muy por debajo del umbral de seguridad por lo que se concluye que no existe riesgo a la salud humana por vía dérmica por F^- . Porque igual que en el caso de la vía dérmica para el $N-NO_3^-$, al compararse las DEE con el RfD se obtienen DEE hasta mil veces menor tanto para receptores infantiles como adultos en esta vía.

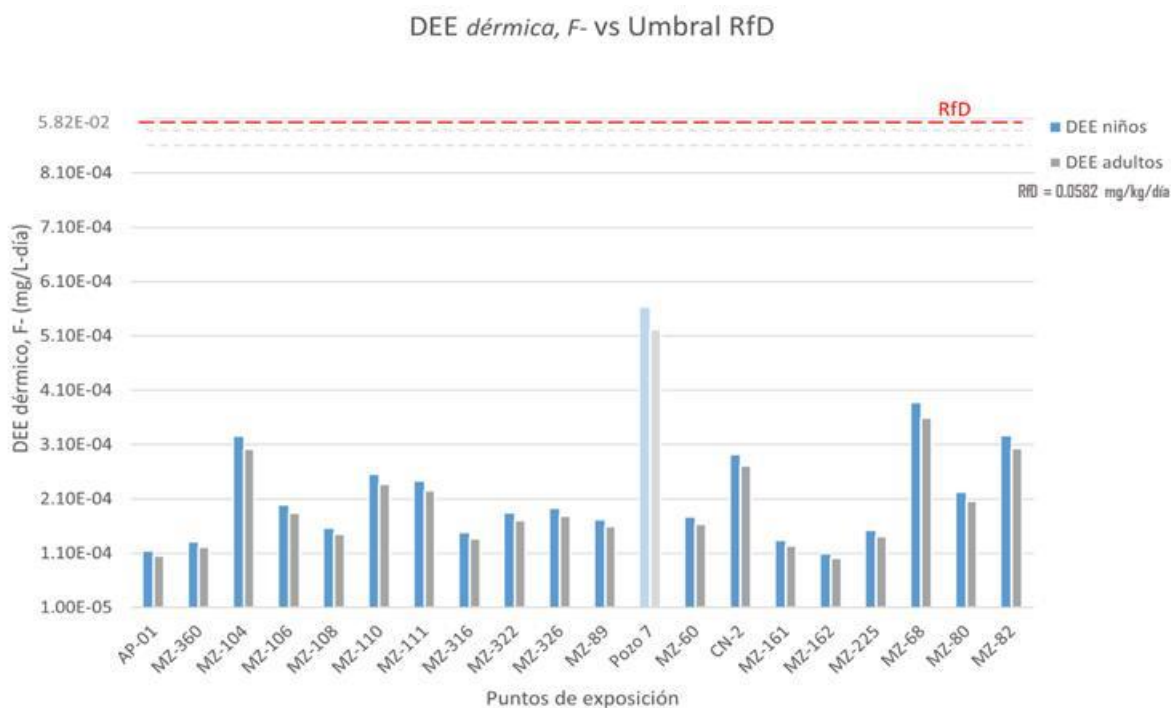


Figura 5.20. Gráfico de columnas agrupadas de las $DEE_{niños, adultos}$ para F^- por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica a los F^- en el agua potable por vía dérmica en el Escenario I.

En la Fig.5.21 se presenta la comparación de las DEE para As obtenidas para niños y adultos por la vía oral con los umbrales establecidos (LOAEL, NOAEL, RfD). Analizando los resultados para los receptores infantiles, se observa que en el 100% de los puntos de exposición, las DEE son mayores al umbral del RfD. En los puntos de exposición MZ-360 (Apaxco); MZ-104, MZ-110 (Atitalaquia); MZ-326, Pozo-07 (Atotonilco de Tula); CN-2,

MZ-68, MZ-80 y MZ-82 (Tula de Allende) las DEE calculadas superan 10 veces o más el umbral del NOAEL establecido para una exposición crónica al As.

Aumentando en criticidad, las muestras de CN-2, el MZ-68, MZ-82 y el Pozo-07 superan el LOAEL lo que representa un 22.22% y el AP-04 y el MZ-326 se aproximan a dicho umbral. Por ello, según este resultado, hay la probabilidad de que exista un riesgo potencial (en mayor o menor medida según las DEE) en todos los puntos de exposición muestreados en el área de estudio para la población infantil expuesta al As por la vía oral de presentar necrosis, queratosis y daños vasculares.

Respecto a la población adulta se tiene que exceptuando el pozo AP-02, las DEE restantes exceden el umbral del RfD lo que representa un 94.44%. Comparándolas con el NOAEL el 88.89% (16 puntos de exposición) supera este umbral (exceptuando el AP-02 y el MZ-60) y el MZ-68 y el Pozo-07 son hasta 10 veces mayor que el umbral. Sola la DEE en el Pozo-07 supera el LOAEL. Sin embargo, aunque el riesgo es mayor para los niños, se considera que existe un riesgo potencial probable para los receptores adultos expuestos al As por la vía oral en todos los puntos de exposición exceptuando el AP-02.

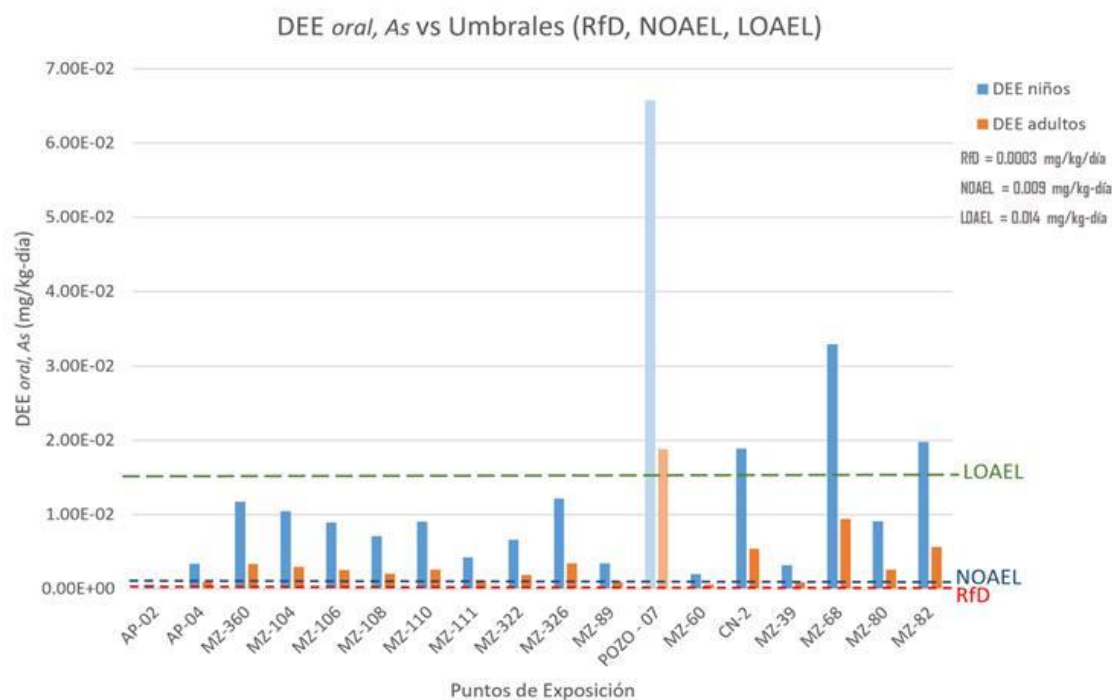


Figura 5.21 Gráfico de columnas agrupadas de las DEE_{niños, adultos} para el As por vía oral respecto a los umbrales de referencia (RfD, NOAEL y LOAEL) definidos para posibles efectos de necrosis celular; hiperpigmentación y posibles complicaciones vasculares por exposición crónica a As en el agua potable en el Escenario I.

En la Fig.5.22 se compara las DEE para el As obtenidas para niños y adultos por la vía dérmica con el umbral RfD. Se aprecia que, tanto para adultos como para niños, existe un solo punto que excede el RfD del As en la vía dérmica y corresponde al Pozo-07. Como se ha señalado anteriormente, este pozo cuenta con su propia planta de tratamiento y al tratarse de un umbral de seguridad tan conservador se concluye que no existe el riesgo por esta vía para ninguno de los receptores considerados.

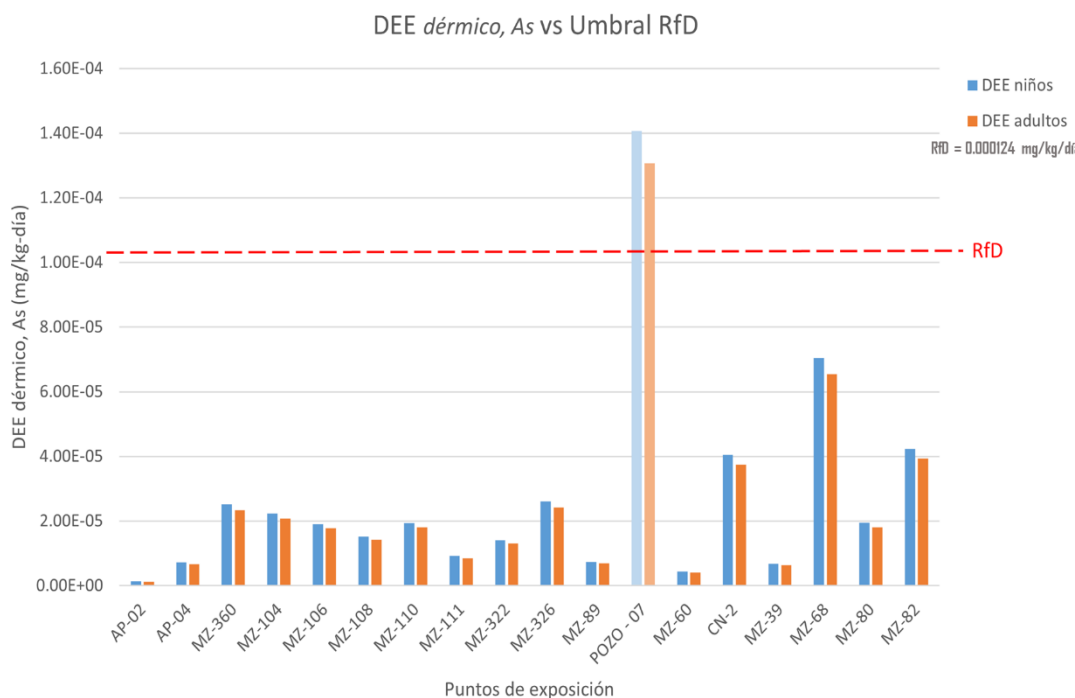


Figura 5.22 Gráfico de columnas agrupadas de las DEE_{niños, adultos} para el As por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al As en el agua potable por vía dérmica en el Escenario I.

- Estimación cualitativa del riesgo no cancerígeno Escenario II (recreativo).

La comparación de las DEE para los F⁻ obtenidas para niños y adultos por la vía dérmica con el valor de RfD se expone en Fig.5.23. Se aprecia que las DEE para adultos y niños están muy por debajo del umbral de seguridad por lo que se concluye que no existe riesgo a la salud humana por vía dérmica por F⁻ en los balnearios.

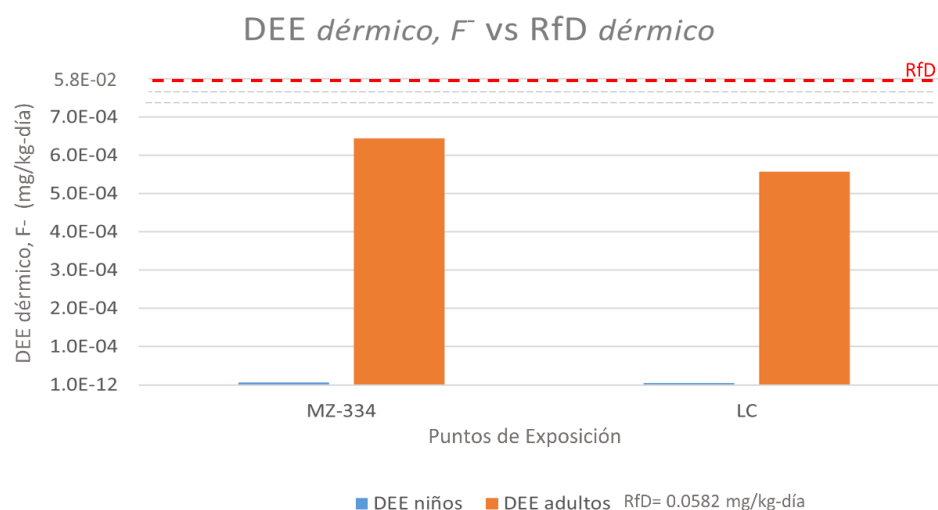


Figura 5.23 Gráfico de columnas agrupadas de las $DEE_{niños, adultos}$ para F^- por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al F^- en el agua potable por vía dérmica en el Escenario II.

En la Fig.5.24 se compara las DEE para el As obtenidas para niños y adultos por la vía dérmica con el umbral RfD. Al igual que con la exposición al F^- en los balnearios, la exposición dérmica al As no constituye ningún riesgo para receptores infantiles y adultos; especialmente para los niños quienes se encuentran significativamente muy por debajo del umbral de seguridad.

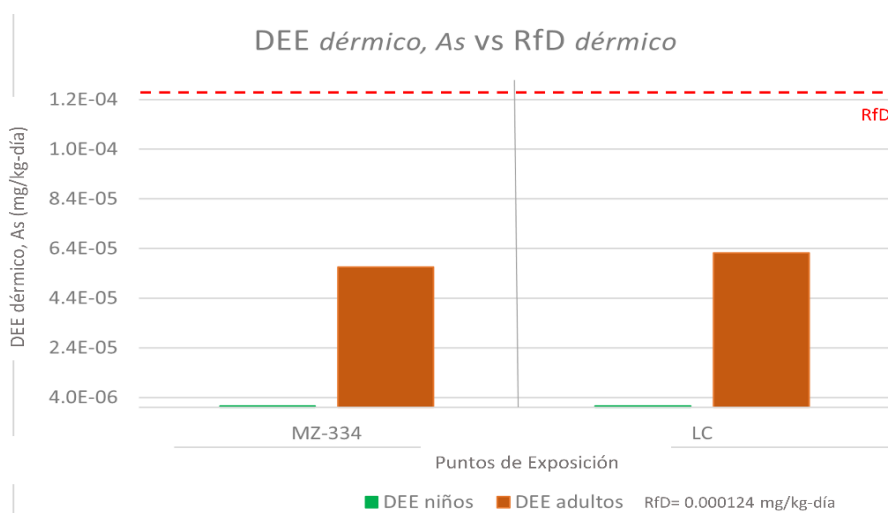


Figura 5.24. Gráfico de columnas agrupadas de las $DEE_{niños, adultos}$ para el As por vía dérmica respecto al umbral seguro de referencia (RfD) definido para exposición crónica al As en el agua potable por vía dérmica en el Escenario II.

- *Estimación cuantitativa (HQ) del riesgo no cancerígeno del Escenario I (residencial)*

A continuación, se presentan y analizan los resultados por CC y vía de exposición para el riesgo no cancerígeno evaluado cuantitativamente para el Escenario I y se calcularon los HQ individuales.

Los resultados obtenidos para el N-NO_3^- se resumen en la tabla 5.13. De la tabla se deriva la probabilidad de que exista un riesgo potencial para niños en los puntos de exposición MZ-106 y MZ-312 de Atitalaquia, MZ-326 de Atotonilco de Tula, MZ-60 del municipio Tezontepec de Aldama, MZ-225 y MZ-39 de Tula de Allende, lo que representa un 42.86% de las muestras. Estos puntos se corresponden por los identificados a partir del análisis cualitativo de las DEE.

Tabla 5.13. Resumen de los valores de HQ del N-NO_3^- calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos.

ID	HQ Oral, Niño	HQ Dérmico, Niño	HQ Oral, Adulto	HQ Dérmico, Adulto
MZ-106	1.508	0.001	0.431	1.36E-03
MZ-108	0.682	0.001	0.195	6.16E-04
MZ-111	0.662	0.001	0.189	5.98E-04
MZ-316	0.970	0.001	0.277	8.76E-04
MZ-326	1.007	0.001	0.288	9.10E-04
MZ-60	1.331	0.001	0.380	1.20E-03
MZ-312	1.549	0.002	0.443	1.40E-03
CN-2	0.970	0.001	0.277	8.76E-04
MZ-161	0.761	0.001	0.217	6.87E-04
MZ-225	1.251	0.001	0.357	1.13E-03
MZ-39	1.320	0.001	0.377	1.19E-03
MZ-68	0.844	0.001	0.241	7.62E-04
MZ-80	0.767	0.001	0.219	6.92E-04
MZ-82	0.787	0.001	0.225	7.11E-04

ID: Identificador del punto de exposición. Formato diferente donde $\text{HQ} > 1$.

Los resultados obtenidos para los F^- se resumen en la tabla 5.14. Con base en estos resultados se concluye que existe la probabilidad de un riesgo potencial de que los receptores infantiles presenten fluorosis dental por la exposición crónica por vía oral al F^- en todos los puntos de exposición identificados. Además, existe una probabilidad de riesgo

potencial por la vía oral para los receptores adultos en los puntos de exposición del Pozo-07 y MZ-68. Estos resultados coinciden con los determinados por el método cualitativo.

Tabla 5.14. Resumen de los valores de HQ para los F⁻ calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos en el Escenario I.

ID	HQ Oral, Niño	HQ Dérmico, Niño	HQ Oral, Adulto	HQ Dérmico, Adulto
AP-01	1.064	0.002	0.304	1.81E-03
MZ-360	1.223	0.002	0.350	2.09E-03
MZ-104	3.042	0.006	0.869	5.19E-03
MZ-106	1.857	0.003	0.530	3.17E-03
MZ-108	1.460	0.003	0.417	2.49E-03
MZ-110	2.389	0.004	0.683	4.08E-03
MZ-111	2.270	0.004	0.649	3.87E-03
MZ-316	1.380	0.003	0.394	2.35E-03
MZ-322	1.720	0.003	0.491	2.94E-03
MZ-326	1.802	0.003	0.515	3.07E-03
MZ-89	1.607	0.003	0.459	2.74E-03
POZO-07	5.259	0.010	1.503	8.97E-03
MZ-60	1.652	0.003	0.472	2.82E-03
CN-2	2.730	0.005	0.780	4.66E-03
MZ-161	1.248	0.002	0.357	2.13E-03
MZ-162	1.020	0.002	0.291	1.74E-03
MZ-225	1.424	0.003	0.407	2.43E-03
MZ-68	3.621	0.007	1.035	6.18E-03
MZ-80	2.080	0.004	0.594	3.55E-03
MZ-82	3.055	0.006	0.873	5.21E-03

ID: Identificador del punto de exposición. Formato diferente donde HQ>1.

Los resultados obtenidos para el As se resumen en la tabla 5.15. Observando la tabla se aprecia que existe la probabilidad de que se manifiesten efectos en la salud por exposición a As por vía oral, en todos los puntos de exposición estudiados en receptores infantiles. Respecto a los receptores adultos, salvo en el pozo AP- 02 del municipio de Apaxco, existe la probabilidad de riesgo potencial a la salud en el resto de los puntos de exposición del área de estudio por vía oral.

Igualmente, aparece una probabilidad de riesgo por la vía dérmica para niños y adultos en el Pozo-07 ubicado en el municipio de Atotonilco de Tula. De este punto de exposición se reitera que cuenta con su propia planta de tratamiento y no constituye un riesgo real. Estos resultados se corresponden con los obtenidos por el método cualitativo.

Tabla 5.15. Resumen de los valores de HQ para el As calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos del Escenario I.

ID	HQ Oral, Niño	HQ Dérmico, Niño	HQ Oral, Adulto	HQ Dérmico, Adulto
AP-02	2.033	0.01	0.581	0.01
AP-04	11.233	0.06	3.210	0.05
MZ-360	39.200	0.20	11.200	0.19
MZ-104	34.833	0.18	9.952	0.17
MZ-106	29.700	0.15	8.486	0.14
MZ-108	23.733	0.12	6.781	0.11
MZ-110	30.200	0.16	8.629	0.15
MZ-111	14.233	0.07	4.067	0.07
MZ-322	22.000	0.11	6.286	0.11
MZ-326	40.567	0.21	11.590	0.19
MZ-89	11.500	0.06	3.286	0.06
POZO - 07	219.200	1.13	62.629	1.05
MZ-60	6.700	0.03	1.914	0.03
CN-2	62.967	0.33	17.990	0.30
MZ-39	10.667	0.06	3.048	0.05
MZ-68	109.700	0.57	31.343	0.53
MZ-80	30.333	0.16	8.667	0.15
MZ-82	65.967	0.34	18.848	0.32

ID: Identificador del punto de exposición. Formato diferente donde HQ>1.

- Estimación cuantitativa (HQ) del riesgo no cancerígeno del Escenario II (recreativo)

Los resultados obtenidos para los HQ del F⁻ y el As en ambos balnearios de agua termal se resumen en la tabla 5.16. Se concluye, que no existe riesgo en este escenario para ninguno de los receptores estudiados. Estos resultados también coinciden con los obtenidos de la evaluación cualitativa para el escenario II.

Tabla 5.16. Resumen de los valores de HQ para los F⁻ y el As calculados en la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral y dérmica en niños y adultos del Escenario II.

Identificador	HQ Dérmico, F ⁻		HQ Dérmico, As	
	Niños	Adultos	Niños	Adultos
MZ-334	1.08E-04	1.11E-02	4.46E-03	4.57E-01
LC	9.36E-05	9.58E-03	4.90E-03	5.02E-01

5.4.3.2 Evaluación del riesgo cancerígeno

A continuación, se presentan y analizan los resultados de la estimación del riesgo cancerígeno evaluado cualitativa y cuantitativamente para el Escenario I por la vía oral.

- *Estimación cualitativa del riesgo cancerígeno.*

Se realizó un resumen de casos de estudio recientes encontrados en la literatura para determinar las concentraciones de As en agua a las que se asocia efectos cancerígenos en la población expuesta y relacionarlos con las concentraciones medidas en el área de estudio (tabla 5.17).

Tabla 5.17. Resumen de casos de estudio en la bibliografía científica sobre el efecto cancerígeno del As en la población expuesta por vía oral a través del agua potable y sus concentraciones respecto a las medidas en el área de estudio en el marco del PRONAI 318998.

ID	Rangos (µg/L)	Referencia	País	Tipo de cáncer estudiado	Resultado
AP-02	<10 (5.6%)	^a Bulka C.M. et al., 2016	EE. UU	Próstata	En 4 años se produjeron 45.595 casos entre casi 5 millones de hombres. Las exposiciones de As en agua potable de los casos de cáncer se dividieron en tres rangos: 1. 0,33-0,72 µg/L; 2. 0,73-1,60 µg/L y 3. 1,61-16,23 µg/L. La incidencia de casos fue significativamente más alta a concentraciones más elevadas
		^b Moore et al., 2002	EE. UU	Leucemia infantil por exposición durante el embarazo	concentraciones de As<0.01mg/L en el agua de pozos públicos. Concluyó que existe una relación estadística significativa entre la concentración de As y el aumento de los casos de leucemia infantil en el periodo de exposición del embarazo. Se determinó también tricloroetano; tetracloroetileno; cloroformo y otros compuestos orgánicos
		^a Mostafa MG et al., 2017	Bangladesh	cuello uterino	De las 3464 pacientes hospitalizadas con cáncer que participaron en el estudio, el 56% provenía de zonas donde la concentración de arsénico era de 10 a 100 µg /L.
MZ-60 MZ-39 AP-04 MZ-89 MZ-111	10 a 50 (27.78%)	^a D'Ippoliti D. et al., 2015	Italia	mortalidad por cáncer	Exposición promedio a través del agua potable: 19,3 µg/l. Encontraron aumentos significativos en la mortalidad por cánceres en general, así como asociaciones específicas con cáncer de hígado en hombres.
		^a Mostafa MG et al., 2017	Bangladesh	cuello uterino	El 44% de los casos registrados, mayor riesgo de tener lesiones en pacientes con diagnóstico histológico de carcinoma de células escamosas.

Tabla 5.17. Resumen de casos de estudio en la bibliografía científica sobre el efecto cancerígeno del As en la población expuesta por vía oral a través del agua potable y sus concentraciones respecto a las medidas en el área de estudio en el marco del PRONAH 318998 (CONTINUACIÓN)

		^a Fen Wu et al., 2018	riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares o cáncer	el estudio proporcionó evidencia de la utilidad de la plataforma metabolómica para investigar la relación entre la exposición al arsénico y las alteraciones en los metabolitos urinarios, así como su posible implicación en el desarrollo de enfermedades graves como enfermedades cardiovasculares y cáncer.
		^b Liaw et al., 2008	Hepático; leucemia; cerebral	el estudio se realizó de forma retrospectiva en dos períodos de exposición, edades de 0 a 19 años, de 1950 a 1957 a 90µg/L y en 1958-1970 a 87µg/L. se determinó en las primeras etapas de la infancia incremento de la mortalidad por cancer hepático.
MZ-322 MZ-108 MZ-106 MZ-110 MZ-80	50 a 99 (27.78%)			En el rango de 50 a 99 µg/L de un total de 44 personas expuestas se enfermaron 2, lo que da una tasa de prevalancia por cada 100 personas de 4.5. De 100 a 299µg/L se enfermaron 47 de 315 lo que da igualmente una prevalencia de 4.5 por cada 100 personas; de 300 a 399µg/L, 10 de 78 para una prevalencia de 11.7 y para exposiciones superiores a 400µg/L se obtuvo una prevalencia de la enfermedad de 12.8
		^c Fatmi et al., 2013	*Lesiones cutáneas (melanosis; queratosis)	
MZ-104 MZ-360 MZ-326 CN-2 MZ-82 MZ-68 Pozo-07	>100 (38.89%)	^a Tsuda et al., 1995	Hepático; de piel; de pulmón	Índice de riesgo en el grupo de mayor exposición (≥ 1 mg/L) en comparación con el grupo de menor exposición (0,001 mg/L) de 1,74 (IC95%: 1,10-2,74) para todas las muertes y de 4,82 (IC95%: 2,09-11,14) para todos los cánceres
		^a Mostafa MG et al., 2017	cuello uterino	El 44% de los casos registrados, mayor riesgo de tener lesiones en pacientes con diagnóstico histológico de carcinoma de células escamosas.

ID: Identificadores de los puntos de exposición,

^a Fuente: Moncada Milán, Silvia. Revisión sistemática sobre arsénico en las aguas, 2018. Editor: Universidad de Valladolid. Facultad de Medicina. Accesible en: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/31289>

^b Fuente: Oller-Arlandis V, Sanz-Valero J. Cáncer por contaminación química del agua de consumo humano en menores de 19 años: una revisión sistemática. Rev Panam Salud Publica. 2012;32(6):435–43. Accesible en: <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v32n6/a07v32n6.pdf>

^c Fuente: Karagas R., et al., 2015

* Melanosis y queratosis no son formas de cáncer. Son condiciones dermatológicas que involucran cambios en la pigmentación de la piel (melanosis) y el crecimiento anormal de la capa externa de la piel (queratosis). Sin embargo, la queratosis puede convertirse en cáncer de piel si no se trata adecuadamente, especialmente la queratosis actínica.

Se concluye que a las concentraciones de As medidas, por la vía oral, existe un riesgo individual de por vida de desarrollar cáncer en todos los puntos de exposición para todos los receptores. Es necesario evaluar si es un riesgo asumible.

- *Estimación cuantitativa del riesgo cancerígeno*

Se obtuvieron los valores de RIC en cada punto de exposición al As y cada receptor. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 5.18. Estos resultados indican que la probabilidad de por vida de presentar cáncer de piel es mayor siempre en niños que en adultos. Todos los valores de RIC oral para As son superiores al límite aceptable de riesgo de cáncer (1×10^{-6}) tanto en receptores infantiles como adultos por lo que, a priori, se podría producir un incremento en la incidencia de cáncer para las poblaciones estudiadas.

Tabla 5.18. Resultados del cálculo del RIC y el RIC normado cada 50 y cada 100 niños/adultos para cada punto de exposición en el caso del As.

Identificador	Niños			Adulto		
	RIC	RC/50	RC/100	RIC	RIC/50	RIC/100
AP-02	9.15E-03	0.46	0.92	2.61E-04	1.31E-02	2.61E-02
AP-04	5.06E-02	2.53	5.06	1.44E-03	7.22E-02	1.44E-01
MZ-360	1.76E-01	8.82	17.64	5.04E-03	2.52E-01	5.04E-01
MZ-104	1.57E-01	7.84	15.68	4.48E-03	2.24E-01	4.48E-01
MZ-106	1.34E-01	6.68	13.37	3.82E-03	1.91E-01	3.82E-01
MZ-108	1.07E-01	5.34	10.68	3.05E-03	1.53E-01	3.05E-01
MZ-110	1.36E-01	6.80	13.59	3.88E-03	1.94E-01	3.88E-01
MZ-111	6.41E-02	3.20	6.41	1.83E-03	9.15E-02	1.83E-01
MZ-322	9.90E-02	4.95	9.90	2.83E-03	1.41E-01	2.83E-01
MZ-326	1.83E-01	9.13	18.26	5.22E-03	2.61E-01	5.22E-01
MZ-89	5.18E-02	2.59	5.18	1.48E-03	7.39E-02	1.48E-01
Pozo - 07	9.86E-01	49.32	98.64	2.82E-02	1.41	2.82
MZ-60	3.02E-02	1.51	3.02	8.61E-04	4.31E-02	8.61E-02
CN-2	2.83E-01	14.17	28.34	8.10E-03	4.05E-01	8.10E-01
MZ-39	4.80E-02	2.40	4.80	1.37E-03	6.86E-02	1.37E-01
MZ-68	4.94E-01	24.68	49.37	1.41E-02	7.05E-01	1.41
MZ-80	1.37E-01	6.83	13.65	3.90E-03	1.95E-01	3.90E-01
MZ-82	2.97E-01	14.84	29.69	8.48E-03	4.24E-01	8.48E-01

En la Fig. 5.25 se representa en un gráfico de barras de doble eje la relación entre RIC y el el RIC cada 50 y el RIC cada 100 para receptores infantiles. En el gráfico se observa que, respecto a receptores infantiles, el RIC es significativamente mayor que lo aceptado; siendo mínimo en el pozo AP-02 de Apaxco donde existe una probabilidad de 0.9% de que un niño desarrolle cáncer de piel a lo largo de su vida, aunque es un riesgo bajo a moderado no es considerado aceptable según el umbral de riesgo admisible.

Mucho más alarmante es el riesgo estimado en el municipio de Tula de Allende. Los puntos de exposición identificados como CN-2, MZ-68 y MZ-82 presentan un RIC de 28.3%, 49.4% y 29.7% de probabilidad de que un niño presente estos efectos en la salud a lo largo de su vida. Estos representan los riesgos más altos de toda el área de estudio excluyendo al Pozo-07. Estos riesgos equivalen a 14.17, 24.68 y 14.84 casos de cáncer esperado por cada 50 personas y 28.34, 49.37 y 29.69 por cada 100 personas respectivamente.

Riesgo de Incidencia de Cáncer de por vida (RIC) en niños vs valores normalizados cada 50 y 100 niños

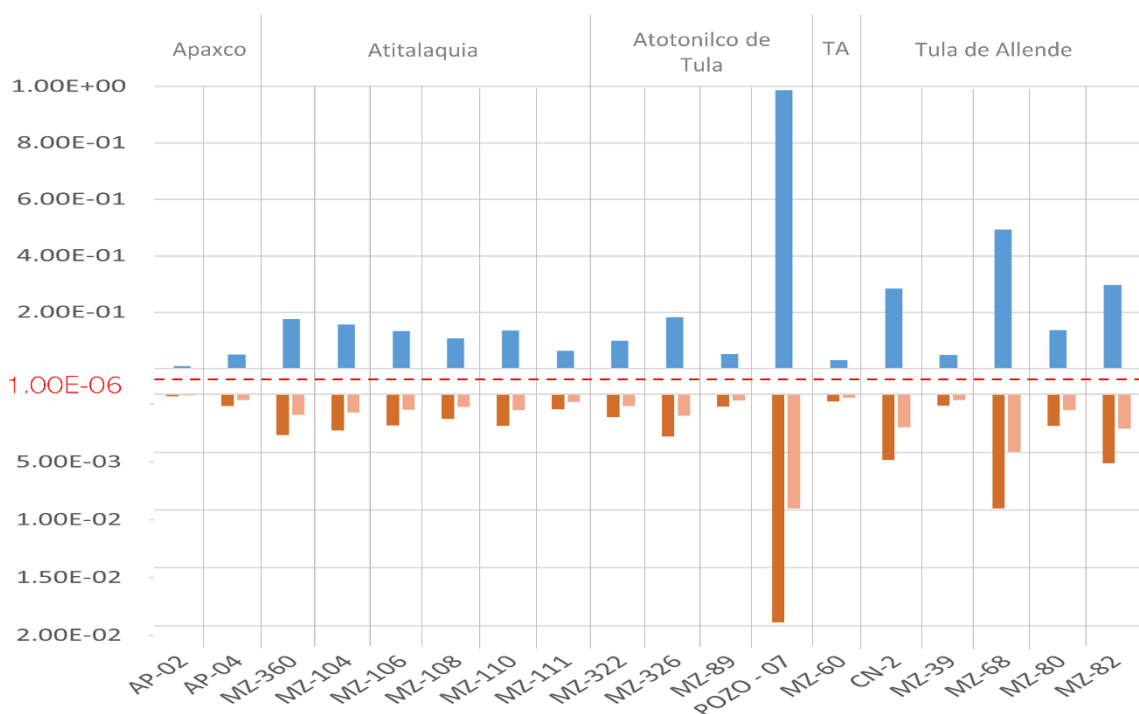


Figura 5.25. Gráfico de columnas con eje doble del RIC, RIC/50 y RIC/100 para receptores infantiles en cada punto de exposición respecto al umbral de RIC admisible de 1 en 1 000 000 por exposición a As en la vía oral para el Escenario I.

En la Fig. 5.26 se representa en un gráfico de barras de doble eje la relación entre el RIC, el RIC cada 50 y el RIC cada 100 para los receptores adultos. En el caso de adultos, igual que para los receptores infantiles, en todos los puntos de exposición se alcanzan riesgos considerados inaceptables. Analizando los resultados para el punto de menor exposición al As en el área de estudio, el AP-02 se de 0.02% de probabilidad de que un adulto presente cáncer en la piel a lo largo de su vida bajo la exposición asumida en este escenario. Otra forma de leer el RIC sería 2.61 de cada 10 000 personas, sin embargo, la US.EPA establece

un umbral de 1 cada 10 000 personas (para este umbral de riesgo estiman una concentración de As en agua de 2 µg/L y la del área de estudio es aproximadamente 6 µg/L).

En el caso de los riesgos mayores (excluyendo el Pozo-07 de Atotonilco de Tula), localizados en el municipio de Tula de Allende se tienen RIC de 0.81%, 1.41% y 0.85% para los tres puntos de muestreo CN-2, MZ-68 y MZ-82, respectivamente. Estos valores equivalen a: 0.41, 0.71 y 0.42 casos de cáncer esperado cada 50 adultos respectivamente y 0.81, 1.41 y 0.85 casos cada 100 personas respectivamente.

Se podría concluir que el riesgo potencial de padecer un tipo de cáncer a lo largo de la vida a través de la ingesta de As en el agua subterránea para los puntos de exposición analizados es probable para los grupos de población considerados.

Al observar los valores normalizados de RIC/50 y RIC/100, se pueden identificar puntos de exposición donde el riesgo individual de cáncer aún es significativo incluso después de normalizar por una población más grande.

Riesgo de Incidencia de Cáncer de por vida (RIC) en adulto vs valores normalizados cada 50 y 100 adultos

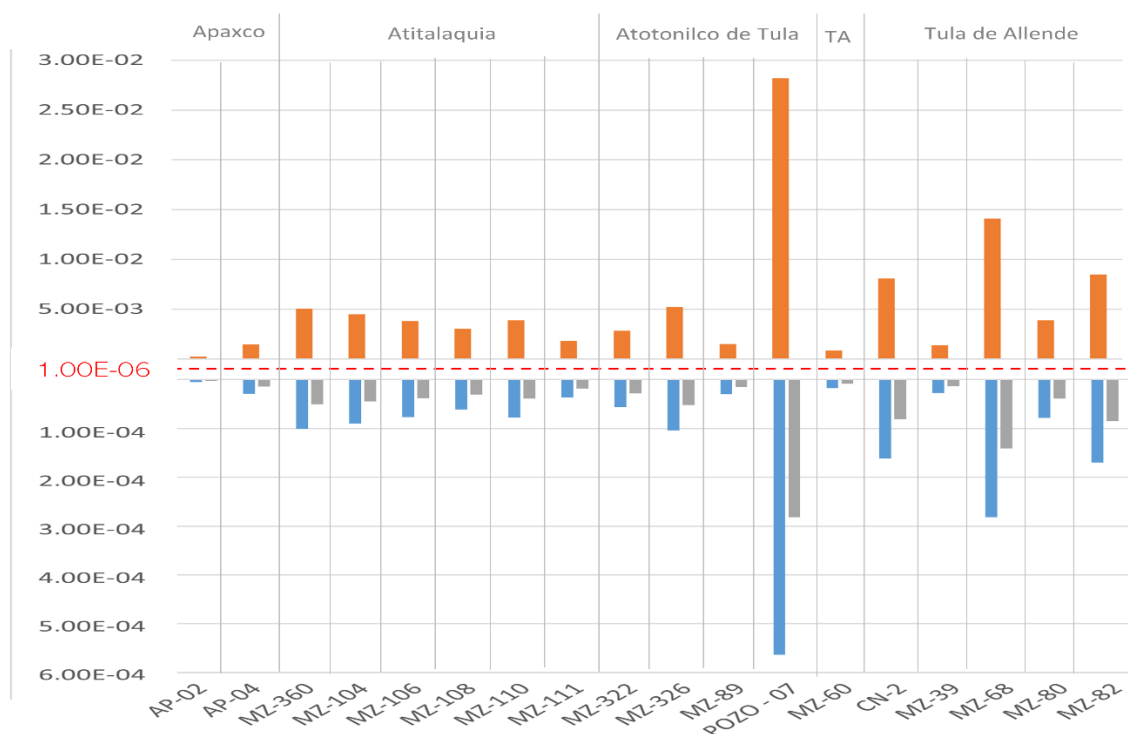


Figura 5.26 Gráfico de columnas con eje doble del RIC, RIC/50 y RIC/100 para receptores adultos en cada punto de exposición respecto al umbral de RIC admisible de 1 en 1 000 000 por exposición a As en la vía oral para el Escenario I.

5.4.3.3 Método Probabilístico. Análisis de Monte Carlo

- *Estimación cualitativa del riesgo no cancerígeno*

En la tabla 5.19 se relaciona para receptores por punto de exposición los parámetros estadísticos descriptivos de la distribución obtenida en la simulación de Monte Carlo y los % de la distribución que exceden los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL) para el N-NO₃⁻. Hay que señalar que para estas distribuciones tanto los valores mínimos como los máximos corresponden a valores extremos poco representativos de la población. Estos parámetros no son buenos descriptores de la población en ninguno de los casos.

Tabla 5.19. Resumen de las distribuciones de DEE por punto de exposición para niños y adultos obtenidas con el análisis de Monte Carlo para el N-NO₃⁻ y % de excedencia a los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL).

ID	R	MIN	Q1	MED	PROM	Q3	MÁX	σ	%>RfD, NOAEL	%> LOAEL
MZ-106	Niño	0.174	1.221	1.941	2.497	3.146	31.425	1.985	59.36	52.7
	Adulto	0.058	0.371	0.580	0.705	0.901	6.463	0.486	4.52	3.34
MZ-108	Niño	0.081	0.551	0.899	1.147	1.454	13.608	0.903	19.47	15.4
	Adulto	0.026	0.172	0.272	0.329	0.423	2.157	0.226	0.13	0.06
MZ-111	Niño	0.048	0.539	0.859	1.117	1.389	13.266	0.894	18.38	14.81
	Adulto	0.026	0.165	0.259	0.317	0.403	2.450	0.220	0.14	0.08
MZ-316	Niño	0.116	0.793	1.267	1.641	2.042	18.414	1.311	35.8	29.83
	Adulto	0.037	0.244	0.383	0.467	0.593	3.671	0.325	0.9	0.54
MZ-326	Niño	0.090	0.816	1.320	1.686	2.108	16.557	1.312	37.28	31.57
	Adulto	0.029	0.254	0.395	0.485	0.618	4.829	0.343	1.2	0.72
MZ-60	Niño	0.136	1.087	1.743	2.242	2.821	24.240	1.774	52.96	46.41
	Adulto	0.051	0.332	0.516	0.635	0.804	6.379	0.453	3.61	2.35
MZ-312	Niño	0.155	1.270	2.021	2.607	3.272	21.260	2.040	61.86	55.22
	Adulto	0.037	0.388	0.607	0.736	0.943	7.151	0.498	5.6	3.69
CN-2	Niño	0.085	0.787	1.270	1.635	2.087	15.715	1.285	35.96	30.21
	Adulto	0.030	0.243	0.376	0.461	0.585	4.012	0.319	0.87	0.5
MZ-161	Niño	0.093	0.608	0.992	1.280	1.621	11.706	1.011	24.23	19.34
	Adulto	0.022	0.191	0.302	0.366	0.465	2.880	0.255	0.28	0.18
MZ-225	Niño	0.095	1.012	1.610	2.082	2.626	18.185	1.627	48.83	42.32
	Adulto	0.031	0.311	0.488	0.595	0.761	3.901	0.412	2.63	1.8
MZ-39	Niño	0.121	1.085	1.734	2.213	2.766	18.225	1.709	52.67	46.58
	Adulto	0.027	0.324	0.520	0.633	0.806	5.981	0.450	3.47	2.14
MZ-68	Niño	0.103	0.678	1.101	1.415	1.795	12.695	1.105	28.82	23.59
	Adulto	0.029	0.209	0.328	0.400	0.505	3.021	0.281	0.51	0.36
MZ-80	Niño	0.085	0.613	0.979	1.274	1.598	16.778	1.018	23.63	18.9
	Adulto	0.027	0.190	0.299	0.366	0.464	4.392	0.263	0.43	0.22
MZ-82	Niño	0.066	0.645	1.032	1.334	1.661	17.479	1.074	25.27	20.47
	Adulto	0.024	0.196	0.307	0.378	0.483	4.076	0.267	0.37	0.26

ID: Identificador; R: Receptores; MIN: valor mínimo de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; Q1: valor del primer cuantil de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; MED.: valor de la mediana de la distribución para la DEE obtenida en el punto de exposición; PROM.: valor del promedio de la distribución de la DEE obtenida en el punto de exposición; Q3: valor del tercer cuantil de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; MÁX.: valor máximo de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; σ: valor de la desviación estándar de la distribución en el punto de exposición. Todos los valores de DEE están dados en mg/kg-día.

Aunque a partir del análisis determinístico del riesgo ya se había llegado a la conclusión de que no existe el riesgo para este CC en receptores adultos, en la tabla resumen de los valores de Monte Carlo para este CC nuevamente se comprueba este resultado. También se aprecia a partir de la desviación estándar que existe, en general, para cada punto de exposición, una alta variabilidad o dispersión en los datos respecto a su valor medio.

En la Fig. 5.27 se puede apreciar la distribución y la representación del umbral RfD para receptores infantiles. En el diagrama se puede apreciar que en los puntos de exposición MZ-312, MZ-106, MZ-60 y MZ-39, las distribuciones de probabilidad de las DEE exceden en más de la mitad el umbral del RfD. En los puntos MZ-225, MZ-326 y CN-2 se puede interpretar que un % representativo de las DEE en la distribución exceden dicho umbral. Es también, en estos puntos de exposición, donde se exceden en un mayor % el LOAEL. Ambos métodos, determinístico y probabilístico señalaron estos puntos como los de mayor probabilidad de existencia de un riesgo potencial a la salud de niños menores de dos años.

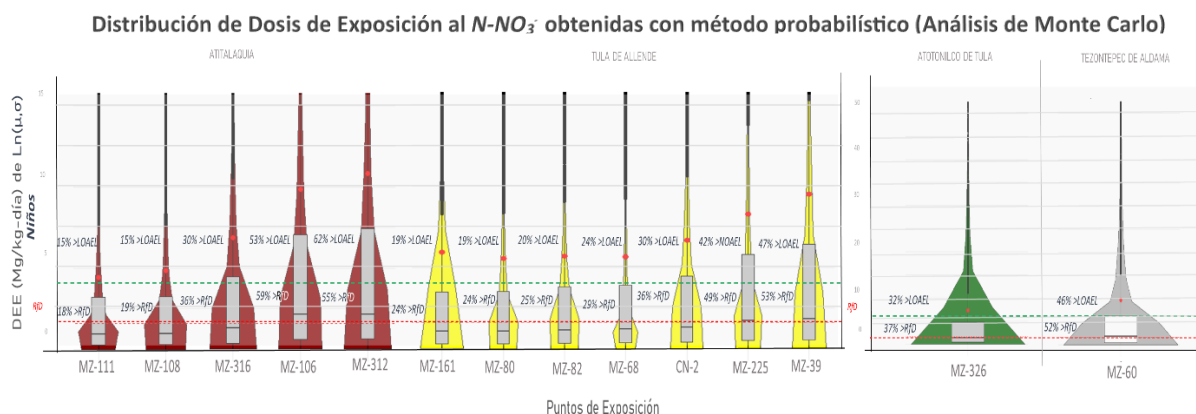


Figura 5.27 Diagrama de violines de las DEE niños, $N-NO_3^-$ por la vía oral en el Escenario I respecto al RfD.

En la tabla 5.20 se relaciona para receptores por punto de exposición los parámetros estadísticos descriptivos de la distribución obtenida en la simulación de Monte Carlo y los % de la distribución que exceden los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL) para los F⁻. En la tabla se comprueba que en todos los casos las DEE de los niños son mayores a la de los

adultos para un mismo punto de exposición. Para el caso de los adultos nuevamente es en el Pozo-07 donde se obtienen las mayores DEE y superan en un mayor % los umbrales de seguridad, por lo que es imprescindible el correcto funcionamiento de su planta de tratamiento.

Tabla 5.20. Resumen de las distribuciones de DEE por punto de exposición para niños y adultos obtenidas con el análisis de Monte Carlo para los F⁻ y % de excedencia a los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL).

ID	R	MIN	Q1	MED	PROM	Q3	MÁX	σ	%> RfD	%> NOAEL	%> LOAEL
AP-01	Niño	3.70E-03	2.70E-02	0.04	0.06	0.07	0.69	0.04	41.9	28.7	6.7
	Ad	7.84E-04	8.28E-03	0.01	0.02	0.02	0.13	0.01	1.7	0.5	0.01
MZ-360	Niño	5.48E-03	3.08E-02	0.05	0.06	0.08	0.73	0.05	44.4	35.8	10.2
	Ad	1.19E-03	9.48E-03	0.02	0.02	0.02	0.15	0.01	2.0	1.0	0.01
MZ-104	Niño	8.82E-03	7.73E-02	0.13	0.16	0.20	1.77	0.13	88.1	82.6	50.0
	Ad	3.93E-03	2.41E-02	0.04	0.05	0.06	0.36	0.03	27.9	20.1	2.8
MZ-106	Niño	6.64E-03	4.66E-02	0.08	0.10	0.12	0.91	0.07	66.8	58.6	24.0
	Ad	2.29E-03	1.45E-02	0.02	0.03	0.04	0.26	0.02	8.3	4.9	0.3
MZ-108	Niño	5.25E-03	3.63E-02	0.06	0.08	0.09	0.91	0.06	53.3	43.6	14.5
	Ad	9.35E-04	1.14E-02	0.02	0.02	0.03	0.19	0.02	3.9	1.9	0.1
MZ-110	Niño	1.06E-02	6.05E-02	0.10	0.13	0.16	1.19	0.10	79.3	71.4	36.2
	Ad	2.77E-03	1.87E-02	0.03	0.04	0.05	0.39	0.03	16.8	11.3	1.1
MZ-111	Niño	7.89E-03	5.83E-02	0.09	0.12	0.15	1.07	0.10	77.6	70.0	34.0
	Ad	2.61E-03	1.79E-02	0.03	0.03	0.04	0.41	0.02	15.2	9.9	0.8
MZ-316	Niño	5.14E-03	3.54E-02	0.06	0.07	0.09	0.78	0.06	51.6	42.1	13.2
	Ad	1.32E-03	1.08E-02	0.02	0.02	0.03	0.18	0.01	3.4	1.8	0.1
MZ-322	Niño	6.44E-03	4.39E-02	0.07	0.09	0.11	0.74	0.07	63.9	54.0	21.2
	Ad	1.89E-03	1.34E-02	0.02	0.03	0.03	0.25	0.02	6.5	3.6	0.2
MZ-326	Niño	6.88E-03	4.54E-02	0.07	0.10	0.12	0.91	0.08	65.9	56.6	23.3
	Ad	2.03E-03	1.41E-02	0.02	0.03	0.03	0.19	0.02	7.8	4.6	0.3
MZ-89	Niño	3.80E-03	4.10E-02	0.07	0.08	0.11	0.77	0.06	60.3	50.6	18.4
	Ad	1.25E-03	1.28E-02	0.02	0.02	0.03	0.26	0.02	5.4	3.2	0.2
Pozo 7	Niño	1.96E-02	1.31E-01	0.21	0.27	0.34	2.52	0.22	97.5	95.8	77.2
	Ad	5.26E-03	4.12E-02	0.06	0.08	0.10	0.60	0.05	59.1	48.5	14.6
MZ-60	Niño	4.30E-03	4.19E-02	0.07	0.09	0.11	0.76	0.07	61.3	52.0	19.1
	Ad	1.73E-03	1.29E-02	0.02	0.02	0.03	0.20	0.02	5.7	3.0	0.1
CN-2	Niño	1.12E-02	6.81E-02	0.11	0.14	0.18	1.49	0.11	84.1	77.3	42.9
	Ad	3.28E-03	2.09E-02	0.03	0.04	0.05	0.31	0.03	22.1	14.8	1.7
MZ-161	Niño	3.37E-03	3.15E-02	0.05	0.06	0.08	0.63	0.05	45.3	35.6	10.2
	Ad	1.11E-03	9.71E-03	0.02	0.02	0.02	0.17	0.01	2.0	1.0	0.04
MZ-162	Niño	2.81E-03	2.60E-02	0.04	0.05	0.07	0.58	0.04	35.4	26.8	5.9
	Ad	1.14E-03	8.01E-03	0.01	0.02	0.02	0.15	0.01	0.9	0.4	0.01
MZ-225	Niño	3.23E-03	3.60E-02	0.06	0.07	0.09	0.72	0.06	52.6	43.0	14.2
	Ad	1.38E-03	1.11E-02	0.02	0.02	0.03	0.21	0.01	3.3	1.6	0.1
MZ-68	Niño	1.16E-02	9.17E-02	0.15	0.19	0.24	2.51	0.15	91.9	87.5	59.0
	Ad	3.47E-03	2.82E-02	0.04	0.05	0.07	0.38	0.04	36.4	27.4	4.9
MZ-80	Niño	6.51E-03	5.23E-02	0.08	0.11	0.13	1.42	0.09	72.7	64.0	27.9
	Ad	2.87E-03	1.62E-02	0.03	0.03	0.04	0.29	0.02	10.9	6.7	0.6
MZ-82	Niño	1.32E-02	7.64E-02	0.12	0.16	0.20	1.69	0.13	87.6	81.7	49.9
	Ad	3.86E-03	2.40E-02	0.04	0.05	0.06	0.46	0.03	27.9	19.7	2.8

ID: Identificador; R: Receptores; Ad: Adulto; MIN: valor mínimo de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; Q1: valor del primer cuantil de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; MED.: valor de la mediana de la distribución para la DEE obtenida en el punto de exposición; PROM.: valor del promedio de la distribución de la DEE obtenida en el punto de exposición; Q3: valor del tercer cuantil de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; MÁX.: valor máximo de la distribución obtenida para la DEE en el punto de muestreo; σ: valor de la desviación estándar de la distribución en el punto de exposición
Todos los valores de DEE están dados en mg/kg-día.

En los restantes puntos de exposición los % que exceden las DEE son poco significativos y pueden atribuirse a los valores extremos de la distribución. Lo mismo sucede con el umbral de riesgo asociado a la fluorosis esquelética para adultos. Otra conclusión que se extrae del resumen que se muestra en la tabla, es que en general, los valores de desviación estándar sugieren que los datos están relativamente cerca de la media y que hay poca variabilidad relativa en la distribución.

En la Fig.5.28 se observa en un diagrama de violín las distribuciones resultantes del análisis de Monte Carlo para DEE del F^- para niños en cada punto de exposición y los umbrales RfD, NOAEL y LOAEL. Los violines y sus respectivos diagramas de cajas y bigotes muestran las curvas probabilísticas y sus descriptores estadísticos. De compararlos con los umbrales se observa que en todos los puntos de exposición se excede en % significativos el umbral del RfD y es en los puntos MZ-82, CN-2, MZ-68, MZ-104 y el Pozo-07 donde las DEE exceden en un mayor % los umbrales NOAEL y LOAEL por lo que existe un riesgo potencial alto de que los niños presenten fluorosis dental. Estos resultados también avalan los alcanzados por el método determinístico y permiten crear una categorización de probabilidad del riesgo más exacta.

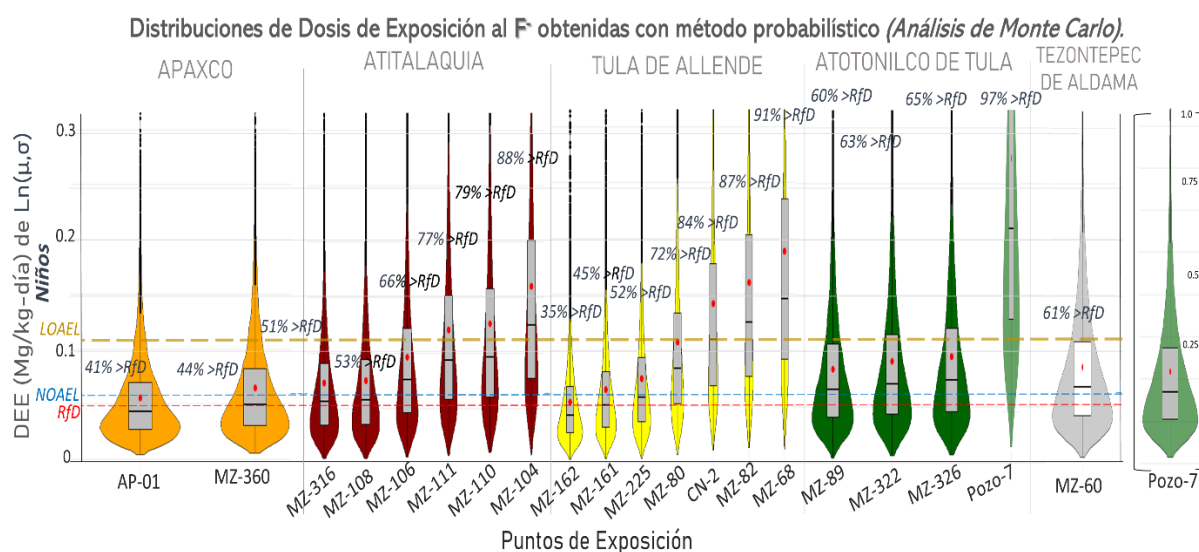


Figura 5.28 Diagrama de violines de las DEE $niños, F^-$ por la vía oral en el Escenario I respecto al RfD, NOAEL y LOAEL.

En la tabla 5.21 se relacionan los parámetros estadísticos descriptivos de la distribución obtenida en la simulación de Monte Carlo y los % de la distribución que exceden los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL) para el As. En la tabla se aprecia que, niños y adultos presentan DEE elevadas y que sus desviaciones estándar indican una muy poca variabilidad.

Tabla 5.21. Resumen de las distribuciones de DEE por punto de exposición para niños y adultos obtenidas con el análisis de Monte Carlo para el As y % de excedencia a los umbrales (RfD, NOAEL y LOAEL).

ID	R	MIN	Q1	MED	PROM	Q3	MÁX	σ	%> RfD	%> NOAEL	%> LOAEL
AP-02	Niño	4.33E-5	3.01E-4	0.001	0.009	0.001	0.007	0.000	75	16	0
	Adulto	1.51E-5	9.39E-5	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	13	0	0
AP-04	Niño	2.43E-4	1.74E-3	0.003	0.004	0.005	0.039	0.003	100	94	1
	Adulto	6.54E-5	5.29E-4	0.001	0.001	0.001	0.010	0.001	90	42	0
MZ-360	Niño	9.58E-4	6.06E-3	0.010	0.012	0.016	0.148	0.010	100	100	28
	Adulto	3.01E-4	1.84E-3	0.003	0.004	0.004	0.042	0.002	100	95	0.5
MZ-104	Niño	8.02E-4	5.25E-3	0.008	0.011	0.014	0.088	0.009	100	100	23
	Adulto	2.01E-4	1.66E-3	0.003	0.003	0.004	0.027	0.002	100	93	0.3
MZ-106	Niño	6.19E-4	4.45E-3	0.007	0.009	0.012	0.116	0.007	100	100	16
	Adulto	1.98E-4	1.37E-3	0.002	0.003	0.003	0.025	0.002	100	89	0.1
MZ-108	Niño	5.62E-4	3.56E-3	0.006	0.007	0.009	0.099	0.006	100	99	10
	Adulto	1.63E-4	1.11E-3	0.002	0.002	0.003	0.017	0.001	99	82	0
MZ-110	Niño	8.24E-4	4.63E-3	0.007	0.010	0.012	0.124	0.008	100	100	18
	Adulto	2.09E-4	1.42E-3	0.002	0.003	0.003	0.021	0.002	99	90	0.2
MZ-111	Niño	2.56E-4	2.19E-3	0.004	0.005	0.006	0.044	0.004	100	97	2.5
	Adulto	9.63E-5	6.85E-4	0.001	0.001	0.002	0.011	0.001	97	57	0
MZ-322	Niño	4.59E-4	3.34E-3	0.005	0.007	0.009	0.058	0.005	100	99	8
	Adulto	1.45E-4	1.02E-3	0.002	0.002	0.003	0.016	0.001	99	78	0
MZ-326	Niño	8.42E-4	6.19E-3	0.010	0.013	0.016	0.152	0.010	100	100	30
	Adulto	2.61E-4	1.92E-3	0.003	0.004	0.005	0.026	0.002	100	95	0.5
MZ-89	Niño	2.01E-4	1.79E-3	0.003	0.004	0.005	0.035	0.003	100	95	1.0
	Adulto	4.48E-5	5.51E-4	0.001	0.001	0.001	0.010	0.001	94	43	0
Pozo7	Niño	3.43E-3	3.32E-2	0.054	0.069	0.087	0.700	0.054	100	100	97
	Adulto	1.26E-3	1.02E-2	0.016	0.020	0.025	0.213	0.014	100	100	57
MZ-60	Niño	9.08E-5	1.00E-3	0.002	0.002	0.003	0.015	0.002	99	78	0
	Adulto	2.95E-5	3.08E-4	0.000	0.001	0.001	0.004	0.0004	76	15	0
CN-2	Niño	1.50E-3	9.62E-3	0.015	0.020	0.025	0.224	0.016	100	100	54
	Adulto	3.67E-4	2.93E-3	0.005	0.006	0.007	0.042	0.004	100	99	3.8
MZ-39	Niño	2.23E-4	1.63E-3	0.003	0.003	0.004	0.031	0.003	100	93	0.7
	Adulto	7.09E-5	5.04E-4	0.001	0.001	0.001	0.009	0.001	91	39	0
MZ-68	Niño	1.56E-3	1.67E-2	0.027	0.035	0.044	0.350	0.027	100	100	81
	Adulto	5.12E-4	5.05E-3	0.008	0.010	0.013	0.071	0.007	100	100	19
MZ-80	Niño	5.07E-4	4.56E-3	0.007	0.010	0.012	0.093	0.007	100	99	18
	Adulto	1.62E-4	1.42E-3	0.002	0.003	0.003	0.024	0.002	100	90	0.1
MZ-82	Niño	1.17E-3	1.00E-2	0.016	0.021	0.026	0.233	0.016	100	100	56
	Adulto	5.01E-4	3.10E-3	0.005	0.006	0.008	0.059	0.004	100	99	4

ID: Identificador; R: Receptores; MIN: valor mínimo; Q1: primer cuantil de la distribución; MED.: mediana de la distribución; PROM.: promedio de la distribución; Q3: tercer cuantil; MÁX.: valor máximo; σ : desviación estándar. Todos los valores de DEE están dados en mg/kg-día.

En la Fig.5.29 se observa en un diagrama de violín las distribuciones resultantes del análisis de Monte Carlo para DEE de niños y adultos en cada punto de exposición y los umbrales RfD. En el diagrama se observa que, tanto para niños como para adultos, con excepción del punto de exposición AP-02, las DEE superan en más de un 90% el umbral del RfD. Para

las DEE obtenidas en el punto de exposición AP-02 de Apaxco se tiene un riesgo potencial en niños, pero se puede decir que no existe ese riesgo para receptores adultos, el 12% de las DEE que supera el RfD puede asociarse a valores extremos, como se aprecia gráficamente, corresponden a la cola de la distribución lognormal.

Los puntos de mayor riesgo tanto para niños como adultos, estableciendo como criterio aquellas distribuciones donde las DEE superan en un mayor % los umbrales del NOAEL y el LOAEL son: MZ-82, MZ-68, CN-2, MZ-326, MZ-360 y MZ-104. Estos resultados también son coincidentes con los obtenidos por el método determinístico.

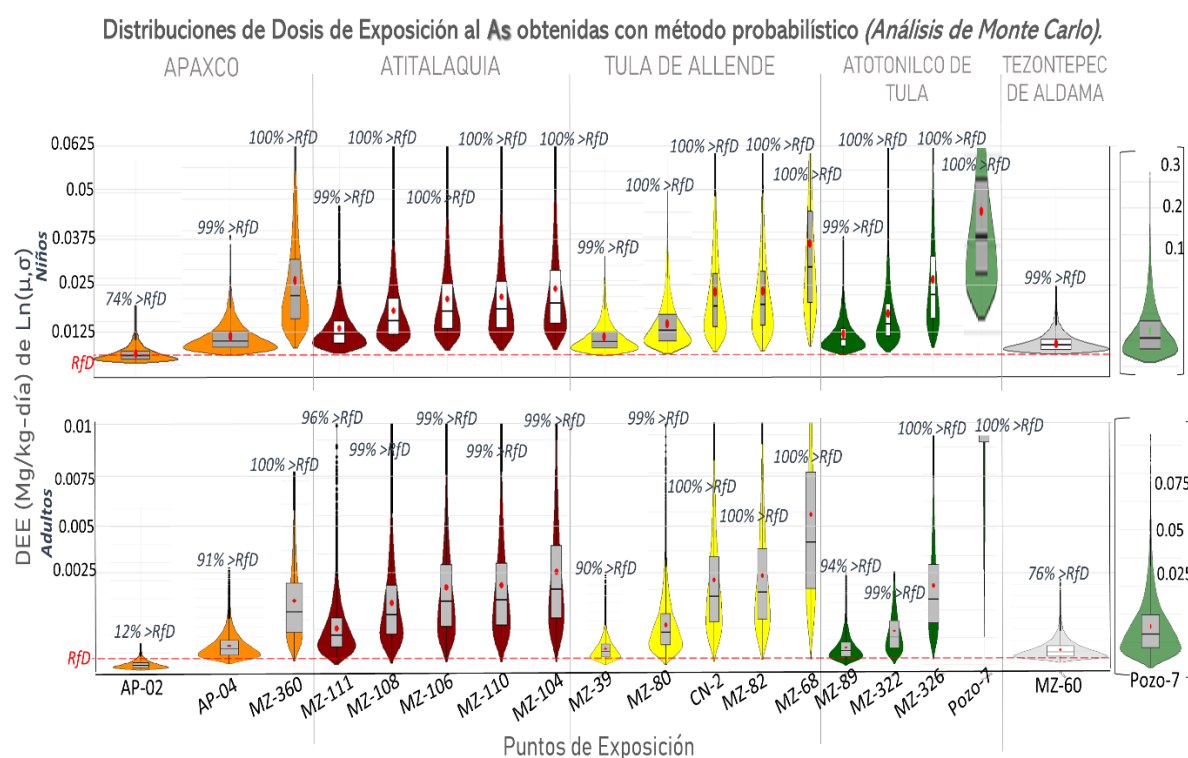


Figura 5.29. Diagrama de violines de las DEE, As por la vía oral para niños y adultos en el Escenario I respecto al RfD.

- *Estimación cuantitativa del riesgo no cancerígeno*

El análisis cuantitativo del riesgo por el método probabilístico se realizó, como indica la metodología, a partir de las estimaciones donde se obtuvo la probabilidad de un riesgo para

la salud de los receptores. Para este análisis no se tuvieron en cuenta los valores máximos y mínimos por asociarse a la población más sensible.

En la tabla 5.22 se relacionan los valores de HQ para el $N-NO_3^-$. Se concluye que es a partir del valor de la mediana donde aparecen DEE superiores a las dosis de exposición recomendadas para un 35.7% del total. En los HQ promedio, el 57% de los puntos de exposición presentan riesgo potencial. En los HQ del tercer cuartil (Q3), el 85.7% de los puntos de exposición superan las DEE recomendadas para exposición crónica al NO_3^- . La prevalencia de valores de HQ superiores o cercanos a uno desde el valor de la mediana son indicio de áreas de mayor preocupación.

Tabla 5.22. Resumen de los valores de HQ para el $N-NO_3^-$ calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral en niños a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.

ID	HQMIN	HQQ1	HQMED	HQPROM	HQQ3	HQMÁX
MZ-106	0.11	0.76	1.21	1.56	1.97	19.64
MZ-108	0.05	0.34	0.56	0.72	0.91	8.50
MZ-111	0.03	0.34	0.54	0.70	0.87	8.29
MZ-316	0.07	0.50	0.79	1.03	1.28	11.51
MZ-326	0.06	0.51	0.83	1.05	1.32	10.35
MZ-60	0.08	0.68	1.09	1.40	1.76	15.15
MZ-312	0.10	0.79	1.26	1.63	2.04	13.29
CN-2	0.05	0.49	0.79	1.02	1.30	9.82
MZ-161	0.06	0.38	0.62	0.80	1.01	7.32
MZ-225	0.06	0.63	1.01	1.30	1.64	11.37
MZ-39	0.08	0.68	1.08	1.38	1.73	11.39
MZ-68	0.06	0.42	0.69	0.88	1.12	7.93
MZ-80	0.05	0.38	0.61	0.80	1.00	10.49
MZ-82	0.04	0.40	0.65	0.83	1.04	10.92

ID: Identificador; HQMIN: Coeficiente de peligro calculado con el valor mínimo de la distribución; HQQ1: Coeficiente de peligro calculado con el valor del primer cuartil de la distribución; HQMED.: Coeficiente de peligro calculado con el valor de la mediana de la distribución; HQPROM: Coeficiente de peligro calculado con el valor del promedio de la distribución; HQQ3: Coeficiente de peligro calculado con el valor del tercer cuartil de la distribución; HQMÁX: Coeficiente de peligro calculado con el valor máximo de la distribución.

En la tabla 5.23 se relacionan los valores de HQ para los F^- . En el caso de los F^- , las DEE superiores a las recomendadas para una exposición crónica aparecen desde el primer cuartil (Q1), donde un 40% de los puntos de exposición presentan valores superiores a la unidad y en los restantes puntos se aproximan. En los HQ estimados a partir de la mediana de la distribución, el 85% de los puntos de exposición exceden las dosis de exposición recomendadas, siendo especialmente crítico en el Pozo-07 que es hasta cuatro veces mayor, y los puntos MZ-104, CN-2, MZ-68 y MZ-82 que alcanza más del doble de lo recomendado.

En promedio, el 100% de los puntos de exposición superan las dosis recomendadas. Para el

tercer cuartil (Q3), aparecen coeficientes de riesgo de 3 y hasta 6 veces mayor a lo recomendado. Los valores de HQ consistentemente altos en todos los cuartiles son indicativo de un riesgo potencial de fluorosis dental en los niños expuestos a las DEE.

Tabla 5.23. Resumen de los valores de HQ para los F⁻ calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral en niños a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.

ID	HQMIN	HQQ1	HQMED	HQPROM	HQQ3	HQMÁX
AP-01	0.07	0.54	0.86	1.11	1.40	13.86
MZ-360	0.11	0.62	0.99	1.30	1.65	14.52
MZ-104	0.18	1.55	2.50	3.19	4.03	35.45
MZ-106	0.13	0.93	1.52	1.93	2.45	18.10
MZ-108	0.11	0.73	1.16	1.51	1.88	18.28
MZ-110	0.21	1.21	1.93	2.53	3.16	23.75
MZ-111	0.16	1.17	1.87	2.42	3.02	21.48
MZ-316	0.10	0.71	1.13	1.46	1.82	15.69
MZ-322	0.13	0.88	1.41	1.81	2.30	14.75
MZ-326	0.14	0.91	1.48	1.90	2.40	18.25
MZ-89	0.08	0.82	1.31	1.68	2.12	15.37
Pozo-7	0.39	2.63	4.21	5.45	6.83	50.43
MZ-60	0.09	0.84	1.35	1.71	2.17	15.18
CN-2	0.22	1.36	2.19	2.83	3.55	29.80
MZ-161	0.07	0.63	1.01	1.30	1.62	12.58
MZ-162	0.06	0.52	0.84	1.07	1.35	11.61
MZ-225	0.06	0.72	1.16	1.49	1.87	14.33
MZ-68	0.23	1.83	2.92	3.77	4.71	50.26
MZ-80	0.13	1.05	1.67	2.15	2.67	28.45
MZ-82	0.26	1.53	2.50	3.21	4.06	33.77

ID: Identificador; HQMIN: Coeficiente de peligro calculado con el valor mínimo de la distribución; HQQ1: Coeficiente de peligro calculado con el valor del primer cuartil de la distribución; HQMED.: Coeficiente de peligro calculado con el valor de la mediana de la distribución; HQPROM: Coeficiente de peligro calculado con el valor del promedio de la distribución; HQQ3: Coeficiente de peligro calculado con el valor del tercer cuartil de la distribución; HQMÁX: Coeficiente de peligro calculado con el valor máximo de la distribución.

En la tabla 5.24 se relacionan los valores de HQ para el As. Respecto al As, el 66.7% de los puntos de muestreo presentan dosis de exposición superiores a las recomendadas desde las estimadas a partir de los valores mínimos de la distribución para niños y 27.8% para adultos. Las dosis mínimas se asocian con la población que presenta alta resiliencia frente al tóxico (menor ingesta de agua y factor de exposición), aun así, se tienen dosis de exposición de 5 y 11 veces mayores a la recomendada. A partir del primer cuartil (Q1) se tiene en el 100% de los puntos de exposición riesgos potenciales a la salud de niños y adultos. En las HQ promedios, las dosis de exposición llegan a ser hasta 115 y 228 veces superiores las recomendadas para niños y en razón de más de 60 veces superiores para adultos.

Tabla 5.24. Resumen de los valores de HQ para el As calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo no cancerígeno por vía oral en niños y adultos a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.

ID	R	HQ _{MIN}	HQ _{Q1}	HQ _{MED}	HQ _{PROM}	HQ _{Q3}	HQ _{MÁX}
AP-02	Niño	0.14	1.00	1.61	30.89	2.62	21.83
	Adulto	0.05	0.31	0.49	8.85	0.76	3.55
AP-04	Niño	0.81	5.81	9.34	11.98	15.05	128.88
	Adulto	0.22	1.76	2.77	3.38	4.32	33.77
MZ-360	Niño	3.19	20.19	32.05	41.37	51.90	492.43
	Adulto	1.00	6.14	9.74	11.77	14.96	140.85
MZ-104	Niño	2.67	17.49	28.30	36.62	45.97	294.88
	Adulto	0.67	5.52	8.59	10.52	13.38	90.73
MZ-106	Niño	2.06	14.83	24.06	30.89	38.75	386.51
	Adulto	0.66	4.56	7.25	8.85	11.28	84.04
MZ-108	Niño	1.87	11.85	18.97	24.70	31.01	328.41
	Adulto	0.54	3.70	5.78	7.13	9.05	55.96
MZ-110	Niño	2.75	15.42	24.93	32.23	40.08	414.96
	Adulto	0.70	4.73	7.42	9.03	11.51	71.05
MZ-111	Niño	0.85	7.30	11.71	15.10	19.00	145.12
	Adulto	0.32	2.28	3.55	4.30	5.47	37.05
MZ-322	Niño	1.53	11.13	17.57	22.75	28.52	192.88
	Adulto	0.48	3.41	5.37	6.54	8.36	52.03
MZ-326	Niño	2.81	20.65	33.18	42.87	54.05	506.80
	Adulto	0.87	6.39	10.02	12.09	15.34	85.60
MZ-89	Niño	0.67	5.96	9.49	12.17	15.21	117.60
	Adulto	0.15	1.84	2.84	3.48	4.41	34.96
Pozo-7	Niño	11.42	110.59	178.54	228.76	289.91	2334.38
	Adulto	4.21	34.06	53.80	65.58	82.84	709.78
MZ-60	Niño	0.30	3.35	5.38	6.91	8.67	50.98
	Adulto	0.10	1.03	1.63	1.98	2.54	12.45
CN-2	Niño	4.99	32.07	51.62	66.51	84.53	747.14
	Adulto	1.22	9.76	15.19	18.73	23.72	141.03
MZ-39	Niño	0.74	5.44	8.75	11.27	14.10	102.26
	Adulto	0.24	1.68	2.63	3.18	4.05	29.82
MZ-68	Niño	5.19	55.81	89.96	115.63	146.47	1166.43
	Adulto	1.71	16.85	26.85	32.80	41.97	235.79
MZ-80	Niño	1.69	15.19	24.62	31.67	40.03	311.60
	Adulto	0.54	4.72	7.43	9.04	11.47	78.49
MZ-82	Niño	3.89	33.46	53.64	68.60	86.37	777.01
	Adulto	1.67	10.32	16.09	19.70	25.46	197.74

ID: Identificador; R: Receptores; HQ_{MIN}: Coeficiente de peligro calculado con el valor mínimo de la distribución; HQ_{Q1}: Coeficiente de peligro calculado con el valor del primer cuantil de la distribución; HQ_{MED}: Coeficiente de peligro calculado con el valor de la mediana de la distribución; HQ_{PROM}: Coeficiente de peligro calculado con el valor del promedio de la distribución; HQ_{Q3}: Coeficiente de peligro calculado con el valor del tercer cuantil de la distribución; HQ_{MÁX}: Coeficiente de peligro calculado con el valor máximo de la distribución.

- *Estimación cuantitativa del riesgo cancerígeno*

En la tabla 5.25 se hace un resumen de los valores de RIC obtenidos para niños y adultos en los puntos de exposición. En la tabla se aprecia que los valores de RIC para los niños son consistente y significativamente mayores que para los adultos, por lo que sin duda es una población más vulnerable a los riesgos potenciales a la salud por la exposición a As en la vía oral.

Tabla 5.25. Resumen de los valores de RIC para el As calculados para la evaluación cuantitativa del riesgo cancerígeno por vía oral en niños y adultos a partir de las DEE obtenidas con el método probabilístico.

ID	R	RICMIN	RICQ1	RICMED	RICPROM	RICQ3	RICMÁX
AP-02	Niño	6.50E-04	4.52E-03	7.25E-03	1.39E-01	1.18E-02	9.82E-02
	Adulto	2.27E-05	1.41E-04	2.20E-04	3.98E-03	3.41E-04	1.60E-03
AP-04	Niño	3.65E-03	2.61E-02	4.20E-02	5.39E-02	6.77E-02	5.80E-01
	Adulto	9.81E-05	7.94E-04	1.25E-03	1.52E-03	1.95E-03	1.52E-02
MZ-360	Niño	1.44E-02	9.09E-02	1.44E-01	1.86E-01	2.34E-01	2.22E+00
	Adulto	4.52E-04	2.76E-03	4.38E-03	5.29E-03	6.73E-03	6.34E-02
MZ-104	Niño	1.20E-02	7.87E-02	1.27E-01	1.65E-01	2.07E-01	1.33E+00
	Adulto	3.01E-04	2.48E-03	3.87E-03	4.73E-03	6.02E-03	4.08E-02
MZ-106	Niño	9.28E-03	6.67E-02	1.08E-01	1.39E-01	1.74E-01	1.74E+00
	Adulto	2.97E-04	2.05E-03	3.26E-03	3.98E-03	5.08E-03	3.78E-02
MZ-108	Niño	8.42E-03	5.33E-02	8.54E-02	1.11E-01	1.40E-01	1.48E+00
	Adulto	2.44E-04	1.67E-03	2.60E-03	3.21E-03	4.07E-03	2.52E-02
MZ-110	Niño	1.24E-02	6.94E-02	1.12E-01	1.45E-01	1.80E-01	1.87E+00
	Adulto	3.14E-04	2.13E-03	3.34E-03	4.06E-03	5.18E-03	3.20E-02
MZ-111	Niño	3.83E-03	3.29E-02	5.27E-02	6.80E-02	8.55E-02	6.53E-01
	Adulto	1.44E-04	1.03E-03	1.60E-03	1.93E-03	2.46E-03	1.67E-02
MZ-322	Niño	6.88E-03	5.01E-02	7.91E-02	1.02E-01	1.28E-01	8.68E-01
	Adulto	2.17E-04	1.54E-03	2.42E-03	2.94E-03	3.76E-03	2.34E-02
MZ-326	Niño	1.26E-02	9.29E-02	1.49E-01	1.93E-01	2.43E-01	2.28E+00
	Adulto	3.91E-04	2.87E-03	4.51E-03	5.44E-03	6.90E-03	3.85E-02
MZ-89	Niño	3.01E-03	2.68E-02	4.27E-02	5.47E-02	6.84E-02	5.29E-01
	Adulto	6.72E-05	8.27E-04	1.28E-03	1.56E-03	1.99E-03	1.57E-02
Pozo-7	Niño	5.14E-02	4.98E-01	8.03E-01	1.03E+00	1.30E+00	1.05E+01
	Adulto	1.89E-03	1.53E-02	2.42E-02	2.95E-02	3.73E-02	3.19E-01
MZ-60	Niño	1.36E-03	1.51E-02	2.42E-02	3.11E-02	3.90E-02	2.29E-01
	Adulto	4.42E-05	4.62E-04	7.34E-04	8.93E-04	1.14E-03	5.60E-03
CN-2	Niño	2.24E-02	1.44E-01	2.32E-01	2.99E-01	3.80E-01	3.36E+00
	Adulto	5.51E-04	4.39E-03	6.83E-03	8.43E-03	1.07E-02	6.35E-02
MZ-39	Niño	3.34E-03	2.45E-02	3.94E-02	5.07E-02	6.35E-02	4.60E-01
	Adulto	1.06E-04	7.56E-04	1.18E-03	1.43E-03	1.82E-03	1.34E-02
MZ-68	Niño	2.33E-02	2.51E-01	4.05E-01	5.20E-01	6.59E-01	5.25E+00
	Adulto	7.68E-04	7.58E-03	1.21E-02	1.48E-02	1.89E-02	1.06E-01
MZ-80	Niño	7.61E-03	6.84E-02	1.11E-01	1.43E-01	1.80E-01	1.40E+00
	Adulto	2.43E-04	2.12E-03	3.35E-03	4.07E-03	5.16E-03	3.53E-02
MZ-82	Niño	1.75E-02	1.51E-01	2.41E-01	3.09E-01	3.89E-01	3.50E+00
	Adulto	7.52E-04	4.64E-03	7.24E-03	8.86E-03	1.15E-02	8.90E-02

ID: Identificador; R: Receptores; RICMIN: Riesgo Incremental de Cáncer calculado con el valor mínimo de la distribución; RICQ1: Riesgo Incremental de Cáncer calculado con el valor del primer cuantil de la distribución; RICMED.: Riesgo Incremental de Cáncer calculado con el valor de la mediana de la distribución; RICPROM: Riesgo Incremental de Cáncer calculado con el valor del promedio de la distribución; RICQ3: Riesgo Incremental de Cáncer calculado con el valor del tercer cuantil de la distribución; RICMÁX: Riesgo Incremental de Cáncer calculado con el valor máximo de la distribución.

La variabilidad en los valores del RIC entre la población infantil y la adulta, así como entre los datos individuales de cada población es relativamente baja, resultado de distribuciones muy compactas como se observa en la Fig. 5.30.

En la figura se aprecia claramente que desde el RIC calculado con los valores mínimos se excede el umbral asumido de riesgo permisible con valor de 10^{-6} (o 1 en 1,000,000) para todos los puntos de exposición considerados. Ello equivale a decir que, respecto al umbral

de riesgo permisible considerado, que el riesgo de probabilidad adicional de desarrollar cáncer debido a la exposición por vía oral al As en el agua potable es inaceptable tanto para niños como adultos en todos los puntos de exposición considerados.

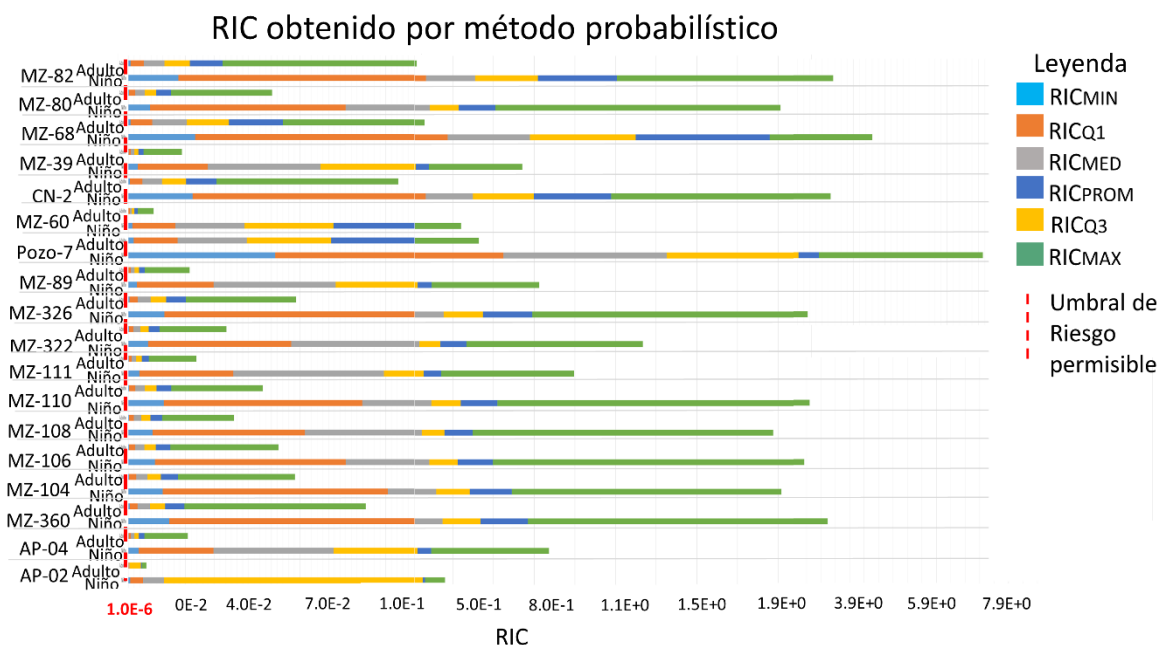


Figura 5.30 Gráfico de barras agrupadas de la distribución del RIC obtenido por método probabilístico para niños y adultos por vía oral dada la exposición al As en el agua potable del área de estudio.

Se aprecia además que el valor del RIC en niños es muchísimo mayor que en adultos. Así como que es en los puntos MZ-82, MZ-68, CN-2 y Pozo-07 donde se obtuvieron mayores RIC en ambos receptores. Siguiendo en criticidad el MZ-80, MZ-326, MZ-322, MZ-11, MZ-110, MZ-108, MZ-106, MZ-104 y MZ-360.

5.5 Análisis de la incertidumbre

La evaluación de la incertidumbre es fundamental para una toma de decisiones informada, la gestión de riesgos, la planificación, la comunicación y la mejora de la calidad de la investigación (US.EPA, 2024). Esta fue evaluada en función de realizar una mejor caracterización del riesgo. Respecto a la incertidumbre del escenario, se considera que la mayor incertidumbre está en el supuesto de que el agua subterránea sea la única fuente de

exposición a los CC para los receptores en el área de estudio.

La incertidumbre en los modelos matemáticos y los parámetros de entrada fue caracterizada y tratada a partir del análisis de sensibilidad y el análisis probabilístico de Monte Carlo que permiten definir y tratar las mayores fuentes de incertidumbre y la variabilidad en los datos. A continuación, se analizan detalladamente los resultados del primer análisis y la veracidad alcanzada con el método probabilístico.

- *Análisis de sensibilidad*

En la Fig.5.25 se observan las gráficas de dispersión y sus respectivas líneas de tendencia central entre los parámetros de entrada (C, Tc, PC, FE) y la DEE obtenidas en el análisis de sensibilidad.

Hay que recordar que C es la concentración del compuesto considerado CC en el agua, TC es la ingesta promedio de la cantidad de agua que se ingiere al día PC es el peso corporal promedio del individuo y FE es el factor de exposición (adimensional).

Los coeficientes de correlación de Pearson entre cada parámetro y DEE *oral* obtenidos en el análisis de sensibilidad son los siguientes:

- Para el parámetro C: 0.85864344
- Para el parámetro TC: 0.15203645
- Para el parámetro PC: -0.08128183
- Para el parámetro FE: 0.10866186

Los coeficientes de determinación (R^2) de la regresión son los siguientes:

- Para el parámetro C: 0.8373
- Para el parámetro TC: 0.0521
- Para el parámetro PC: 0.0156
- Para el parámetro FE: 0.0298

Correlaciones entre la DEE y los parámetros de entrada al modelo (C, TC, FE y PC)

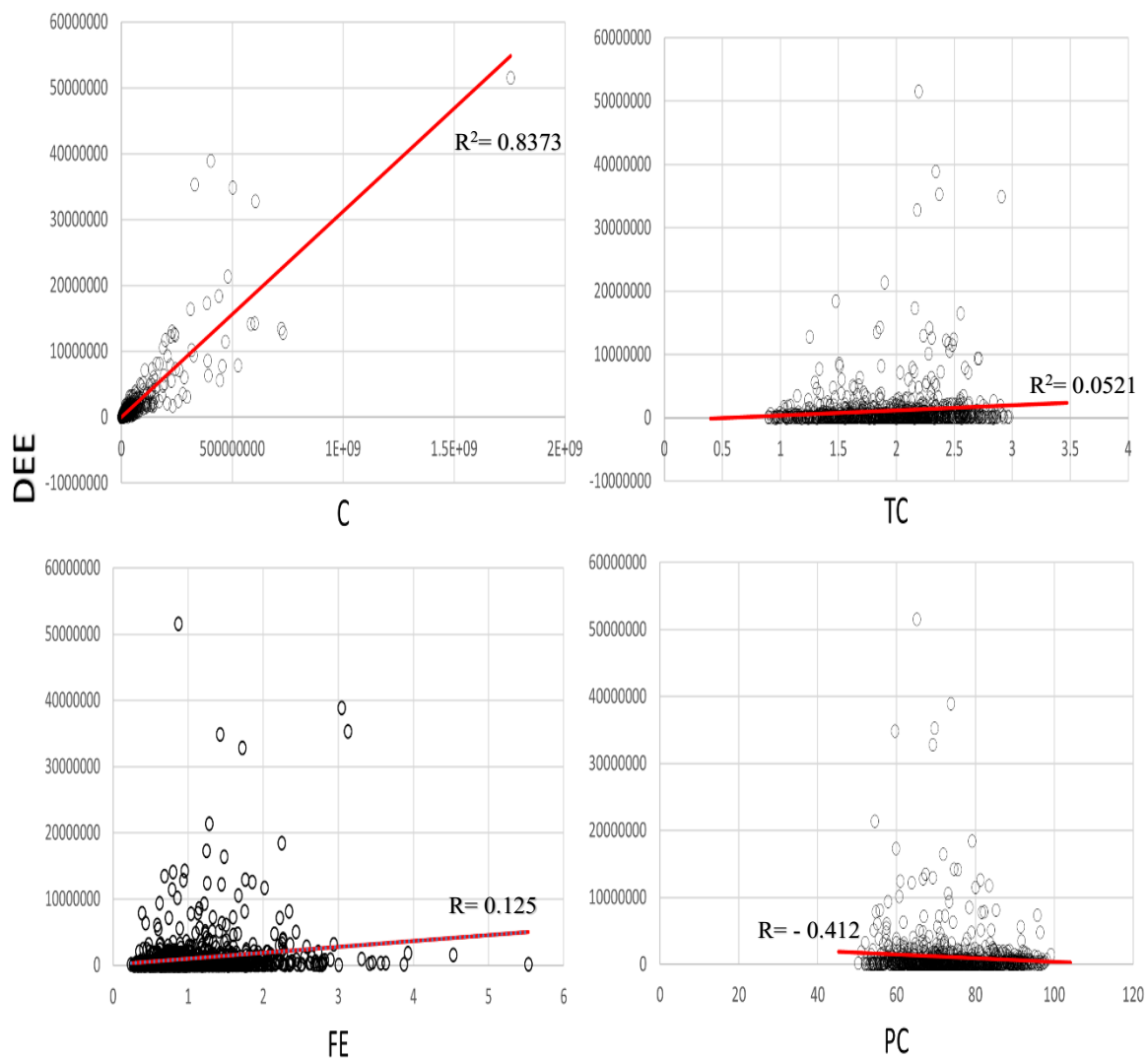


Figura 5.31. Gráficos de dispersión de las correlaciones obtenidas en el análisis de sensibilidad local entre las DEE y los parámetros de entrada del modelo (C, TC, FE y PC respectivamente).

Los coeficientes de Pearson indican una correlación positiva moderadamente fuerte entre el parámetro C y las DEE *oral*. Presentan correlaciones positivas moderadas con los parámetros TC y FE, en ese orden de magnitud. Respecto al PC, la correlación es negativa, fenómeno que también se observa en la gráfica de la DEE vs PC, indicador de que son inversamente proporcionales, es decir, cuando crece el PC la DEE en promedio tiende a disminuir y viceversa.

De lo anterior se determina que estos parámetros explican el 93.48% de la variabilidad de las DEE *oral*. Tan solo la concentración explica aproximadamente el 83.7% de la variación de la variable dependiente. Por lo que estos son los parámetros que más influyen en la incertidumbre a la hora del riesgo y es necesario su correcta caracterización para lograr estimaciones más acertadas.

- *Comparación de los resultados de DEE obtenidos por ambos métodos*

De la comparación para las DEE estimadas por el método determinístico y el probabilístico se obtuvo siempre que la primera se encuentra dentro del intervalo de confianza (IC) del 95% de las distribuciones de probabilidad arrojadas por el análisis de Monte Carlo. En las Fig. 5.32, 5.33 y 5.34 se puede comprobar la representación visual de los resultados alcanzados. De estos resultados se puede interpretar que existe una alineación en los modelos matemáticos empleados.

Aunque el método determinístico utilizado generalmente se basa en suposiciones o modelos simplificados, debido a que los valores obtenidos por este método se presentan dentro del intervalo de confianza del 95% derivado del análisis de Monte Carlo, se concluye que el método determinístico es consistente con las variabilidades y las incertidumbres inherentes en los datos. Además, se está reconociendo que existen variabilidades en los datos y que el valor puede cambiar en función de estas variabilidades.

En otras palabras, hay un 95% de probabilidad de que el valor real de la DEE se ubique dentro de ese rango. De esta forma se comprueba la robustez y confiabilidad del valor obtenido por el método determinístico en un entorno de incertidumbres.

Método probabilístico vs estocástico de determinación de DEE para $N-NO_3^-$ en niños y adultos

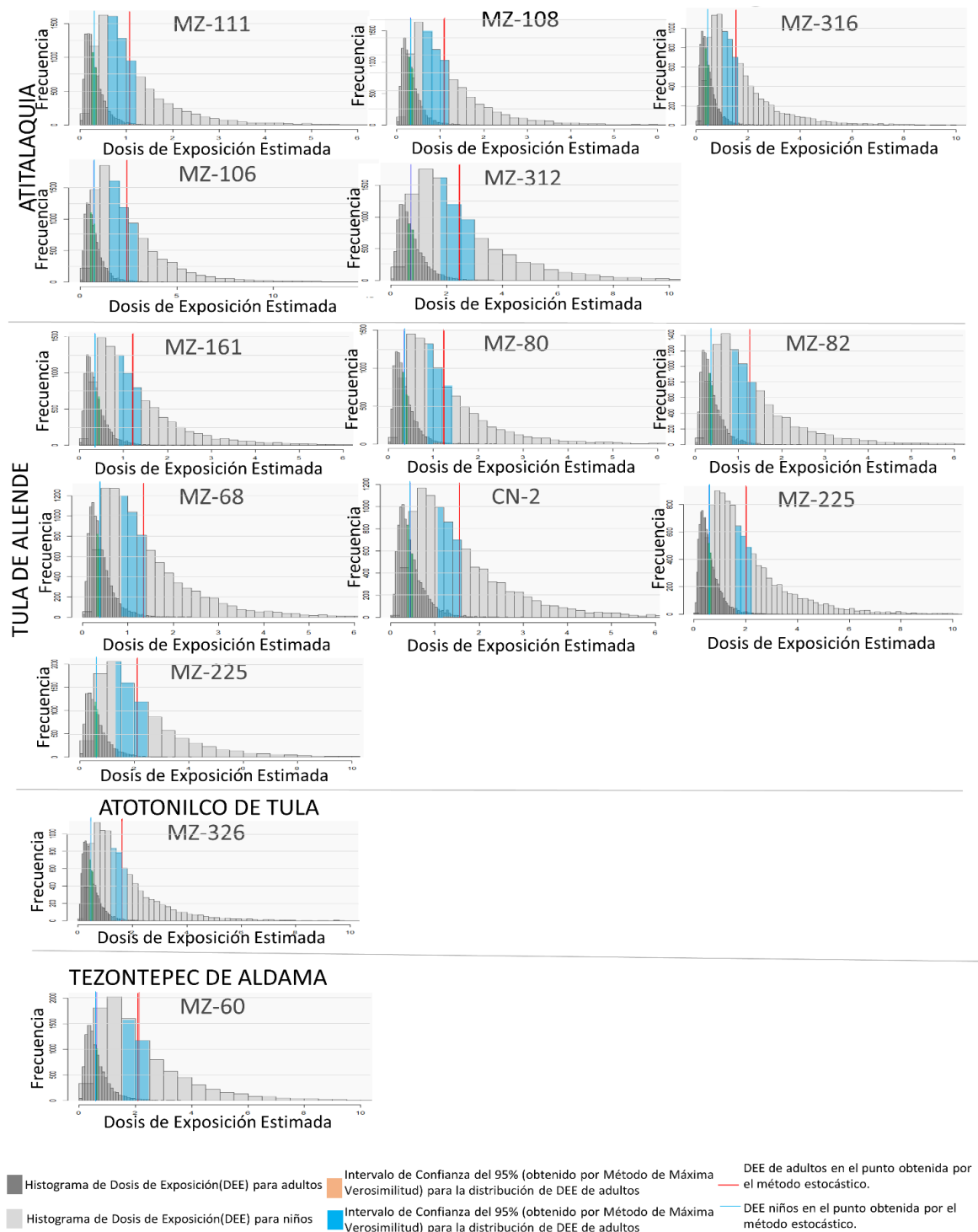


Figura 5.32. Histogramas de distribución de las DEE para $N-NO_3^-$ de niños y adultos obtenidos con el análisis de Monte Carlo en cada punto de exposición con sus respectivos IC95% vs el valor obtenido por el método determinístico.

Método probabilístico vs estocástico de determinación de DEE para F- en niños y adultos

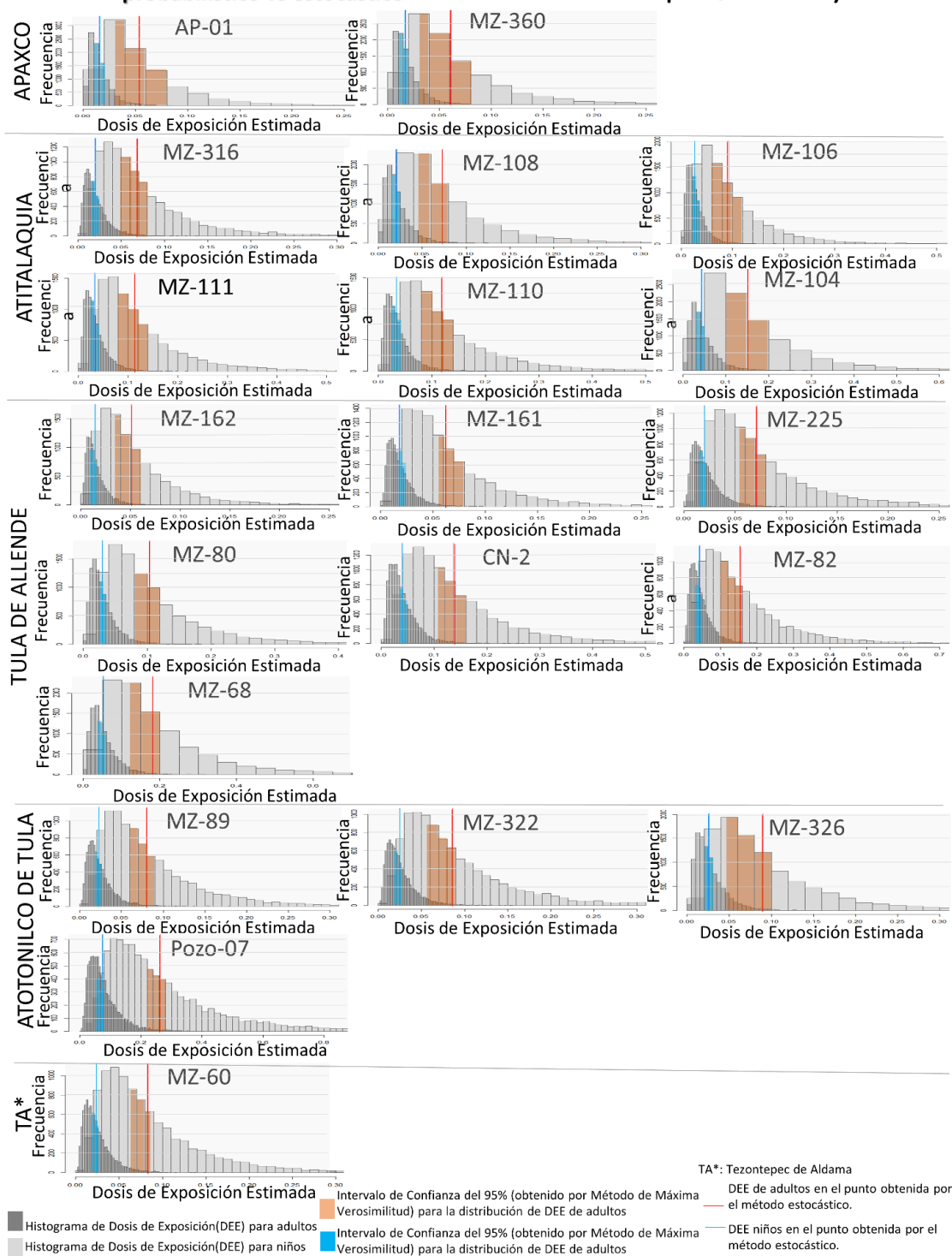


Figura 5.33 Histogramas de distribución de las DEE para F- de niños y adultos obtenidos con el análisis de Monte Carlo en cada punto de exposición con sus respectivos IC95% vs el valor obtenido por el método determinístico.

Método probabilístico vs estocástico de determinación de DEE para As en niños y adultos

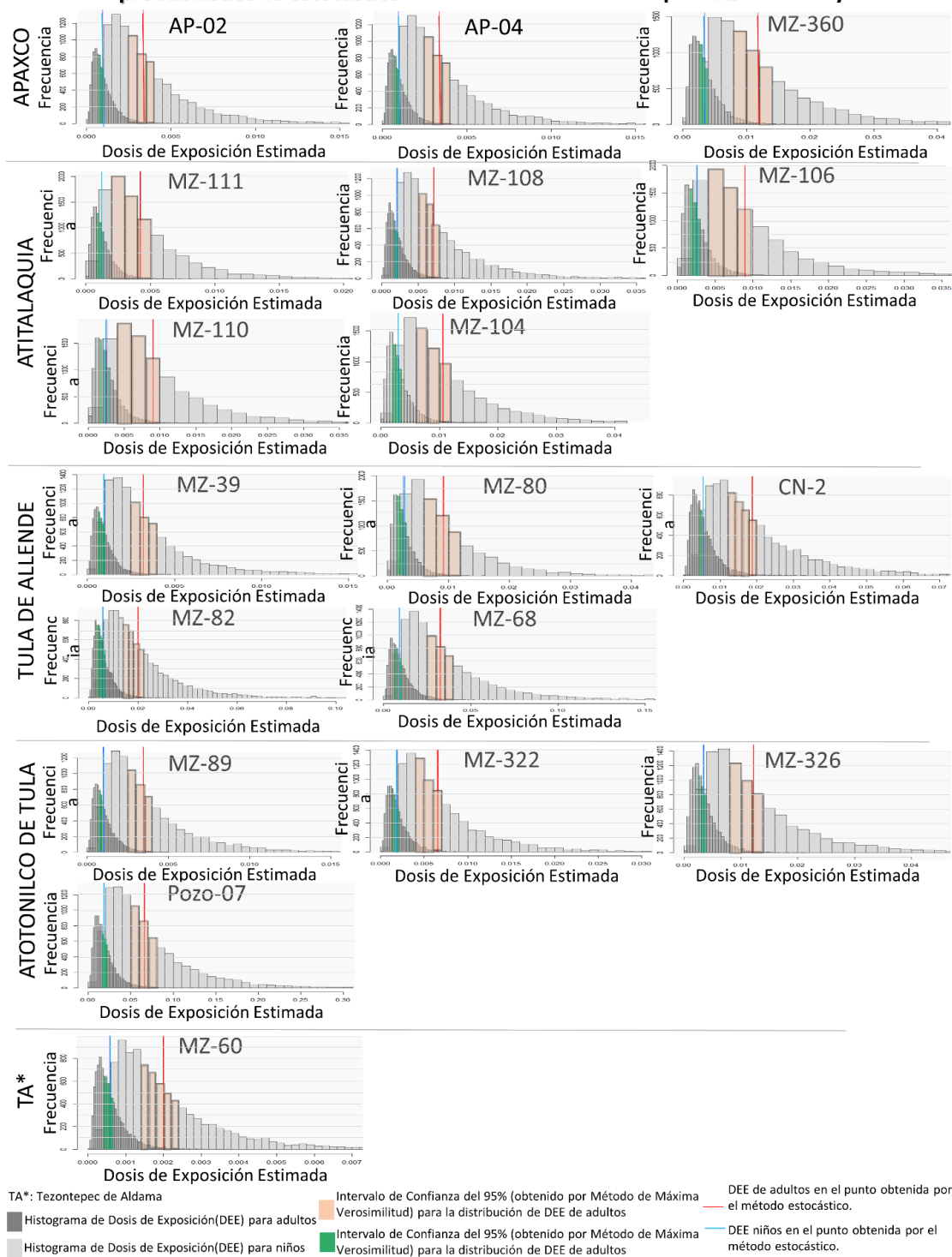


Figura 5.34. Histogramas de distribución de las DEE para As de niños y adultos obtenidos con el análisis de Monte Carlo en cada punto de exposición con sus respectivos IC95% vs el valor obtenido por el método determinístico.

5.6 Modelo Conceptual del Riesgo

Finalmente, se ofrece la categorización de los niveles del riesgo no cancerígeno estimado.

- *Categorización del riesgo individual no cancerígeno*

La categorización del riesgo individual no cancerígeno, tal como se ha venido desarrollando, se realizó para cada CC identificado en el área de estudio. Atendiendo a las características toxicológicas individuales de cada CC y a los criterios explicados se agruparon los puntos de exposición en los siguientes tres niveles de riesgo: bajo, medio y alto.

Hay que señalar que, aunque se clasifique un punto de exposición como riesgo bajo, no significa que no exista el riesgo, existe la probabilidad de un riesgo potencial de manifestarse efectos negativos en la salud, salvo que esta probabilidad podría considerarse relativamente inferior a la categoría riesgo medio y esta a su vez de la categoría riesgo alto.

En la tabla 5.26 se relacionan las categorías del riesgo con los puntos de exposición al N-NO₃⁻ considerado por receptores infantiles con base en los resultados del presente estudio. En la tabla 5.27 se relacionan las categorías del riesgo con los puntos de exposición al N-NO₃⁻ obtenidos en bibliografía. Comparando ambas tablas se evidencia el incremento del riesgo en los muestreos recientes.

Tabla 5.26. Categorización del riesgo para cada punto de exposición al N-NO₃⁻ identificado en los resultados de los trabajos de campo realizados en el marco del PRONAI 318998 utilizando como criterio el riesgo potencial de que se produzca metahemoglobina infantil.

Municipio	Identificador	Riesgo Potencial (exposición a N-NO ₃ ⁻)	Observaciones
Atitalaquia	MZ-106	medio	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-108	bajo	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-111	medio	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-316	bajo	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-312	bajo	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-326	bajo	supera la NOM-127-2021
Tezontepec de Aldama	MZ-60	medio	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	CN-2	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-161	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-225	medio	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-39	medio	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-68	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-80	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-82	bajo	supera la NOM-127-2021

Tabla 5.27. Categorización del riesgo por exposición al $N-NO_3^-$ identificado en la literatura utilizando como criterio el riesgo potencial de que se produzca metahemoglobina infantil PRONAH 318998.

Municipio	Identificador	Riesgo Potencial (exposición a $N-NO_3^-$)	Observaciones
Atitalaquia	MZ-100	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-111	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-106	medio	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-114	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-378	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-79	sin riesgo	
Atotonilco de Tula	MZ-326	bajo	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-328	sin riesgo	
Atotonilco de Tula	MZ-92	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-36	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-38	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-427	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-430	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-453	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-64	medio	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-80	sin riesgo	

En la Fig. 5.35 se agrega la variable espacial a la categorización del riesgo no cancerígeno del $N-NO_3^-$ y se adicionan los puntos de exposición resultantes de la bibliografía, además de aquellos puntos de muestreo donde no se determinó la existencia de CC.

Observando el mapa se aprecia que los niveles de riesgo medio, que es la categoría más alta que se alcanza por exposición al $N-NO_3^-$, considerando a los infantes para ello, se obtienen en zonas de distritos de riego e intensa agricultura.

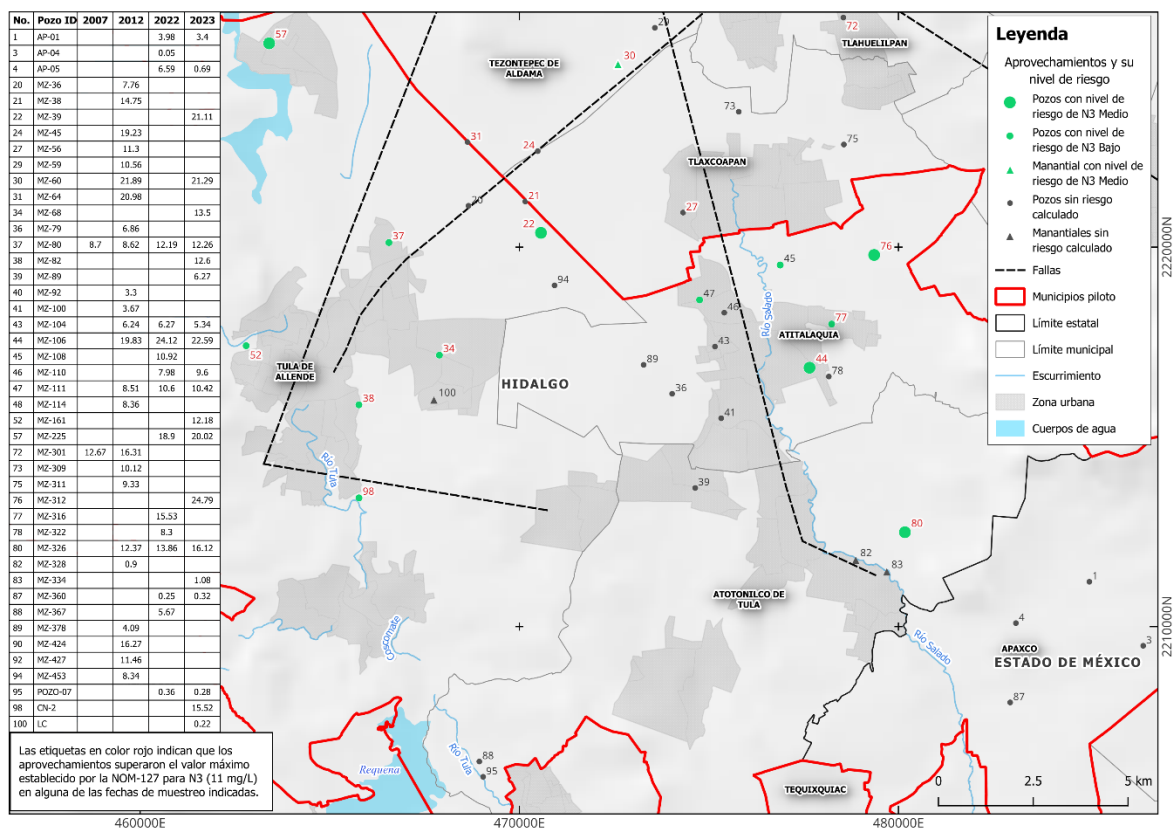


Figura 5.35 Mapa de categorización del riesgo por exposición a $N-NO_3^-$.

En la tabla 5.28 se relacionan las categorías del riesgo con los puntos de exposición a los F^- , considerado por receptores infantiles con base en los resultados de esta investigación. De los valores de esta tabla se tiene que todas las DEE *niños* superan 0.05 mg/kg-día que el Instituto de Medicina de Estados Unidos recomienda para niños. En la tabla 5.29 se presenta la misma información, pero considerando los datos de la bibliografía.

De comparar ambas tablas se tiene que existen puntos muestreados en campañas anteriores que exceden los niveles establecidos por la NOM-127-2021 y la EMEG. Respecto a este CC se observa que la categoría dada al riesgo potencial en algunos puntos de exposición puede variar en el tiempo y está muy presente en toda el área de estudio.

Tabla 5.28 Categorización del riesgo potencial en cada PE a F- identificado en los resultados de los trabajos realizados en el marco del PRONAI utilizando como criterio fluorosis dental en niños.

Municipio	Identificador	Riesgo Potencial (exposición a F ⁻)	Observaciones
Apaxco	AP-01	bajo	
Apaxco	MZ-360	bajo	
Atitalaquia	MZ-104	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-106	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Atitalaquia	MZ-108	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Atitalaquia	MZ-110	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-111	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-316	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Atotonilco de Tula	MZ-322	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Atotonilco de Tula	MZ-326	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Atotonilco de Tula	MZ-89	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Atotonilco de Tula	Pozo 7	alto	supera la NOM-127-2021
Tezontepec de Aldama	MZ-60	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Tula de Allende	CN-2	alto	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-161	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Tula de Allende	MZ-162	bajo	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-225	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Tula de Allende	MZ-68	alto	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-80	medio	< NOM-127 pero la DEE niños >NOAEL
Tula de Allende	MZ-82	alto	supera la NOM-127-2021

Tabla 5.29 Categorización del riesgo potencial al F⁻ identificado en la literatura.

Municipio	Identificador	Riesgo Potencial (exposición a F ⁻)	Observaciones
Apaxco	MZ-347	medio	
Apaxco	MZ-357	medio	
Apaxco	MZ-360	medio	
Atitalaquia	MZ-100	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-103	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-104	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-106	medio	
Atitalaquia	MZ-111	alto	supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-378	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-79	alto	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-118	alto	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-326	alto	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-327	alto	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-328	alto	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-367	medio	
Atotonilco de Tula	MZ-441	alto	supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-92	sin riesgo	
Atotonilco de Tula	MZ-323	alto	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-36	medio	
Tula de Allende	MZ-38	medio	
Tula de Allende	MZ-427	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-430	medio	
Tula de Allende	MZ-44	medio	
Tula de Allende	MZ-453	medio	
Tula de Allende	MZ-46	medio	
Tula de Allende	MZ-52	medio	
Tula de Allende	MZ-64	bajo	
Tula de Allende	MZ-65	medio	
Tula de Allende	MZ-76	alto	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-80	alto	supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-82	alto	supera la NOM-127-2021

En la Fig. 5.36 se agrega la variable espacial a la categorización del riesgo no cancerígeno del F^- y se adicionan los puntos de exposición resultantes de la bibliografía además de aquellos puntos de muestreo donde no se determinó la existencia de CC. En este mapa se observa que las categorías de riesgo son independientes a las de un pozo vecino o en la misma localidad, por lo que resulta indispensable el muestreo en cada pozo. Además, se observa la amplia distribución espacial de este CC y el riesgo potencial que implica su exposición en niños de presentar fluorosis dental.

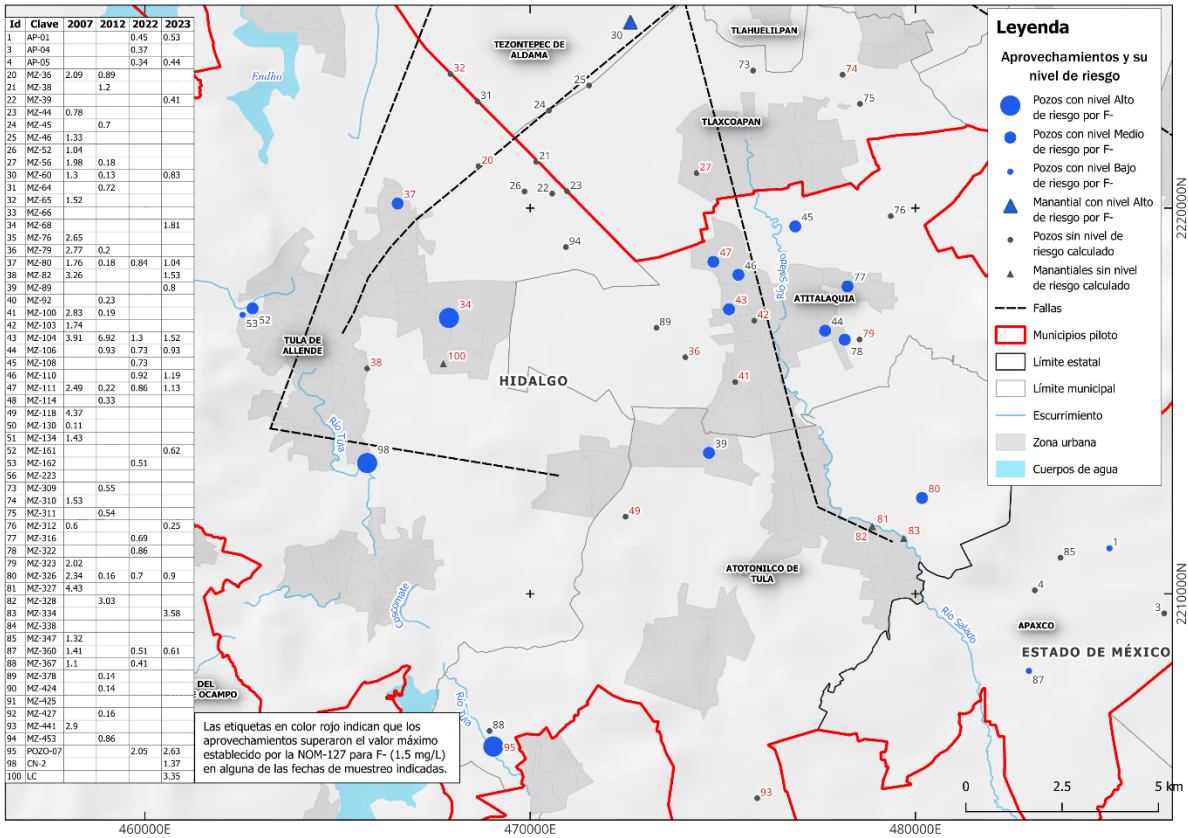


Figura 5.36. Mapa de categorización del riesgo por exposición a F^- .

En la tabla 5.30 se relacionan las categorías del riesgo con los puntos de exposición al As para el presente estudio, considerado para adultos y los niños. Se tuvo en cuenta el criterio el riesgo potencial de desarrollar cáncer que resulta el más sensible y también la probabilidad de manifestar necrosis celular, hiperpigmentación y complicaciones vasculares. En la tabla 5.31 se resumen las categorías del riesgo en los puntos de exposición al As determinados en la bibliografía.

Tabla 5.30 Categorización del riesgo potencial por exposición al As identificado en los resultados de los trabajos realizados en el marco del PRONAI utilizando como criterio desarrollar cáncer.

Municipio	Identificador	Riesgo Potencial (exposición al As)	Observaciones
Apaxco	AP-02	bajo	
Apaxco	AP-04	medio	Supera la NOM-127
Apaxco	MZ-360	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atitalaquia	MZ-104	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atitalaquia	MZ-106	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atitalaquia	MZ-108	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atitalaquia	MZ-110	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atitalaquia	MZ-111	medio	Supera la NOM-127
Atotonilco de Tula	MZ-322	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atotonilco de Tula	MZ-326	alto	Supera la NOM-127 ^a
Atotonilco de Tula	MZ-89	medio	Supera la NOM-127
Atotonilco de Tula	Pozo - 07	alto	Supera la NOM-127 ^a
Tezontepec de Aldama	MZ-60	medio	Supera la NOM-127
Tula de Allende	CN-2	alto	Supera la NOM-127 ^a
Tula de Allende	MZ-39	medio	Supera la NOM-127
Tula de Allende	MZ-68	alto	Supera la NOM-127 ^a
Tula de Allende	MZ-80	alto	Supera la NOM-127 ^a
Tula de Allende	MZ-82	alto	Supera la NOM-127 ^a

^a Concentraciones asociadas con problemas renales, cardiovasculares, epidérmicos, hematológicos y respiratorios.

Tabla 5.31 Categorización del riesgo por exposición al As identificado en la literatura.

Municipio	Identificador	Riesgo Potencial (exposición al As)	Observaciones
Apaxco	MZ-347	sin riesgo	
Apaxco	MZ-357	sin riesgo	
Apaxco	MZ-360	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-100	alto	Supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-103	sin riesgo	
Atitalaquia	MZ-104	alto	Supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-106	alto	Supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-111	alto	Supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-114	alto	Supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-378	alto	Supera la NOM-127-2021
Atitalaquia	MZ-79	medio	Supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-118	alto	Supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-326	alto	Supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-327	alto	Supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-328	alto	Supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-367	sin riesgo	
Atotonilco de Tula	MZ-441	sin riesgo	
Atotonilco de Tula	MZ-92	medio	Supera la NOM-127-2021
Atotonilco de Tula	MZ-323	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-36	alto	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-38	alto	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-427	bajo	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-430	medio	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-44	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-453	medio	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-46	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-52	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-64	medio	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-65	sin riesgo	
Tula de Allende	MZ-76	medio	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-82	alto	Supera la NOM-127-2021
Tula de Allende	MZ-80	alto	Supera la NOM-127-2021

De la comparación de ambas tablas se tiene que el riesgo potencial de desarrollar cáncer o algún efecto cardiovascular como consecuencia de beber el agua de uso doméstico no ha sido asumible, ya que este criterio se ha mantenido constante a través de los años de muestreos desarrollados en el área de estudio. Es también el CC con mayor riesgo potencial.

La variable espacial de la categorización del riesgo no cancerígeno del As se presenta la Fig.5.37. Se ubicaron también los puntos de exposición resultantes de la bibliografía además de aquellos puntos de muestreo donde no se determinó la existencia de CC. De esta figura se aprecia que espacialmente es el CC con mayor categoría de riesgo potencial, siendo más los puntos que presentan riesgo que los que no. Al igual que en el caso del F-, la categoría del riesgo no se puede asociar a una localidad o pozo vecino, por lo que resulta imprescindible el muestreo en cada captación para su evaluación y tratamiento.

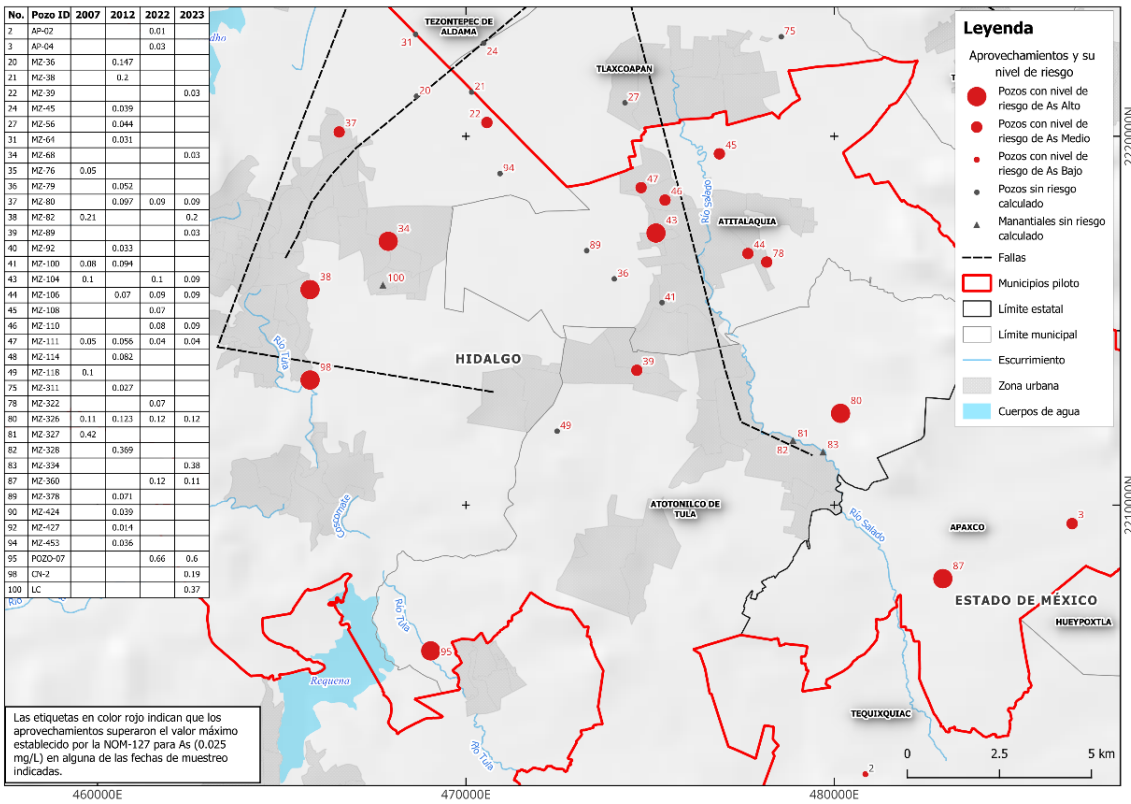
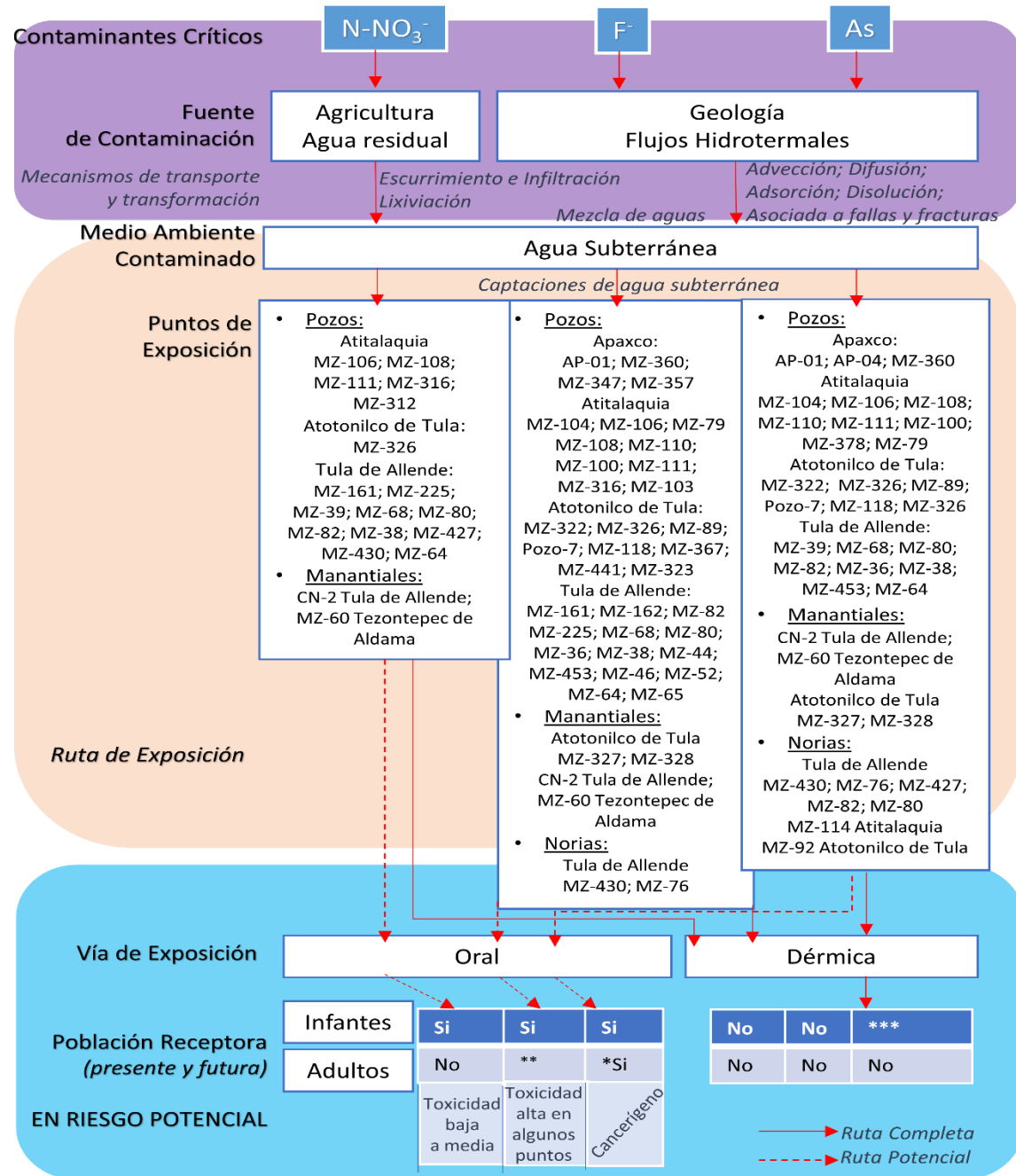


Figura 5.37 Mapa de categorización del riesgo por exposición a As.

Basado en la recopilación e interpretación de la información analizada se confecciona el MCR de forma esquemática (Fig. 5.38). Es importante resaltar que este corresponde una primera aproximación al riesgo potencial a la salud humana por el consumo de los CC. Está

confeccionado solamente para el Escenario I por no identificarse ningún riesgo en el Escenario II. De igual forma no se contempla la vía inhalatoria por descartarse para ambos escenarios dadas las características fisicoquímicas de los CC y las del área de estudio.



*Salvo en el AP-01 de Apaxco

**No se determinó riesgo para adultos con las concentraciones medidas y el riesgo se estimó para datos bibliográficos a partir de lo calculado en esta investigación, por lo que se recomienda estimar las DEE de adultos en MZ-82, MZ-104, MZ-118 y MZ-327 que son más de dos veces mayor a lo permitido en la NOM-127 para asegurar que no existe riesgo para receptores adultos.

***Se estimó riesgo por esta vía para infantes en el Pozo-7, pero este cuenta con su propia planta de tratamiento, es necesario asegurar el correcto funcionamiento de esta.

Figura 5.38. Modelo Conceptual del Riesgo (esquemático)

5.7 Medidas para la gestión y mitigación del riesgo.

En esta sección se abordan las medidas recomendadas para gestionar y mitigar el riesgo asociado a la presencia de los CC en el agua. Se examinaron tanto los tratamientos recomendados para eliminar los contaminantes químicos, según las directrices de la WHO, como las medidas preventivas que pueden adoptar tanto la población como los organismos encargados de la extracción de agua subterránea.

- *Tratamientos recomendados para la mitigación del riesgo potencial:*

La WHO recomienda para abordar la problemática de los N-NO_3^- , proteger la fuente de agua de la contaminación. Debido a las características del área de estudio esta opción resulta difícil de ejecutar, por lo que, aunque es difícil de eliminar, se sugiere la desinfección. Este proceso permitirá que el agua sea apta para consumo humano y reducirá el riesgo de infección gastrointestinal, que es un factor de riesgo para la metahemoglobinemia. Las resinas aniónicas tienen afinidad por los N-NO_3^- y pueden concentrarlos para su posterior tratamiento, otras técnicas de separación efectivas son el intercambio iónico, ósmosis inversa o electrodiálisis. Estos métodos de tratamiento pueden ser muy costosos y requieren un cuidadoso mantenimiento. Los filtros de carbono u otros filtros mecánicos y los ablandadores estándar de agua no lo eliminan.

Según la WHO, hay tecnologías comerciales disponibles para tratar el agua y eliminar contaminantes químicos en pequeña escala. Por ejemplo, el intercambio de aniones utilizando alúmina activada o productos libres de hierro pueden reducir eficazmente las concentraciones excesivas F^- . Además, el carbón ha sido utilizado eficazmente para reducir los niveles de este contaminante en el agua. Otras técnicas utilizadas son los filtros de ósmosis inversa y zeolitas. Otros tratamientos efectivos son la Alúmina Activada (en 10 min puede eliminar aproximadamente el 42% del F^- en agua) y el óxido de magnesio. Sin embargo, el uso doméstico de estos puede ser limitado debido a la necesidad de ajustar el pH y la posibilidad de que el agua tratada absorba Al de la solución de alúmina.

La WHO también sugiere que el As puede ser tratado utilizando procesos de intercambio de aniones similares a los utilizados para el F^- . Actualmente existe un creciente interés en el uso de tecnologías de electrocoagulación para tratar aguas subterráneas y obtener una fuente confiable de agua potable. Este procedimiento es óptimo en la remoción de F^- y As.

Tecnologías difundidas para tratar las aguas arsenicales, aunque quizás más caras o complicadas de emplear domésticamente, son: coagulación/filtración, ósmosis inversa y adsorción.

- *Medidas preventivas que puede adoptar la población para la gestión/mitigación del riesgo potencial:*

Las recomendaciones que se dan a continuación se basan en las sugerencias de organismos como la WHO, la Rama de Investigaciones de Salud Ambiental del Departamento de Servicios de Salud de California, la División de Salud Pública y los Servicios de Agua Potable del condado de Oregón en los EE. UU. Todas disponibles en sus páginas web oficiales.

Como medidas preventivas que puede tomar la población frente a los niveles de exposición a NO_3^- identificados se recomienda no ingerir directamente por bebés, niños menores de tres años o mujeres que estén o puedan estar embarazadas. No es seguro para el cepillo de dientes de niños menores de tres años. Supervisar a los niños para evitar que ingieran agua mientras se bañan, cepillan los dientes u otra actividad. Tener en cuenta que la incidencia de efectos negativos a la salud por este CC es mayor en niños menores de 6 meses y cuando se asocia a contaminación bacteriológica, por lo que es recomendable hervir el agua. La WHO recomienda hervir solo hasta alcanzar la ebullición para evitar que se concentren los niveles de N-NO_3^- .

El agua con solo este CC resulta segura para consumir a corto plazo (por menos de un año) por personas de ambos sexos mayores a tres años (excepto mujeres embarazadas). Es segura para otros usos domésticos como por ejemplo bañarse, lavar y regar el jardín. Debido a su origen antropogénico, de no tomarse medidas para controlar la contaminación, la tendencia de este contaminante será al incremento. Se recomienda hacer análisis al menos una vez cada año.

Respecto al F^- , se recomienda no ingerir el agua directamente por niños menores de 12 años o mujeres que estén o puedan estar embarazadas en aquellos pozos que presentaron un riesgo potencial alto. Para la comunidad que se abastece de los pozos categorizados como riesgo moderado y alto, cuyas concentraciones exceden los 0.7mg/L, se recomienda no consumir sal fluorada y disminuir la exposición a los alimentos que contienen este

compuesto como.

Para el caso del As, en el pozo AP-02 se recomienda examinar el agua una vez cada año para asegurarse que no hayan aumentado sus concentraciones y no emplear directamente para beber sin tratar. En el resto de los puntos de exposición se recomienda no beber, cocinar, mezclar con bebidas, lavar frutas ni verduras ni dar de beber a las mascotas. Se considera apta para otras actividades domésticas como lavar o limpiar. En el caso específico de los pozos MZ-360, MZ-104, MZ-326, CN-2, MZ-68 y MZ-82 tampoco se recomienda su empleo para regar jardines a largo plazo, esto con el propósito de evitar su acumulación en el suelo.

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se sintetizan los hallazgos más significativos obtenidos a lo largo de la investigación sobre el riesgo potencial a la salud por agua subterránea en la región sur del Valle del Mezquital, Hidalgo. Se presentan las conclusiones clave derivadas del análisis de los datos recolectados y las metodologías aplicadas, así como las recomendaciones prácticas y estratégicas dirigidas a mitigar los riesgos identificados. Este cierre busca no solo reafirmar la importancia de los resultados obtenidos, sino también ofrecer una guía para futuras investigaciones y acciones concretas en el ámbito de la gestión del recurso hídrico y la protección de la salud pública.

6.1 Conclusiones

El presente estudio parte de la recopilación de datos, lo cual proporcionó una sólida base de datos geoespaciales, las características hidrodinámicas y de calidad del agua, así como los umbrales toxicológicos necesarios para la estimación del riesgo. Se recopilaron un total de 28 puntos muestreados de la bibliografía con laboratorios certificados y se realizaron dos campañas de muestreo en los años 2022 y 2023 en el marco del PRONAI en que se desarrolla la presente investigación, también en laboratorio certificado por la EMA en un total de 30 puntos de captación de agua subterránea. Los datos recopilados y muestreados incluyen parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de puntos de muestreo distribuidos en los municipios estudiados, con diversas aplicaciones, desde abastecimiento público hasta recreativo e industrial.

Sobre las características hidrodinámicas del acuífero se confeccionó el Modelo Hidrogeológico preliminar. El modelo representa tanto la recarga lateral (entrada por flujo subterráneo) como la recarga vertical, atribuida a diversas fuentes según CONAGUA (2015). Se destaca la contribución del río Salado al acuífero en algunas temporadas. Se asumen tres unidades hidroestratigráficas que muestran la presencia de acuíferos libres superiores e inferiores, así como una unidad parcialmente confinada, con detalles sobre su composición y espesor. Se evidencia la influencia de las estructuras geológicas en el flujo hidrotermal y la emergencia de manantiales. Este modelo, además de ajustarse a investigaciones previas en la región, coincide con descripciones de áreas termales cercanas y acuíferos asociados a la Franja Volcánica Trans-mexicana. La dirección preferencial del flujo subterráneo se relaciona con el relieve y los escurrimientos superficiales.

Los datos bibliográficos revelan la predominancia de aguas sódico-bicarbonatadas y mixtas en pozos abastecidos principalmente de la segunda unidad hidroestratigráfica (basaltos). El análisis de esta investigación clasifica las aguas muestreadas en bicarbonatadas, mixtas y sódicas-magnésicas. Se observa una relación entre las aguas sulfatadas y la presencia de As y F⁻, asociadas a procesos hidrotermales y flujos profundos a través de fallas producto a su correlación positiva con la temperatura.

Por otro lado, las aguas bicarbonatadas y magnésicas corresponden a áreas de recarga, con menores concentraciones de contaminantes. Los resultados de las campañas de muestreo

revelan que los parámetros: pH, STD, SO_4^{2-} , N-NO_3^- , F^- y As incumplen los límites permisibles establecidos por la NOM-127-2021. El Modelo Hidrogeológico Conceptual definitivo fue confeccionado a partir de la integración de las propiedades hidrogeoquímicas e hidrodinámicas del acuífero y asume el origen geogénico del As y el F^- y un origen antropogénico para el N-NO_3^- asociado a la agricultura y las aguas residuales.

La estimación del riesgo potencial que estos contaminantes tóxicos a la salud humana representan se realizó en base a la metodología que propone la US.EPA. Se determinó que existe un riesgo potencial no asumible para infantes por la exposición al F^- , N-NO_3^- y As por vía oral en el agua de uso doméstico. Igualmente se determinó un riesgo potencial para adultos producto a la exposición al As por la vía oral. Se descartó la probabilidad de ocurrencia de un efecto adverso en la salud humana por las vías inhalatorias, dérmicas y por contacto ocular tanto en balnearios recreativos como en el uso doméstico del agua subterránea.

Para llegar a conclusiones más acertadas sobre este tema se hizo un análisis y consideró la incertidumbre y variabilidad en los datos. Se realizaron recomendaciones específicas para la mitigación y protección de la salud y se confeccionó el MCR como una herramienta para este fin.

La comparación entre el método estocástico y el probabilístico, mediante el uso de la simulación de Monte Carlo, ha permitido una mejor caracterización de la variabilidad y la incertidumbre inherentes a los parámetros de entrada y a los modelos utilizados. El método probabilístico ha demostrado ser más eficaz al ofrecer una representación más realista y detallada de los posibles escenarios de riesgo, frente al enfoque determinístico que presenta limitaciones significativas. La validación del modelo probabilístico con los resultados determinísticos ha reforzado la confianza en los hallazgos y ha subrayado la importancia de incorporar análisis de sensibilidad y variabilidad para mejorar la precisión y la aplicabilidad de las evaluaciones de riesgo en la protección de la salud pública.

La integración del modelo conceptual hidrogeológico con el modelo de riesgo ha demostrado ser una herramienta esencial para comprender y gestionar los riesgos asociados al consumo de agua subterránea en la región sur del VM, Hidalgo. El modelo hidrogeológico proporciona una representación detallada del funcionamiento del acuífero, incluyendo las rutas de flujo,

las fuentes de recarga y las características hidroquímicas que influyen en la calidad del agua. Esta información es crucial para identificar las fuentes y los mecanismos de transporte de contaminantes, permitiendo así una evaluación más precisa del riesgo a la salud humana. Al vincular ambos modelos, se logra una visión holística que no solo identifica los puntos críticos de exposición, sino que también facilita el diseño de estrategias de mitigación efectivas.

6.2 Recomendaciones

Basándonos en los hallazgos de la investigación, sería prudente tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Para aprovechar el acuífero del VM como fuente de agua para el Valle de México, aunque se conoce la disponibilidad positiva, se requiere aplicar un tratamiento avanzado para disminuir las concentraciones de los contaminantes químicos que, se sugiere probar en una fase piloto.
2. Para reducir el riesgo de contaminación, se sugiere llevar a cabo un tratamiento de aguas residuales antes de utilizarlas en la agricultura, gestionar adecuadamente el riego con técnicas de baja velocidad y/o de flujo superficial, y garantizar la construcción y protección adecuada de las fuentes de suministro.
3. Evaluar y controlar si la Planta de Tratamiento de Aguas residuales de Atotonilco realmente está teniendo un efecto positivo en el tratamiento de las aguas residuales.
4. Realizar el análisis de riesgo considerando estratos de edad más vulnerables como los ancianos, los niños en edad escolar para el F^- y los infantes de 0 a 6 meses para el $N-NO_3^-$. Se recomienda emplear los valores en la bibliografía que pueden llegar a ser mucho mayores que la NOM-127-2021 y los medidos durante los análisis desarrollados en este trabajo en el marco del PRONAI 318998.
5. Realizar una evaluación sobre los efectos en el organismo por la exposición fundamentalmente por la vía oral a la mezcla de estos contaminantes químicos en el agua doméstica.

6. Evaluar el riesgo a la salud humana por la presencia del B en el agua de uso y consumo humano.
7. Con el objetivo de alcanzar un mayor nivel de certeza en la estimación del riesgo, es necesario aplicar más encuestas y observaciones respecto a variables como la ingesta y factores de exposición con el fin de disminuir el nivel de incertidumbre en variables conductuales.
8. Se recomienda tener en cuenta los resultados de esta investigación en caso de necesitar priorizar o jerarquizar variables analizadas para la incertidumbre o áreas de mayor urgencia en la implementación de medidas y tratamientos.
9. Tener en cuenta los tratamientos y medidas de gestión recomendados en esta investigación.
10. Continuar desarrollando modelos integrados que aborden tanto los aspectos hidrogeológicos como los de riesgo para proteger adecuadamente la salud pública y gestionar de manera sostenible los recursos hídricos subterráneos

XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lara Figueroa, H. N., & García Salazar, E. M. (Marzo de 2020).** *Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital*. Obtenido de Entreciencias 7(21): 91-106: <http://revistas.unam.mx/index.php/entreciencias>
- Aguilar, I. L. (Mayo de 2015).** Tesina en opción del título de Especialista en Hidráulica. *El Valle del Mezquital como fuente sustentable de agua potable para futuras generaciones del Valle de México*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Aguilar-Duarte, Y. B. (2016).** IVAKY: índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 913-933.
- Albert, L. A. (1985).** *Curso Básico de Toxicología Ambiental*. ISBN 92 75 37006 0: Organización Mundial de la Salud (WHO), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Centro Panamericano de ecología humana y salud.
- Alemán, E. J. (2020).** Modelo conceptual de flujo de agua subterránea en la Subcuenca II, Cuenca Sur del Lago de Managua. *Facultad De Ciencias E Ingeniería Departamento De Tecnología Ingeniería Geológica*, 185.
- Ángeles, S. G., & Silva de la Rosa, B. F. (1999).** *Aplicación de un modelo hidrogeoquímico en el Valle del Mezquital, Hidalgo*. Obtenido de <http://docencia.uaeh.edu.mx: http://docencia.uaeh.edu.mx/estudios-pertinencia/docs/hidalgo-municipios/Valle-Del-Mezquital-Aplicacion-Modelo-Hidrogeoquimico.pdf>
- Aranda, D. F. (1984).** Procesos del ciclo hidrológico. . *UASLP*.
- Arenal, R. d. (1985).** Estudio hidro-geoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Univ.Nal.Autón.México, Inst.Geología, vol. 6, núm 1*, 86-97.
- Arenal, R. d. (1985).** Estudio hidro-geoquímico de la porción centro-oriental del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Univ.Nal.Autón.México.Inst.Geología, vol.6*, 86-97.

- Arreguín Cortés, F., Chávez Guillén, R., & Sot, P. (2006).** *Una revisión de la presencia de arsénico en el agua subterránea en México.* México: Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Insurgentes Sur 2416, México DF 04340.
- Auge, M. (2007).** Vulnerabilidad de acuíferos. *SEGEMAR. servicio Geológico Minero Argentino.*, 40.
- Autoridad de Salud de Oregón:** *Contaminantes químicos en el agua: Efectos de los contaminantes en la salud: Estado de Oregón.* (s. f.). Recuperado 1 de enero de 2024, de <https://www.oregon.gov/oha/ph/healthyenvironments/drinkingwater/monitoring/healtheffects/pages/index.aspx>
- Autoridad de Salud de Oregón:** *Página no encontrada: Estado de Oregón.* (s. f.). Recuperado 1 de enero de 2024, de <https://www.oregon.gov/oha/Pages/PageNotFoundError.aspx?requestUrl=https://www.oregon.gov/oha/pages/404.aspx>
- Barriga, D. (1999).** *Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en Sitios Contaminados.* . Obtenido de Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.: OPS/CEPIS/PUB/99.34. WHO. Perú. 96 pp.
- Bautista, D. Y. (2021).** *Análisis espacial para la gestión de concesiones de aguas superficiales en la provincia de Bélez, Santander, Colombia.* Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Belmonte Jimenez, S. I. (julio de 2003).** *Repositorio Institucional de Literatura del IPN-CIIDIR Unidad Oaxaca* . Obtenido de Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etla, Oaxaca, México: http://literatura.ciidiroaxaca.ipn.mx:8080/xmlui/handle/LITER_CIIDIROAX/480
- Belmonte Jimenez, S. I.-E.-B. (2003).** Determinación de la vulnerabilidad del acuífero del Valle de Etla, Oaxaca, México. *Revista Geofísica* 59, 14.
- BGS-CNA.** (Final Report- November 1998 British Geological Survey (BGS), Comisión Nacional del Agua (CNA), London School of Hygiene and Tropical Medicine /

Instituto Nacional de Nutrición y Universidad Autónoma de México). *Effects of Watew a ter reuse on groundwater in the Mezquital Valley*. México: Departament fot International Development.

BMS. (19 de marzo de 2020). *the World Banck Group*. Obtenido de Aguas residuales. De residuo a recurso: <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/publication/wastewater-initiative>

Caballé, R. F. (Enero de 2022). Parametrización de un modelo semiempírico de flujo y de transporte para suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Tesis en opción del grado de: Máster en Ciencias de la Tierra*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Camacho Navarro , V. M., & Pérez Ca, C. (2018). *Diagnóstico y propuestas de manejo para la recuperación ambiental del valle del Mezquital*".

Casella, G., & Berger, R. (2002). *Statistical Inference*".

Celestino, A. E., Ramos Leal, J. A., Martínez Cruz, D. A., Tuxpan Vargas, J., De Lara Bashulto, J., & Morán Ramírez, J. (16 August 2019). Identification of the Hydrogeochemical Processes and Assessment of Groundwater Quality, Using Multivariate Statistical Approaches and Water Quality Index in a Wastewater Irrigated Region. *Water*, doi:10.3390/w11081702.

CEPIS/OPS, Curso de autoinstrucción «Metodología de Identificación y Evaluación de Riesgos para la Salud en sitios Contaminados». (s. f.). Recuperado 17 de febrero de 2024, de https://cidta.usal.es/riesgos/CD1/sitios_contaminados/www.cepis.ops-oms.org/tutorial3/e/capitulo2/index.html

Cervantes Medel, A., & Armienta, M. A. (February 2, 2004). Influence of faulting on groundwater quality in Valle del. *Geofísica Intemacional*, 477-493.

Chávez, A., Maya, C., Gibson, R., & Jiménez, B. (2011). The removal of microorganisms and organic micropollutants from wastewater during infiltration to aquifers after irrigation of farmland in the Tula Valley, Mexico. *Environmental Pollution*, v. 159, p. 1354-1362.

- Chávez., I. R. (2017).** Contribución De La Hidrogeoquímica Y La Hidrodinámica Al Conocimiento De Las Aguas Subterráneas Del Yacimiento San Vicente, Cuba Occidental. *Trabajo de diploma presentado en opción al Título de Ingeniero Geólogo, Universidad de Pinar del Rio, Cuba.*
- Cifuentes, E., Blumenthal, Ú., & Ruiz Palacios, G. (1994).** *Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México.* Obtenido de Salud Pública de México.
- Cifuentes, E., Blumenthal, Ú., Ruiz Palacios, G., Bennet, S., & Peasey, A. (1994).** *Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: El Valle del Mezquital, México.* Obtenido de Salud Pública de México.
- CONAGUA. (2007).** *Estadísticas del Agua en México.* México.
- CONAGUA. (2018).** *Atlas de Agua en México.* México.
- CONAGUA. (2018).** *Estadísticas del Agua en México.* México.
- CONAGUA. (2019).** *Gobierno de México.* Obtenido de Registro Público de Derechos de Agua (REPDA): <https://www.gob.mx/conagua/documentos/registro-publico-de-derechos-de-agua-repda-2019>
- CONAGUA. (Diciembre 2020).** *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del Valle del Mezquital (1310), Estado de Hidalgo.* Ciudad de México.
- Contreras, J., Trangucci, R., Felix Arellano , E., & Rodríguez Dozal, S. (2020).** *Modeling Spatial Risk of Diarrheal Disease Associated with Household Proximity to Untreated Wastewater Used for Irrigation in the Mezquital Valley, Mexico* *Untreated Wastewater Used for Irrigation in the Mezquital Valley, Mexico.* Obtenido de Research: <https://doi.org/10.1289/EHP6443>
- Córdova, I. M. (30 de abril de 2016).** *PRONTUBEAM.* Obtenido de Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas : https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26

- Cuevas, E., Pacheco, J., Cabrera, A., Coronado, V., Vázquez, J., Comas, M., ... & Norte, P. (2002).** *Calidad química y bacteriológica del agua subterránea en el principal campo de pozos para el abastecimiento de Mérida, Yucatán, México. Memorias. México, DF, FEMISCA, 2002, 1-10.* (s. f.).
- (2007). Declaración de Brisbane.** Versión española, Comité Nacional Español de Riegos y Drenajes (CERYD), MMA, Madrid - AERYD-CERYD, www.aeryd.es.
- Delfa, D. J. (2007).** *Estudio estadístico de la calidad de las aguas en la cuenca del río Ebro.* Madrid: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. E.T.S De ingenieros Agrónomos. Departamento de Edafología.
- Díaz, J. A. (2018).** *Glosario de términos técnicos en hidrología, sistematización web para Latinoamérica y el Caribe.* . Revista NTHE, 24, 80-83.
- Díaz, J. P., Ortega Escobar, H. M., Ramírez Ayala, C., Flores Magdaleno, H., Sánchez Bernal, E. I., Can Chulim, Á., & Mancilla Villa, Ó. R. (2018).** Concentración de nitrato, fosfato y boro en el agua residual para la irrigación de cultivos en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Sección: Ciencias Naturales e Ingenierías*, DOI: doi.org/10.21640/ns.v10i21.1478.
- DOF. (15/09/2016).** *ACUERDO por el que se da a conocer el resultado de los estudios técnicos de las aguas nacionales subterráneas del acuífero Valle del Mezquital, clave 1310, en el Estado de Hidalgo, Región Hidrológico-Administrativa Aguas del Valle de México.* Estados Unidos Mexicanos.
- Downs, T. J., Cinfuentes Garcia, E., & Suffet, I. M. (July 1999).** Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region. *Environmental Health Perspective vol.107, number 7*, 553-561.
- Eastman, J. R. (2012).** *IDRISI Selva. Guía para SIG y procesamiento de imágenes.* Worcester, Massachusetts, Estados Unidos: Clark Labs, Clark University.
- EcuRed contributors. (7 de julio de 2019).** *Juan Reyneiro Fagundo.* Obtenido de EcuRed: https://www.ecured.cu/index.php?title=Juan_reyneiro_fagundo&oldid=3446099.

- EPA. (2004).** Obtenido de Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I-Human Health Evaluation Manual. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, EEUU.: www.epa.gov/superfund/index.htm.
- Espirú, A. H., Arango Galván, C., Reyes Pimentel, A., Martínez Santos, P., Pita de la Paz, C., Macías Medrano, S., . . . Breña Naranjo, J. A. (2017).** Water Supply Source Evaluation in Unmanaged Aquifer Recharge Zones: The Mezquital Valley (Mexico) Case Study. *Water*, www.mdpi.com/journal/water.
- Esteller, M. V.-D. (2002).** Uso de sistemas de información geográfica (SIG) para la determinación de parámetros utilizados en la construcción de mapas de vulnerabilidad de acuíferos. . *Hidrogeología*, 2.
- Expósito Castillo, J., & Esteller Alberich, M. (2023).** *Informe de la etapa I del pronaii318998 de agentes tóxicos y procesos contaminantes "Evaluación del riesgo para la salud humana por agentes tóxicos de origen antrópico como herramienta de empoderamiento social"*. Toluca, Estado de México.
- Exposure Factors Handbook—Front Matter. (2011).***
- Fagundo-Castillo, J. R.-M.-R.-H. (recuperado en 21 de noviembre de 2022 de** [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000300005&lng=es&tlng=es)). *Caracterización de los flujos de agua subterránea a partir de su salinidad*. Obtenido de Tecnología y ciencias del agua: [script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000300005&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000300005&lng=es&tlng=es).
- Fluence. (02 de 09 de 2020).** *Fluence*. Obtenido de Israel lidera a nivel mundial el reciclaje de aguas residuales: www.fluencecorp.com
- Fluence. (2 de septiembre de 2020).** *Fluence Corp*. Obtenido de Israel lidera a nivel mundial el reciclaje de aguas residuales.: www.fluencecorp.com
- Franco Plata, R. (01 de febrero de 2002).** *Repositorio Institucional UAEMex*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://hdl.handle.net/20.500.11799/94855>
- Gainza, B. V. (2019).** Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero cársico Vento, La Habana, Cuba. *Infomin*, Vol. 11, 14.

- Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campoy, E., Calderón, A., Sainz M.G., Bonilla, P., Escolero, O. (1999).** *The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico: Water Science and Technology*. Obtenido de 40(2), 45-52
- García-Salazar. (2019).** El agua residual como generadora del espacio de la actividad agrícola en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional Volumen 29, Número 54*, Revista Electrónica. ISSN: 2395-9169.
- Garfias, J. F. (2002).** Análisis de la vulnerabilidad intrínseca y su adecuación mediante un modelo de flujo con trazado de partículas para evaluar la vulnerabilidad del acuífero del curso alto del río Lerma, estado de México. . *Hidrogeología*, 2.
- Garrido, E. A. (2009).** Manual de métodos de estudio y cuantificación de estudios hídricos en humedales. *Proyecto final de carrera. Universidad Politécnica De Cartagena*, 94.
- Guidelines for Exposure Assessment. (s. f.).***
- Guiding Principles for Monte Carlo Analysis. (s. f.).***
- Gormley, A., Pollard, S., & Rocks, S. (2011).** *Directrices para la Evaluación y Gestión del Riesgo Ambiental*. Reino Unido: Universidad de Franfield.
- Graniel, J. J.-R.-A. (2008).** Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Reserch Gate*, 18.
- Guédron, S., Duwig, C., Prado, B. L., Point, D., Giovana Flores, M., & Siebe, C. (July 2014).** (Methyl)Mercury, Arsenic, and Lead Contamination of the World's Largest Wastewater Irrigation System: the Mezquital Valley (Hidalgo State—Mexico). *Water Air Soil Pollut*, DOI 10.1007/s11270-014-2045-3.
- Guerrero, D. M. (s.f.). Conacyt.** Obtenido de Investigador del Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, Universidad Nacional Autónoma de México.: <https://conacyt.mx/sistemas-gravitacionales-de-flujo-de-agua-subterranea-un-paradigma/>

- Guevara, J. A. (2017).** Esquema metodológico para el diseño e implementación de un Sistema de Información Geográfico. *Geographicalia*(29), 21-32. Recuperado el 15 de 8 de 2022, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/59789.pdf>
- Hernández Juárez, R. A., Martínez Rivera, L. M., Peñuela-Arévalo, L. A., y Rivera-Reyes, S. (2019).** Gestión del agua subterránea en los acuíferos de la cuenca del río Ayuquila-Armería en Jalisco y Colima, México. *Región y Sociedad*, vol.31, e1093, <https://doi.org/10.22198/rys2019/31/1093>. Obtenido de *Región y Sociedad*.
- Ilizaliturri, C., González-Mille, D., Pelallo, N., Domínguez, G., Mejía-Saavedra, J., Torres Dosal, A., ... Espinosa-Reyes, G. (2009).** Revisión de las metodologías sobre evaluación de riesgos en salud para el estudio de comunidades vulnerables en América Latina. *Interciencia*, 34(10), 710-717., Recuperado en 27 de abril de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009001000008&lng=es&tlng=es.
- Informe de Disponibilidad Media Anual de Agua en el acuífero Valle del Mezquital (1310), Estado de Hidalgo.* (Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle del Mezquital, estado de Hidalgo, p. 42). (2020). CONAGUA.
- Instituto Nacional de Salud Pública. (2022).** Síntesis sobre políticas de salud. *Agua y Salud*. México.
- J. E. Cortés, C. G. (2013).** Análisis técnico y pruebas de potabilización del agua del acuífero del Valle del Mezquital, en diversos municipios del estado de Hidalgo. *Congreso IMTA 2013*, (págs. 27-29).
- Jesse D. Contreras, R. T.-A.-D.-R. (july de 2020).** *Modeling Spatial Risk of Diarrheal Disease Associated with Household Proximity to Untreated Wastewater Used for Irrigation in the Mezquital Valley, Mexico*. Obtenido de Research: <https://doi.org/10.1289/EHP6443>
- Jiménez, B. (2014).** The unintentional and intentional recharge of aquifers in the Tula and the Mexico Valleys: The Megalopolis needs Mega solutions. *Water for the Americas: Challenges and Opportunities*, 156-174.

- Jiménez, B., & Chávez, A. (Mayo de 2015).** ¿El agua del valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de Valle de México? *XII Congreso Nacional 2000 Ciencia y Conciencia Federacion Mexicana de Ingenieria Sanitaria y ciencias Ambientales* (págs. Volume: I: 859-87). Morelia, Michoacan, Mexico: <https://www.researchgate.net/publication/268273469>.
- Jiménez, B., & Chávez, A. (July 2004).** Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: “El Mezquital Valley” case. *Water Science & Technology*, 50(2):269-276.
- José Pérez-Villarreal, J. A.-O.-A. (2018).** Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*, 6.
- Juan Reinero Fagundo Castillo, J. J.-V. (2007).** Patrones Hidrogeoquímicos y Origen de la Composición Química de Aguas Subterráneas de Cuba. *Revista LATinoamericana El Ambiente y las Ciencias.*, 4.
- Karunanidhi, D., Aravinthasamy, P., Subramani, T., & Kumar, M. (2020).** *Human health risks associated with multipath exposure of groundwater nitrate and environmental friendly actions for quality improvement and sustainable management: A case study from Texvalley (Tiruppur region) of India.* Obtenido de Chemosphere: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129083>
- Kruse, E. E. (2013).** *Temas actuales de la hidrología subterránea.* Argentina: edulp, Editorial de la Universidad de La Plata.
- Lara Figueroa, H. N., & García Salazar, E. M. (2019).** Prevalencia de enfermedades asociadas al uso de agua contaminada en el Valle del Mezquital. *Entreciencias*, 91-106.
- Lara Viveros, F. M., Ventura Maza, A., Ehsan, M., Rodriguez Ortega, A., Vargas Monter, J., & Landero Valenzuela, N. (2015).** Contenido de Cd y Pb en suelo y plantas de diferentes cultivos irrigados con aguas residuales en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 31 (2), 127-132.

- Lara, E. L., Simeón, J. C., & Navarro, J. G. (1998).** *Los Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 15 de 8 de 2022, de <http://imsturex.unex.es/muietsig/tema1.pdf>
- Lawless, J. F. (2011).** *Statistical Models and Methods for Lifetime Data* .
- Lesser Carrillo, L. E., González Posadas, D., Arellano Islas, S., & Lesser Illades, J. M. (2011).** Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v.28, núm 3, p. 323-336.
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlknecht, J., Hernandez Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios Piña, H. (2018).** Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 510-521.
- López, I. G. (22 de octubre de 2021).** *ECOScript*. Obtenido de ECOScript: <https://ecoscript.org/terrset-idrisi/>
- Lucio, L. I. (2011).** *Cuadernillo de apoyo para la asignatura de toxicología*. La Paz, Estado de México.
- Lugo-Morin, D. R. (2009).** *El uso de aguas residuales en la agricultura en México*. Bogotá, Colombia.
- M.R.Llamas, E. y. (1983).** *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega S.A.
- Mádl-Szőnyi, J. (2008).** The contribution of József Tóth to modernization of Hungarian. *Article in Central European Geology*, 14.
- Mahlknecht, J., & Mora, A. (2022).** *Management of groundwater resources and pollution prevention*. Obtenido de Environmental Science & Health: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100365>.
- Marín Celestino, A. E., Ramos Leal, J. A., Martínez Cruz, D. A., Tuxpan Vargas, J., De Lara Bashulto, J., & Morán Ramírez, J. (2019).** Identification of the Hydrogeochemical Processes and Assessment of Groundwater Quality, Using

Multivariate Statistical Approaches and Water Quality Index in a Wastewater Irrigated Region. *Water*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w11081702>

Marín, L.E., Steinich, B., Escolero, O., Leal, R.M., Silva, B., Gutiérrez. (1999). *Inorganic water quality monitoring using specific conductance in Mexico: Ground Water Monitoring and Remediation*. Obtenido de 18(1), 156-162.

Márquez Caballé, R. F. (2022). *Parametrización de un modelo semiempírico de flujo y de transporte para suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo, México*. [Maestro en Ciencias de la Tierra]. Universidad Autónoma del Estado de México.

Martínez Martínez, M. E. (2018). *Concentración mineral y de metales pesados en ovinos alimentados con forrajes irrigados con aguas residuales* [Maestro en Ciencias e Innovación Ganadera]. Universidad Autónoma de Chapingo.

Martínez Rodríguez, J. G., Castellanos, Z., Rivera-González, M., Núñez-Hernández, G., & az-Contreras, R. (2012). *Contaminación por nitratos en acuíferos del norte de México y del estado de Guanajuato*.

Martin-Olmedo, P., Carroquino, M. J., Ordóñez-Iriarte, J. M., & Moya, J. (2016). *La Evaluación de Riesgos en Salud. Guía metodológica*.

Martínez, M., & Delgado, P. Y. (1998). Aplicación del método drástico para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Instituto Tecnológico Geominero de España.*, 8.

Massone, H., & Martínez, D. (27 de abril de 2023). *Consideraciones metodológicas acerca del proceso de gestión del impacto y riesgo de contaminación de acuíferos*. Obtenido de Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 7(12), 9-21.: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242008000100002&lng=en&tlng=es.

Mayorga, M. A., Peralta, J. C., & Montoya, B. C. (2009). *Historia y evolución de los Sistemas de Información Geográfica en Costa Rica*. Recuperado el 15 de 8 de 2022, de <http://redalyc.org/pdf/4517/451744817001.pdf>

- Mamat, M., Eziz, M., Wang, L., Subi, X., Wang, N., & Hu, Y. (2023).** Pollution and Ecological Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater in the Ibinur Lake Basin of NW China. *Water*, 15(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/w15234071>
- Maya García, E. E. (2020).** *Movilización de metales pesados en agua intersticial de suelos inundados con agua residual y de pozo en Valle del Mezquital* [Maestra en Ciencias]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Medina, A. G. (2001).** El problema inverso en hidrología subterránea. Aplicaciones. *Boletín Geológico y Minero*, 112, 93-106.
- Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., & García, F. P. (2009).** Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Minitab software. (2022).** *Minitab Statistical Software*. Obtenido de State College, Pensilvania, EE. UU.: <https://www.minitab.com/es-mx/about-us/>
- Moncada Milán, S. (2018).** *Revisión sistemática sobre arsénico en las aguas*. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/31289>
- Montiel Palma, S., Armienta Hernández, M. A., Rodríguez Castillo, R., & Domínguez Mariani, E. (2014).** Identificación de zonas de contaminación por nitratos en el agua subterránea de la zona sur de la Cuenca de México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 149-165.
- Morales-Arredondo, I., Flores-Ocampo, I. Z., Armienta, M. A., Morán-Ramírez, J., Hernández-Hernández, M. A., & Landa-Arreguin, J. F. (2020).** *Identificación de las fuentes de nitratos mediante métodos hidrogeoquímicos e isotópicos en el agua subterránea del Bajío Guanajuatense*. *Geofísica internacional*. 59(3), 169-194.
- Mongil Manso, J. N. (2015).** Nuevo infiltrómetro inundador para test de infiltración económico en terrenos agroforestales y espacios verdes. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 41, 281-290.

- Mook, W. G. (2002).** Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y aplicaciones. En W. G. Mook, *Willem Gerrit Mook* (págs. 315-323). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Guías y Manuales.
- Mora, A., Torres Martínez, J. A., Capparellia, M., Zabala, A., & Mahlknecht, J. (2022).** *Efectos del riego con aguas residuales en la calidad del agua subterránea: una visión general*. Obtenido de CienciaDirecta : www.cienciadirecta.com
- Mora, A., Torres-Martínez, J. A., Capparelli, M., Zabala, A., & Mahlknecht, J. (2022).** *Environmental Science & Health*. Obtenido de Effects of wastewater irrigation on groundwater quality: An overview: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100322>.
- Muñoz, H., Armienta, M. A., & Vera, A. (2004).** Nitrato En El Agua Subterránea Del Valle De Huamantla, Tlaxcala, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(3), 91-97.
- Moure, E., & Palacio, J. (1977).** *Geomorfología y Climatología de México*. Ciudad de México.
- NMX-AA-3-1980. (6 de noviembre de 1992).** *NORMA MEXICANA "AGUAS RESIDUALES.- MUESTREO"*. México.
- NOM 014-SSA1-1993.** (s.f.). *Norma Oficial Mexicana*.
- NOM-127-SSA1-2021.** (2022). *Norma Oficial Mexicana*.
- Norma Oficial Mexicana **NOM-001-SEMARNAT-2021.** (11 de marzo de 2022). *límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación*.
- (2015). *NORMA Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua*. México: DOF: 27/03/2015.
- NORMA Oficial Mexicana **NOM-179-SSA1-2020** . (22 de octubre de 2020). *Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua*.

- WHO. (21 de marzo de 2022).** *Agua para Consumo Humano. Datos y Cifras.* Obtenido de Sitio Web de la Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- WHO. (21 de marzo de 2022).** *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda.* Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <https://www.who.int/es/publications/i/item>
- WHO. (21 de marzo de 2022).** *Organización Mundial de la Salud.* Obtenido de Agua para consumo humano. Datos y cifras.: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Oller-Arlandis, V. (2012).** Cáncer por contaminación química del agua de consumo humano en menores de 19 años: Una revisión sistemática. *Rev Panam Salud Publica*, 32(6), 435-543.
- ONU. (2022).** *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los recursos hídricos 2022. Aguas Subterráneas. Hacer visible el recurso invisible.* Colombella, Perugia, Italia: División de Ciencias del Agua, UNESCO.
- Organización Mundial de la Salud & Programa Internacional sobre Seguridad de las Sustancias Químicas. (2017).** *Herramienta de evaluación de riesgos para la salud humana de la OMS: Peligros químicos.* Organización Mundial de la Salud. <https://iris.who.int/handle/10665/255613>
- Organization, W. H. (2004).** *Guidelines for Drinking-water Quality.* World Health Organization.
- Orloff, K. G. (1992).** The use of environmental media evaluation guides for screening environmental contamination. *Journal of Soil Contamination*, 1(1), 95-101. <https://doi.org/10.1080/15320389209383405>
- Ortiz Poblete, T. I. (2018).** *Caracterización de polvo negro en la comuna de Huasco, III Región.* <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/150647>

- Othax, N., Peluso, F., & Gonzales Castelain, J. (2014).** Riesgo a la salud integrado por fluoruros, nitratos y arsénico en agua subterránea: Caso del partido de Tres Arroyos, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(1), 27-41.
- Patricia González, *. J.-S. (8 de julio de 2021).** *Repositorio Geotech*. Obtenido de "MODELAGUA": a new interactive program of inverse mass-balance model for geochemical study. An example of its applications in Aguas Calientes, Mexico.: <https://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/3057/1/Modelagua%20un%20nuevo%20programa%20interactivo%20de%20modelo%20de%20balance%20de%20masas%20inverso%20para%20estudio%20geoqu%c3%admico.pdf>
- Payne, B. (1975).** Interacción entre el agua de riego y el agua subterránea y el río Tula en el Valle del Mezquital. *Sección isotópica de hidrología*, 9.
- Peláez. (1990).** *Informe de monitoreo de las aguas mineromedicinales del yacimiento San Vicente*. Pinar del Río, Cuba: Para la oficina de Recursos Minerales.
- Peláez, R. R. (1991).** *Informe de la Exploración Orientativa de las Aguas Minero Medicinales y Potables de San Vicente, Viñales, Pinar del Río*. Pinar del Río, Cuba.
- Peña, B. (2000).** *Caracterización de Sistema Hidrominerales en el Distrito Físico Geográfico Pinar del Río*. La Habana, Cuba: Facultad de Geografía, Universidad de La Habana.
- Pérez-Díaz, J. P.-E.-A.-M.-B.-C.-V. (2019).** *Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo*. Obtenido de Acta Universitaria 29. ISSN online 2007-9621: e2117. doi. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2117>
- Pérez Díaz, J. P., Ortega Escobar, H. M., Carlos, R. A., Flores Magdaleno, H., Sánchez Bernal, E. I., Can Chulim, Á., & Mancilla Villa, Ó. R. (2019).** Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta Universitaria*, 29(2117). <https://doi.org/10.15174.au.2019.2117>
- Pérez Díaz, J. P., Ortega Escobar, H. M., Ramírez Ayala, C., Flores Magdaleno, H., Sánchez Bernal, E. I., Can Chulim, Á., & Mancilla Villa, Ó. R. (2018).**

Concentración de nitrato, fosfato y boro en el agua residual para la irrigación de cultivos en Valle del Mezquital, Hidalgo Nitrate, phosphate and boron content in wastewater for crop irrigation in Mezquital Valley, Hidalgo. *Ciencias naturales e Ingeniería*. <https://doi.org/doi.org/10.21640/ns.v10i21.1478>

Pérez, R., Jiménez, R., Jiménez, B., & Chavez, A. (2000). *¿El agua del valle del Mezquital, fuente de abastecimiento para el Valle de México? I: 859-87.*

Plá Martínez, A., Tarazona, J. V., & García Fernández, A. J. (2001). Evaluación de riesgos toxicológicos en ecosistemas terrestres. *Revista de Toxicología*, 18(núm. 3), 137-139.

Población envejecida, principios para evaluar los efectos de los productos químicos (EHC 144, 1992). (s. f.). Recuperado 26 de diciembre de 2023, de <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc144.htm>

Preston, J. (2004). Children as a sensitive subpopulation for the risk assessment process. *Toxicol Appl Pharmacol*, 199(2), 132-142.

Prieto García, F., García Monroy, R., Prieto Méndez, J., & Benítez Méndez, M. (2015). Impacto en salud por metales: metodología clínico ambiental aplicada en Xochitlán, Valle del Mezquital, México. *Revista Cubana de Salud y Trabajo vol.16 num. 2.*, 16-24.

Prieto Garcia, F., Méndez Marzo, M., Martínez Pezina, F., & Prieto Méndez, J. (2007). Presencia de metales pesados en cultivos del Valle del Mezquital, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3.

PubChem. (s. f.). *Bicarbonate Ion*. Recuperado 27 de diciembre de 2023, de <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/769>

Quintana, S. M., Pérez, E. O., Criado, A. C., Ramos, B. M., & Fernández, L. M. (2008). *LibroSIG: aprendiendo a manejar los SIG en la gestión ambiental*. Recuperado el 15 de 8 de 2022, de <http://oa.upm.es/1244>

Rashid, A., Khan, S., Ayub, M., Sardar, T., Jehan, S., Zahir, S., Khan, M. S., Muhammad, J., Khan, R., Ali, A., & Ullah, H. (2019). Mapping human health risk

- from exposure to potential toxic metal contamination in groundwater of Lower Dir, Pakistan: Application of multivariate and geographical information system. *Chemosphere*, 225, 785-795. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.066>
- Reynoso, L. S. (2005).** Vulnerabilidad del acuífero pampeano a la contaminación en el norte de la provincia de Buenos Aires. Aplicación de la metodología Drastic. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 85-89.
- Riesgo de cáncer: Qué significan los números.* (s. f.). Mayo Clinic. Recuperado 8 de marzo de 2024, de <https://www.mayoclinic.org/es/diseases-conditions/cancer/in-depth/cancer/art-20044092>
- Ríos Rojas, L. &. (2008).** Vulnerabilidad a la contaminación, zona sur acuífero del valle del cauca, Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 23, 69-84.
- Rodríguez Gallego, L., Chreties, C., Crisci, M., Fernández, M., Colombo, N., Lanzilotta, B., . . . Conde, D. (2011).** *Fortalecimiento del concepto de Caudales Ambientales como Herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. INFORME FINAL, Acuerdo PNUMA y Vida Silvestre Uruguay*. Uruguay: Canelones 1164 · Edificio Conventuales · (+598) 2902 5853 · vidasilvestre.org.uy.
- Sahai , H., & Ageel, M. (2014).** *"Probability Distributions: Inference, Estimation, and Hypothesis Testing"*.
- Salhi, A. E. (2008).** Cartografía comparativa de la vulnerabilidad del acuífero costero de Ghis-Nekor (Marruecos). *Geogaceta*, 44, 167-170.
- Salhi, A. E.-B. (2007).** Aplicación del método DRASTIC para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero de Oued Laou (Marruecos). *Geogaceta*, Vol. 41, 191-194.
- Samper, J. (. (1999).** La contaminación de las aguas subterráneas. *IGME*, 29.
- San Juan Martínez, E. (2010).** *Movilidad de Pb y Ni en suelos contaminados del Valle del Mezquital, Hidalgo* [Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos]. Universidad Autónoma de Chapingo.

- Sánchez González, A. (2006).** *Efecto del riego con aguas residuales sobre la calidad de la materia orgánica extractable con agua (MOEA) y las especies de metales pesados en suelos del Valle del Mezquital*. [Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos]. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Sánchez, J. A., Álvarez, T., Pacheco, J. G., Carrillo, L., & González, R. A. (2016).** Calidad del agua subterránea: Acuífero sur de Quintana Roo, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 75-96.
- SEMARNAT. (2002).** *Guía para la presentación del estudio del riesgo ambiental. Análisis Detallado del riesgo*. México.
- SEMARNAT. (2021).** *Compendio de Estadísticas Ambientales 2021. Estimación del agua renovable (disponibilidad natural media del agua) por entidad federativa*. México: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet09eb.html.
- SEMARNAT. (s.f.).** *Gobierno de México. Portal de datos abiertos*. Obtenido de Informe del Medio Ambiente: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html>
- Serie "De aeribus, aquis et locis" n°3. (2016).** *La evaluación del Riesgo en la salud. Guía Metodológica*. España: Sociedad Española de Sanidad Ambiental.
- Servicio Geológico Mexicano. (22 de marzo de 2017).** *SGM. Gobierno de México*. Obtenido de SGM. Gobierno de México: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>
- Sheskin, D. J. (2011).** *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures"*
- Siebe, C., Chapela, M., Cayetano-Salazar, M., Prado, B., & Siemens, J. (2016).** *Effects of more than 100 years of irrigation with Mexico City's wastewater in the Mezquital Valley (Mexico)* (pp. 121-137).
- Sustainability | Free Full-Text | Vulnerability and Risk of Contamination of the Varaž din Aquifer System, NW Croatia.** (s. f.). Recuperado 13 de diciembre de 2023, de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/23/16502>

Suárez, M. C. (24 de diciembre de 2015). *med.se-todo.com*. Obtenido de Análisis químico y calidad de las aguas Análisis químico del agua: <https://med.se-todo.com/himiya/10790/index.html>

Tóth, J. (04 de 07 de 2016). *The Evolutionary Concepts and Practical Utilization of the Tóthian Theory of Regional Groundwater Flow*. Obtenido de International Journal of Earth and Environmental Sciences, 1(111): <https://doi.org/10.15344/2456-351X/2016/111>

USGS. (1999). *Sustainability of Ground-Water Resources*. U.S. Geological Survey Circular 1186. Denver, Colorado: Library of Congress Cataloging-in-Publications Data.

US EPA NATIONAL CENTER FOR ENVIRONMENTAL ASSESSMENT, I. O. (s. f). *Concepts, Methods, and Data Sources for Cumulative Health Risk Assessment of Multiple Chemicals, Exposures and Effects: A Resource Document (Final Report, 2008)* [Reports & Assessments]. Recuperado 26 de diciembre de 2023, de <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=190187>

US EPA, O. (2013, septiembre 4). *A Review of the Reference Dose and Reference Concentration Processes* [Reports and Assessments]. US EPA. <https://19january2021snapshot.epa.gov/osa/review-reference-dose-and-reference-concentration-processes>

US EPA, O. (2014, noviembre 24). *Guiding Principles for Monte Carlo Analysis* [Other Policies and Guidance]. United States Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/risk/guiding-principles-monte-carlo-analysis>

US EPA (U.S. Environmental Protection Agency). *Manual de factores de exposición ed (Final)*, <http://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deidD236252>. (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 2011). (s. f.). Bing. Recuperado 25 de diciembre de 2023, de <https://www.bing.com/search?q=USEPA+%28U.S.+Environmental+Protection+Agency%29.+Manual+de+factores+de+exposición+ed+%28Final%29%2C+http%3A%2F%2Fcfpub.epa.gov%2Fncea%2Frisk%2Frecordisplay.cfm%3FdeidD236252.+%28Agencia+de+Protección+Ambiental+de+los+Estados+Unidos%2C+2011%29.>

<https://www.epa.gov/28u.s.+environmental+protection+agency%29.+manual+de+factores+de+exposición+ed+%28final%29%2C+http%3A%2F%2Fcfpub.epa.gov%2Fncea%2Frisk%2Frecordisplay.cfm%3Fdeidd236252.+%28agencia+de+protección+ambiental+de+los+estados+unidos%2C+2011%29.&sc=0-214&sk=&cvid=74E1A0B46E5D4D0DBBA7351DB3CF2950&ghsh=0&ghacc=0&ghpl=>

Valcarce Ortega, R. M. (2020). vulnerabilidad intrínseca de las aguas subterráneas en la cuenca Almendares-Vento. . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 41(2), 33-47.

Valcarce, R. M. (2011). Cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos cubanos empleando la metodología Ekv modificada. . *CUARTA CONVENCION CUBANA DE CIENCIAS DE LA TIERRA, GEOCIENCIAS 2011*, (978-959),.

Valdés, A. O. (2011). Recursos hidráulicos subterráneos: observaciones sobre su evaluación y gestión en Cuba. . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 32(1), 3-12.

Valdes-Basto, J. S.-R.-E. (2011). Desarrollo de un indicador de la calidad del agua usando estadística aplicada, caso de estudio: Subcuenca Zanjón Oscuro. *TecnoLógicas*, (26), 165-180.

Vázquez Tavares , G., & Córdova Pla, R. (2001). *El valle del Mezquital: historia y problemática ambiental*".

Vázquez-Salvador, N., Rodriguez Dozal, S., Tapia, A., & Riojas Rodriguez, H. (November de 2020). *Journal of Water and Health*. Obtenido de Research Gate: DOI: 10.2166/wh.2020.095

Vega, J. A., Sánchez Gutiérrez, M., Sánchez Peña, L., Martínez Acuña, M. I., & Del Razo, L. M. (27 de May de 2022). *Arsenic and Fluoride in the Drinking Water in Tula City, México: Challenges and Lessons Learned*. Obtenido de Water Air Soil Pollut (2022) 233: 200: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05674-x>

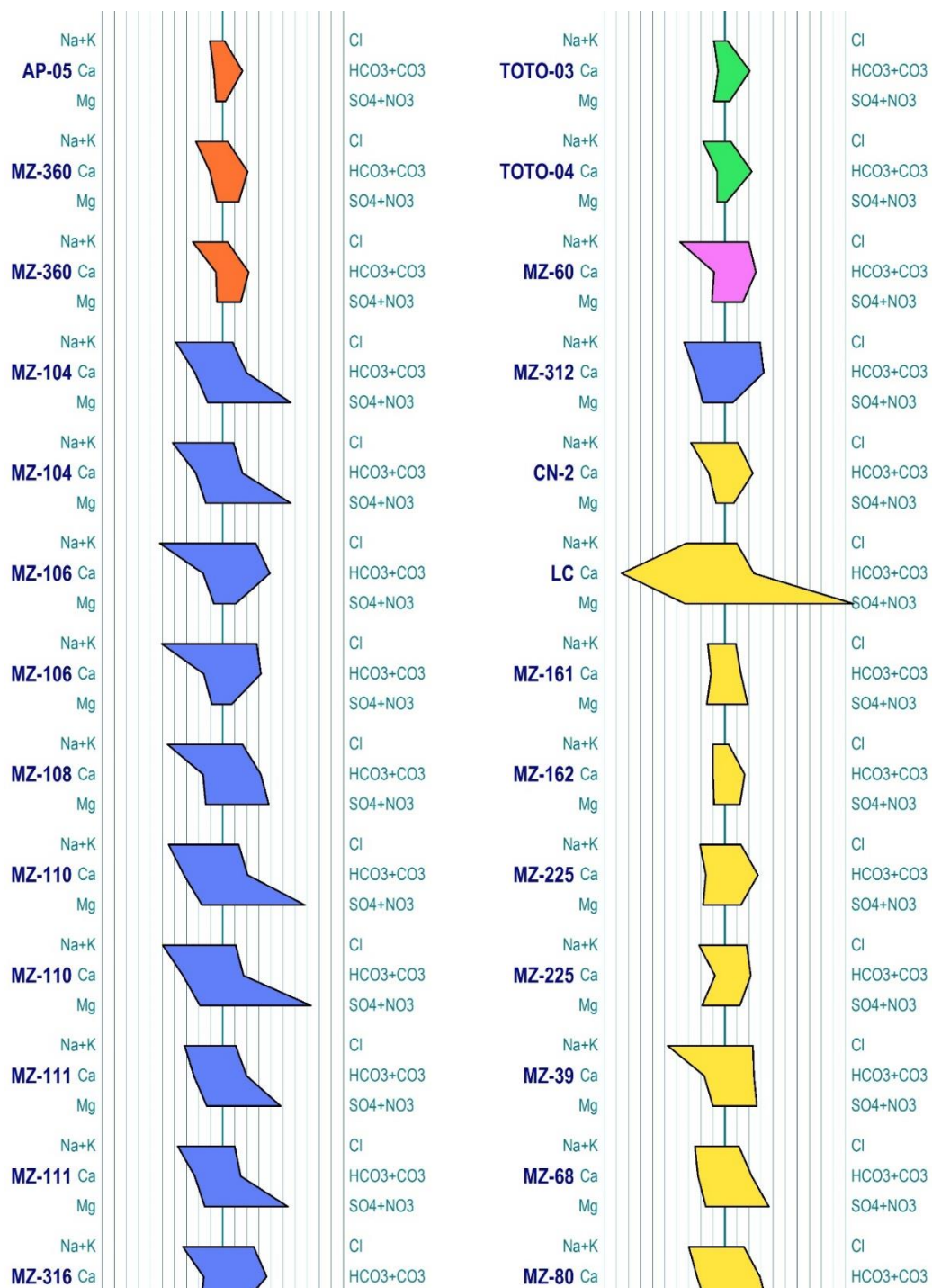
- Vergara Flórez, V. G. (2009).** Evaluación de la vulnerabilidad del acuífero Morroa a contaminación por plaguicidas aplicando la metodología DRASTIC. *Ingeniería y Desarrollo*, 51-64.
- Villagra Mendoza, K., Guzmán Arias, I., Watson, F., & Quirós, P. (diciembre del 2018).** *Propuesta metodológica para la determinación de caudal ambiental en una cuenca piloto en el marco del proceso de otorgamiento de concesiones de agua (Documento 1)*. Cartago.
- Wang, S., Wang, Z., Cheng, X., Li, J., Sang, Z., Zhang, X., Han, L., Qiao, X., Wu, Z., & Wang, ZQ. (s. f.).** *Arsenic and fluoride exposure in drinking water: Children's IQ and growth in Shanyin county, Shanxi province, China*. 115(4), 643-647. <https://doi.org/doi: 10.1289/ehp.9270>. Epub 2007 Jan 9. PMID: 17450237; PMCID: PMC1852689.)
- Water | Free Full-Text | Arsenic Contamination in Indian Groundwater: From Origin to Mitigation Approaches for a Sustainable Future.** (s. f.). Recuperado 13 de diciembre de 2023, de <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/23/4125>
- Waterloo Hydrogeologic. (19 de mayo de 2022).** *Aquachem 11.0 Producto Release*. Obtenido de Waterloo Hydrogeologic: <https://www.waterloohydrogeologic.com/aquachem-11-0-product-release/>
- Wellman, T. P., & Rupert, M. G. (2016).** Groundwater quality, age, and susceptibility and vulnerability to nitrate contamination with linkages to land use and groundwater flow, Upper Black Squirrel Creek Basin, Colorado, 2013. En *Scientific Investigations Report* (2016-5020). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/sir20165020>
- Xavier, J. M. (2004).** Evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Mercedes en el área metropolitana de la ciudad de Paysandú comparación de los métodos GOD Y DRASTIC. . *Hidrología*, 4.
- Zamarrón, D. G. (23 de 04 de 2012).** La ciencia detrás de la explotación de acuíferos: Recurso indispensable en la toma de decisiones. (D. Flores, & I. Aguilar, Entrevistadores)

Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability.
Journal of Hydrology, 370 (2009) 207–213, journal homepage:
www.elsevier.com/locate/jhydrol.

ANEXOS

Anexo 1.

Diagramas de Stiff de los puntos muestreados en las campañas del PRONAI131898



Anexo 2.

Datos y parámetros de los puntos analizados en ambos periodos de muestreo realizados en el marco del PRONAH 318998

Identificador	Longitud(X) (m)	Latitud (Y) (m)	Elevación (msnm)	Estado	Municipio	Referencia	Uso	Tipo	Fecha
AP-01	485035	2211180	2250	México	APAXCO	Pozo Bicentenario	PUBLICO URBANO	POZO	2022
AP-01	485035.4	2211180.3	2250	México	APAXCO	Pozo Bicentenario	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
AP-02	480844	2202696	2283	México	APAXCO	Pozo Perez	PUBLICO URBANO	POZO	2022
AP-04	486456	2209494	2262	México	APAXCO	Pozo Arboledas	PUBLICO URBANO	POZO	2022
AP-05	483098	2210091	2262	México	APAXCO	Pozo Tepetate	PUBLICO URBANO	POZO	2022
AP-05	483098	2210091	2039	México	APAXCO	Pozo Tepetate	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
MZ-360	482959	2208111	2082	México	APAXCO	Pozo La Melga	AGUA RESIDUAL	POZO	2022
MZ-360	482959	2208111	2101	México	APAXCO	Pozo La Melga	RECREATIVO	POZO	28/06/2023
MZ-104	475159	2217384	2074	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo 18 de marzo	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-104	475159.3	2217377.2	2047	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo 18 de marzo	PUBLICO URBANO/AGRÍCOLA	POZO	28/06/2023
MZ-106	477654	2216820	2081	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo El Tablón	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-106	477657.9	2216823.9	2066	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo El Tablón	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
MZ-108	476880	2219525	2066	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo La Palma	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-110	475405	2218270	2081	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo La Ranfla	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-110	475406	2218264	2130	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo Dendho	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
MZ-111	474752	2218599	2106	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo Colonia Dedhó	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-111	474754	2218607	2106	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo Colonia Dedhó	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
MZ-316	478237	2217971	2119	Hidalgo	ATITALAQUIA	Pozo Tezoquipa	PUBLICO URBANO	POZO	2022
CNL-R	467928	2217138	2119	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Canal La Requena	PUBLICO URBANO	CANAL	27/06/2023
MZ-322	478163	2216588	2080	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo San Jose Bojay	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-326	480167	2212483	2094	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo El Refugio	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-326	480165.8	2212460.8	2094	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo El Refugio	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
MZ-334	479692	2211439	2099	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Agua de Vito	RECREATIVO	MANANTIAL	27/06/2023
MZ-89	474639	2213653	2099	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo Progreso	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
POZO - 07	469044	2206042	2036	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo La Toscana	PUBLICO URBANO	POZO	2022
Pozo 7	474944	2201400	2041	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo La Toscana	PUBLICO URBANO	POZO	28/06/2023
TOTO-03	475757	2199570	2042	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo Conejo	PUBLICO URBANO	POZO	2022
TOTO-04	474944	2201400	2042	Hidalgo	ATOTONILCO DE TULA	Pozo Paseos de la Pradera 2	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-60	472576.6	2224818.7	2219	Hidalgo	TEZONTEPEC DE ALDAMA	Manantial Cerro Colorado	PUBLICO URBANO	MANANTIAL	27/06/2023
MZ-312	479359	2219791	2105	Hidalgo	TLAXCOAPAN/ATITALAQUIA	Pozo Bojayito	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
CN-2	465768.3	2213389.4	2102	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Manantial Damu	PUBLICO URBANO	MANANTIAL	27/06/2023
LC	467746	2215967	2115	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	La Cantera	RECREATIVO	MANANTIAL	27/06/2023
MZ-161	462794	2217399	2177	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Manzanitas 1	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
MZ-162	462536	2217232	2177	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Manzanitas 3	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-225	463406	2225356	2143	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Santa Ana Ahuehuepan	RECREATIVO	POZO	2022
MZ-225	463406	2225356	2253	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Santa Ana Ahuehuepan	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
MZ-39	470580	2220373	2184	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Teocalco	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
MZ-68	467890.6	2217151.4	2197	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Insurgentes	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
MZ-80	466571	2220120	2117	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Iturbe BP100	PUBLICO URBANO	POZO	2022
MZ-80	466556.4	2220135	2285	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Iturbe BP100	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
MZ-82	465767	2215842	2285	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Montecillo	PUBLICO URBANO	POZO	27/06/2023
TU-01	452392	2222601	2278	Hidalgo	TULA DE ALLENDE	Pozo Chabacano	PUBLICO URBANO	POZO	2022

Anexo 3.

Resultados de los análisis fisicoquímicos de ambos periodos de muestreo realizados en el marco del PRONAI 318998

Identificador	Profundidad del pozo (m)	Profundidad del nivel (m)	Caudal (lps)	pH	Cond mS/cm	T °C	STD mg/L	RedOx mV	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
									mg/L				
AP-01	N.D	N.D	24	7.4	504	23	338	282.0	270.650	46.630	13.46	11.720	41.600
AP-01	N.D	N.D	25	7.6	500	22	372	310.5	219.350	43.020	13.47	14.400	53.390
AP-02	N.D	N.D	16	7.4	1078	25	744	269.0	407.920	50.240	39.42	16.820	109.200
AP-04	N.D	N.D	N.D	8.0	734	27	480	300.0	243.870	58.840	17.70	9.390	116.100
AP-05	N.D	N.D	6	7.5	676	23	432	335.0	375.180	65.690	17.82	10.150	43.410
AP-05	N.D	N.D	N.D	7.6	668	23	476	303.8	309.230	44.740	20.18	15.530	65.220
MZ-360	N.D	N.D	N.D	7.1	1158	28	768	299.0	383.400	67.240	17.20	22.500	144.200
MZ-360	N.D	N.D	N.D	7.1	1143	27	786	316.4	390.550	35.510	18.68	27.090	155.500
MZ-104	N.D	N.D	N.D	7.1	2220	25	1942	243.0	370.900	139.200	44.92	37.330	249.800
MZ-104	N.D	N.D	N.D	7.0	1866	29	1720	457.6	304.950	134.700	50.17	45.360	259.400
MZ-106	N.D	N.D	N.D	6.5	2130	19	1420	244.0	715.060	97.810	27.57	43.100	334.500
MZ-106	175	N.D	N.D	6.8	1905	21	1492	342.4	577.800	95.250	32.91	55.140	319.200
MZ-108	175	N.D	15.6	7.2	2457	23	1718	151.0	574.320	98.970	52.08	39.750	292.500
MZ-110	N.D	N.D	N.D	7.2	2790	27	2278	253.0	379.550	196.000	62.87	47.720	279.700
MZ-110	N.D	N.D	1.7	6.8	2453	24	2248	338.5	319.930	198.100	68.73	61.740	307.100
MZ-111	N.D	17	N.D	6.9	2066	24	1562	255.0	361.080	144.200	48.09	48.940	192.200
MZ-111	N.D	N.D	N.D	6.9	1756	24	1590	215.8	281.410	139.900	56.07	64.180	218.200
MZ-316	N.D	N.D	N.D	6.7	2233	22	1480	251.0	669.930	95.330	68.27	17.850	219.000
CNL-R	N.A.	N.A.	N.A										
MZ-322	280	18.75	N.D	6.3	2164	22	1504	258.0	510.100	125.000	43.76	31.680	233.190
MZ-326	200	49.51	20	6.7	2387	23	1850	228.0	484.950	145.500	44.20	68.270	278.000
MZ-326	200	N.D	N.D	6.7	2290	24	1874	340.7	394.830	160.100	48.90	84.640	284.400
MZ-334	160	36.95	N.D	6.4	3337	47	3132	280.0	513.600	254.300	88.52	76.610	359.800
MZ-89	160	N.D	1	7.8	1967	26	1652	306.3	256.800	86.300	47.55	33.840	233.800
Pozo 7	150	N.D	N.D	5.9	758	24	3610	213.0	940.300	391.500	125.30	57.560	271.400
Pozo 7	110	N.D	N.D	6.3	3950	39	3600	319.0	751.140	309.000	136.40	79.680	304.700
TOTO-03	150	N.D	N.D	7.4	4330	40	642	77.0	385.600	36.060	33.73	8.130	58.780
TOTO-04	150	N.D	N.D	7.3	684	28	456	222.0	409.130	40.610	24.25	19.200	113.400
MZ-60	250	73.5	73.5	6.9	1605	20	1302	257.0	472.940	56.600	38.72	45.950	234.400
MZ-312	N.D	N.D	235*	6.8	2013	21	1556	304.3	588.500	149.000	66.46	46.160	209.000
CN-2	N.D	6	N.D	7.1	1403	21	942	274.2	425.860	80.810	26.95	59.590	162.300
LC	N.D	N.D	20	6.2	3467	41	3396	280.4	436.560	518.100	120.40	62.960	186.300
MZ-161	120	N.D	N.D	7.1	1215	25	944	274.2	248.240	72.020	55.47	36.170	78.460
MZ-162	120	N.D	N.D	7.6	920	27	624	284.0	310.110	59.970	34.61	24.800	56.040
MZ-225	N.D	N.D	N.D	7.4	1535	23	1072	270.0	498.940	95.320	67.90	35.780	121.500
MZ-225	N.D	N.D	42	7.2	1588	26	1102	285.1	398.040	50.000	68.97	39.200	125.100
MZ-39	N.D	N.D	42	6.9	2350	22	1690	289.0	449.400	103.200	34.96	55.550	294.900
MZ-68	N.D	N.D	7	6.9	2163	23	1762	284.5	404.460	134.100	57.04	29.560	156.800
MZ-80	N.D	60	18	7.0	2087	26	1576	321.0	529.680	142.400	53.46	37.010	183.100
MZ-80	N.D	164.8	65	6.9	2195	23	1710	294.0	436.560	90.020	60.12	43.170	192.800
MZ-82	N.D	N.D	53	6.9	1349	21	898	268.1	419.440	43.120	32.13	41.600	190.200
TU-01	N.D	N.D	17	7.7	241	29	178	224.0	141.910	12.010	4.98	7.170	23.040

Anexo 3. (CONTINUACIÓN)

Resultados de los análisis fisicoquímicos de ambos periodos de muestreo realizados en el marco del PRONAI 318998

Identificador	SO ₄ ²⁻	N-NO ₃ ⁻	N-NO ₂ ⁻ mg/L	F ⁻	Cl ⁻	Al	As	B mg/L	Ba	Cu
AP-01	32.000	3.982	0.001	0.450	18.200	<l.c.	<l.c.	0.112	0.077	0.005
AP-01	14.303	3.398	0.018	0.532	19.476	ND	ND	0.143	0.100	ND
AP-02	42.026	7.514	0.002	0.410	110.100	<l.c.	0.006	0.383	0.025	0.004
AP-04	212.023	0.046	0.001	0.370	26.800	<l.c.	0.034	1.200	0.017	0.004
AP-05	31.714	6.595	0.002	0.340	17.200	<l.c.	<l.c.	0.149	0.147	0.003
AP-05	36.053	6.866	0.014	0.441	16.626	ND	ND	0.202	0.187	0.003
MZ-360	193.385	0.251	0.001	0.510	42.100	<l.c.	0.118	1.167	0.033	0.005
MZ-360	215.935	0.321	0.013	0.612	39.903	0.010	0.113	1.271	0.021	0.003
MZ-104	810.973	6.266	0.001	1.300	90.500	<l.c.	0.105	1.510	0.026	0.004
MZ-104	819.051	5.342	0.023	1.521	95.481	0.017	0.092	1.672	0.027	0.006
MZ-106	152.383	24.120	0.002	0.730	295.800	<l.c.	0.086	1.427	0.090	0.004
MZ-106	113.818	22.590	0.026	0.928	303.069	0.986	0.089	1.702	0.119	0.006
MZ-108	553.152	10.919	0.001	0.730	177.100	<l.c.	0.071	1.720	0.019	0.003
MZ-110	983.024	7.980	0.001	0.920	139.700	<l.c.	0.082	1.510	0.031	0.005
MZ-110	1054.112	9.602	0.020	1.194	119.233	0.013	0.091	1.769	0.034	0.003
MZ-111	693.460	10.596	0.008	0.860	114.900	<l.c.	0.042	0.801	0.031	0.003
MZ-111	784.210	10.423	0.028	1.135	109.732	0.010	0.043	0.934	0.030	0.003
MZ-316	217.899	15.527	0.001	0.690	274.700	<l.c.	<l.c.	0.520	0.198	0.004
CNL-R										
MZ-322	508.127	8.296	0.001	0.860	176.100	<l.c.	0.066	0.970	0.080	0.003
MZ-326	571.249	13.855	0.001	0.700	252.700	<l.c.	0.122	0.752	0.020	0.003
MZ-326	609.035	16.118	0.024	0.901	272.667	0.014	0.120	0.851	0.024	0.003
MZ-334	1561.933	0.133	0.025	3.863	155.810	0.011	0.340	3.102	0.014	0.003
MZ-89	716.505	6.272	0.031	0.803	39.903	0.006	0.035	1.614	0.121	ND
POZO - 07	1871.031	0.364	0.001	2.050	152.200	0.006	0.658	4.453	0.021	0.003
Pozo 7	1655.800	0.281	0.031	2.630	161.035	0.012	0.603	5.029	0.027	ND
TOTO-03	56.222	2.886	0.001	0.480	24.400	<l.c.	<l.c.	0.178	0.004	<l.c.
TOTO-04	21.850	5.668	0.001	0.410	54.100	<l.c.	<l.c.	0.442	0.024	0.004
MZ-60	210.277	21.292	0.014	0.826	212.813	ND	0.020	1.217	0.099	0.004
MZ-312	96.397	24.791	0.050	0.250	313.520	0.013	ND	0.497	0.165	0.006
CN-2	102.889	15.521	0.028	1.365	117.332	0.012	0.189	1.267	0.162	0.004
LC	1536.542	0.217	0.022	3.346	104.507	0.028	0.374	2.753	0.031	0.003
MZ-161	270.541	12.178	0.014	0.624	95.006	ND	ND	0.184	0.097	ND
MZ-162	177.402	0.002	0.006	0.510	38.800	<l.c.	<l.c.	0.161	0.104	0.004
MZ-225	190.666	18.901	0.003	0.570	144.500	<l.c.	<l.c.	0.711	0.111	0.005
MZ-225	183.981	20.015	0.023	0.712	193.812	ND	ND	0.729	0.089	0.003
MZ-39	384.458	21.114	0.024	0.412	245.115	ND	0.032	1.798	0.042	0.003
MZ-68	526.880	13.497	0.027	1.811	123.983	ND	0.329	1.234	0.022	0.003
MZ-80	516.270	12.191	0.002	0.840	165.100	<l.c.	0.091	1.233	0.047	0.005
MZ-80	531.635	12.265	0.032	1.040	201.413	ND	0.090	1.383	0.033	0.004
MZ-82	92.930	12.596	0.031	1.528	114.957	ND	0.198	0.988	0.072	0.003
TU-01	2.000	0.955	0.001	0.160	14.400	<l.c.	<l.c.	0.019	0.022	0.003

*<l.c. límite de cuantificación; l.c. Al: 0.006 mg/L; l.c. As: 0.049 mg/L; l.c. B: 0.052 mg/L; l.c. Be: 0.001 mg/L; l.c. Bi: 0.035 mg/L.

N.D. no determinado

Anexo 3. (CONTINUACIÓN)

Resultados de los análisis fisicoquímicos de ambos periodos de muestreo realizados en el marco del PRONAI 318998

Identificador	Li	Mn	Mo mg/L	P	Pb	Se	Si	Sr mg/L	Zn	Cr	Fecales NMP/100 mL	Echerichia Coli A NMP/100 mL
AP-01	0.023	0.006	0.005	0.026	<l.c.	<l.c.	76.633	0.417	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
AP-01	0.021	ND	ND	0.016	ND	ND	38.800	0.454	0.004	ND	ND	ND
AP-02	0.079	0.005	0.003	0.033	<l.c.	<l.c.	94.759	0.925	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
AP-04	0.129	0.010	0.036	0.062	<l.c.	<l.c.	83.802	0.475	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
AP-05	0.025	0.001	0.004	0.086	<l.c.	<l.c.	78.495	0.568	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
AP-05	0.027	ND	0.004	0.030	ND	ND	37.030	0.699	ND	0.001	ND	ND
MZ-360	0.772	0.015	0.014	0.056	<l.c.	<l.c.	39.280	1.477	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-360	0.754	ND	0.015	0.052	ND	ND	40.720	1.465	0.004	ND	ND	ND
MZ-104	0.673	<l.c.	0.013	0.044	<l.c.	<l.c.	86.114	3.751	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-104	0.689	0.003	0.014	0.032	ND	ND	41.810	4.640	0.015	0.003	ND	ND
MZ-106	0.378	0.001	0.003	0.167	<l.c.	<l.c.	89.431	2.745	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-106	0.418	0.152	0.003	0.111	ND	ND	39.070	3.594	0.033	ND	ND	ND
MZ-108	0.667	<l.c.	<l.c.	0.033	<l.c.	<l.c.	79.351	3.789	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-110	0.643	<l.c.	0.009	0.038	<l.c.	<l.c.	86.606	5.587	<l.c.	0.005	<l.c.	<l.c.
MZ-110	0.668	0.002	0.010	0.023	ND	ND	44.360	6.798	0.055	0.004	ND	ND
MZ-111	0.341	<l.c.	0.003	0.121	<l.c.	<l.c.	88.660	3.895	<l.c.	0.004	<l.c.	<l.c.
MZ-111	0.362	ND	0.003	0.023	ND	ND	43.420	5.160	0.008	0.003	ND	ND
MZ-316	0.132	<l.c.	<l.c.	0.051	<l.c.	<l.c.	80.122	2.986	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
CNL-R												
MZ-322	0.508	<l.c.	<l.c.	0.055	<l.c.	<l.c.	89.666	3.500	<l.c.	0.003	<l.c.	<l.c.
MZ-326	0.535	<l.c.	0.005	0.034	<l.c.	<l.c.	91.399	4.160	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-326	0.531	0.001	0.006	0.030	ND	ND	42.260	5.150	0.011	0.002	ND	ND
MZ-334	1.843	ND	ND	0.064	ND	ND	29.990	8.580	ND	ND	ND	ND
MZ-89	0.785	0.002	0.007	0.016	ND	ND	31.580	6.198	ND	ND	ND	ND
POZO - 07	1.989	0.013	0.012	0.078	0.002	<l.c.	46.288	8.656	0.008	0.004	<l.c.	<l.c.
Pozo 7	1.893	0.007	0.003	0.111	ND	ND	22.970	6.817	0.006	ND	ND	ND
TOTO-03	0.023	<l.c.	<l.c.	0.024	<l.c.	<l.c.	85.386	0.398	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
TOTO-04	0.083	<l.c.	<l.c.	0.022	<l.c.	<l.c.	93.069	0.754	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-60	0.167	ND	ND	0.125	ND	ND	41.280	2.277	ND	ND	ND	ND
MZ-312	0.053	0.003	ND	0.097	ND	ND	41.260	2.629	0.044	ND	ND	ND
CN-2	0.442	ND	0.006	0.044	ND	ND	41.910	4.548	0.017	ND	ND	ND
LC	1.292	0.006	0.003	0.051	ND	ND	18.560	10.35	0.021	ND	ND	ND
MZ-161	0.108	ND	ND	0.018	ND	ND	44.820	2.003	ND	ND	ND	ND
MZ-162	0.104	<l.c.	0.004	0.027	<l.c.	<l.c.	86.123	1.032	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-225	0.042	0.001	<l.c.	0.098	<l.c.	<l.c.	86.328	2.677	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-225	0.039	ND	ND	0.088	ND	ND	40.980	2.499	ND	ND	ND	ND
MZ-39	0.072	0.002	0.003	0.049	ND	ND	42.860	3.344	ND	ND	ND	ND
MZ-68	0.381	0.079	0.007	0.059	ND	ND	34.710	5.197	ND	ND	ND	ND
MZ-80	0.222	0.002	0.004	0.142	<l.c.	<l.c.	41.670	4.384	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.
MZ-80	0.260	ND	0.003	0.069	ND	ND	43.340	4.955	ND	ND	ND	ND
MZ-82	0.274	ND	0.005	0.091	ND	ND	43.620	4.663	ND	ND	ND	ND
TU-01	0.025	<l.c.	<l.c.	0.040	<l.c.	<l.c.	105.117	0.127	<l.c.	<l.c.	<l.c.	<l.c.

*<l.c. límite de cuantificación; l.c. Li: 0.008 mg/L; l.c. Mn:0.001 mg/L; l.c. Mo: 0.001 mg/L; l.c. Ni: 0.001 mg/L; l.c. P: 0.082 mg/L; l.c. Pb: 0.017 mg/L; l.c. Cr: 0.007 mg/L; l.c. Zn: 0.002 mg/L; Se:0.044 mg/L.
N.D. no determinado

Anexo 4.

Datos de los puntos analizados procedentes de la bibliografía

Clave	Tipo	Longitud (X)	Latitud (Y)	Elevación (msnm)	Localidad	Municipio	Estado	Acuifero	Uso	Fecha de muestreo
MZ-347	Pozo	483767	2210938	2220	Coyotitos	Apaxco	Estado de México	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-357	Pozo	480281	2203221	2280	Santa María Apaxco	Apaxco	Estado de México	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-359	Pozo	479705	2205421	2197	Santa María Apaxco	Apaxco	Estado de México	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-360	Pozo	482959	2208111	2184	Continuación Aldama	Apaxco	Estado de México	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-362	Noria	481778	2208930	2180	Santa María Apaxco	Apaxco	Estado de México	Valle del Mezquital	Agrícola/Doméstico	01/02/2008
MZ-100	Pozo	475323	2215489	2104		Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Potable	01/01/2008
MZ-100	Pozo	475323	2215489	2104		Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Potable	01/11/2012
MZ-102	Pozo	475805	2217074	2103		Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital		01/01/2008
MZ-103	Pozo	475816	2217081	2103	Comunidad El Cardonal	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-104	Pozo	475159	2217376	2106	Colonia 18 De Marzo	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-106	Pozo	477657	2216823	2119	El Tablón	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-106	Pozo	477657	2216823	2119	El Tablón	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-106	Pozo	477657	2216823	2119	El Tablón	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/11/2012
MZ-108	Pozo	476880	2219525	2080	Tlalminulpa	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-109	Pozo	476913	2218974	2179	Atitalaquia	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital		01/01/2008
MZ-110	Pozo	475406	2218264	2094	El Dendhó	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-111	Pozo	474754	2218607	2099	Colonia Dendhó	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-111	Pozo	474754	2218607	2099	Colonia Dendhó	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/11/2012
MZ-114	Noria	474829	2219050	2093		Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Doméstico	01/11/2012
MZ-314	Noria	476745	2216898	2102	Villas De Atitalaquia	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-316	Pozo	478237	2217971	2102	Tezoquipa	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-378	Pozo	473278	2216897	2135	Parque Industrial Atitalaquia	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Industrial	01/11/2012
MZ-79	Pozo	474029	2216134	2136		Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-79	Pozo	474029	2216134	2136		Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/11/2012
MZ-87	Pozo	475130	2216099	2121	Parque Industrial Atitalaquia	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Industrial	01/01/2008
MZ-98	Noria	475329	2215320	2105	Tlamaco	Atitalaquia	Hidalgo	Valle del Mezquital	Sin Uso	01/01/2008
MZ-117	Noria	473533	2212148	2162	Zacamulpa	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-118	Pozo	472475	2212001	2224	Zacamulpa	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-326	Pozo	480165	2212460	2177	El Refugio	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-326	Pozo	480165	2212460	2177	El Refugio	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/11/2012
MZ-327	Manantial	478884	2211744	2145	San Vito	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Recreativo	01/01/2008
MZ-328	Manantial	478872	2211747	2145	San Vito	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Recreativo/Domestico	01/12/2012
MZ-332	Pozo	475135	2209471	2204	Colonia Conejos Segunda Sección	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Sin Uso	01/01/2008
MZ-338	Pozo	478685	2210325	2175	Vito	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008
MZ-356	Pozo	469043	2205412	2173	El Portal	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Doméstico	01/02/2008
MZ-367	Pozo	468944	2206445	2107	Colonia San Antonio	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-369	Noria	470271	2206014	2160	Melchor Ocampo	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Doméstico	01/02/2008
MZ-371	Noria	470267	2205122	2161	Melchor Ocampo	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Sin Uso	01/02/2008
MZ-372	Pozo	471240	2205232	2177	Melchor Ocampo, El Salto	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-441	Pozo	475893	2204702	2298	El Pedregal	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-442	Pozo	475879	2204698	2298	El Pedregal	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Sin Uso	01/02/2008
MZ-444	Pozo	475526	2199230	2281	Praderas Del Potrero	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-445	Pozo	476146	2197729	2289	La Herradura	Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/02/2008
MZ-88	Pozo	474646	2214154	2128		Atotonilco De Tula	Hidalgo	Valle del Mezquital	Publico Urbano	01/01/2008

Anexo 5.

Código del Análisis de Monte Carlo en R

Instalar y cargar librerías necesarias

```
library(openxlsx)
```

```
library(extraDistr)
```

Fija la semilla para reproducibilidad

```
set.seed(123)
```

Definición de las concentraciones de arsénico medidas en cada punto de muestreo

```
concentraciones <- c (0.006, 0.034, 0.118, 0.105, 0.089, 0.071,  
0.091, 0.043, 0.066, 0.122, 0.035, 0.658, 0.020, 0.189, 0.032, 0.329,  
0.091, 0.198)
```

Definición de los puntos de muestreo

```
puntos_muestreo <- c ("AP-02", "AP-04", "MZ-360", "MZ-104", "MZ-  
106", "MZ-108", "MZ-110", "MZ-111", "MZ-322", "MZ-326", "MZ-89",  
"POZO-07", "MZ-60", "CN-2", "MZ-39", "MZ-68", "MZ-80", "MZ-82")
```

Número de iteraciones de Monte Carlo

```
num_iteraciones <- 10000
```

Inicializa la matriz para almacenar los resultados

```
resultados <- matrix (NA, nrow = num_iteraciones, ncol =  
length(puntos_muestreo) * 2)
```

Iteración de Monte Carlo

```
for (i in 1:num_iteraciones) {  
  for (j in 1:length(puntos_muestreo)) {
```

Parámetros para niños

```
params_tc_ninos <- c (min = 0.5, mode = 1, max = 1.5)
```

```
params_pc_ninos <- c (min = 5, mode = 10, max = 20)
```

Parámetros para adultos

```
params_tc_adultos <- c (min = 0.8, mode = 2, max = 3)
```

```
params_pc_adultos <- c (min = 50, mode = 70, max = 100)
```

Factor de exposición

```
fe <- rlnorm(1, meanlog = 0, sdlog = 0.5)
```

Dosis de exposición para niños y adultos

```
tc_ninos <- runif (1, min = params_tc_ninos["min"], max =  
params_tc_ninos["max"])
```

```
pc_ninos <- runif (1, min = params_pc_ninos["min"], max =  
params_pc_ninos["max"])
```

Anexo 5. (Continuación)

Código del Análisis de Monte Carlo en R

```
tc_adultos <- runif (1, min = params_tc_adultos["min"], max =  
params_tc_adultos["max"])  
pc_adultos <- runif (1, min = params_pc_adultos["min"], max =  
params_pc_adultos["max"])  
dosis_ninos <- (concentraciones[j] * tc_ninos * fe) / pc_ninos  
dosis_adultos <- (concentraciones[j] * tc_adultos * fe) /  
pc_adultos
```

Almacena los resultados en la matriz

```
resultados [i, (2 * j - 1):(2 * j)] <- c(dosis_ninos,  
dosis_adultos)}}
```

Crear un libro de Excel y guardar los resultados en hojas separadas

```
wb <- createWorkbook ()  
for (j in 1: length(puntos_muestreo)) {  
  sheet <- paste ("Resultados_", puntos_muestreo[j], sep = "")  
  addWorksheet (wb, sheet)  
  writeData (wb, sheet, resultados[, (2 * j - 1):(2 * j)])}
```

Guarda el libro de Excel con los resultados

```
saveWorkbook(wb, "Monte Carlo.xlsx")
```

Crea un segundo libro de Excel para el resumen estadístico

```
wb_resumen <- createWorkbook()  
for (j in 1: length(puntos_muestreo)) {  
  sheet <- paste ("Resumen_", puntos_muestreo[j], sep = "")  
  addWorksheet (wb_resumen, sheet)
```

Calcula estadísticas

```
resumen_ninos <- quantile (resultados [, (2 * j - 1)], c (0, 0.25,  
0.5, 0.75, 1))  
resumen_adultos <- quantile (resultados [, (2 * j)], c (0, 0.25,  
0.5, 0.75, 1))
```

Escribe los resultados en el libro de Excel

```
writeData (wb_resumen, sheet, cbind ("Niños", resumen_ninos))  
writeData (wb_resumen, sheet, cbind ("Adultos", resumen_adultos),  
startCol = 4)}
```

Guarda el segundo libro de Excel con el resumen estadístico

```
saveWorkbook (wb_resumen, "resumen_estadistico.xlsx")
```

Se repite para el resto de los elementos tóxicos de interés en este estudio.

Para su reproducibilidad en otros escenarios ajustar según las nuevas especificaciones.

Anexo 6.

Código del Análisis de Sensibilidad en R

```
library(openxlsx) # Instalar y cargar librerías necesarias

# Define la función del modelo
modelo <- function (C, TC, FE, PC) {DEE oral <- (C * TC * FE) / PC
  return (DEE oral)}

# Define las distribuciones de los parámetros
# Para C: lognormal con miu=16.1 y cidma=1.6
# Para TC: triangular con a=0.8, b=3, c=2
# Para PC: triangular con a=50, b=100, c=70
# Para FE: lognormal con miu=1 y cidma=0.5
medias <- c (16.1, 2, 70, 1)
desviaciones <- c (1.6, 0.5, 20, 0.1)
parametros_triangular <- list (c (0.8, 3, 2), c (50, 100, 70))

# Realiza un muestreo de Monte Carlo para generar valores de los parámetros y calcular DEEoral
set.seed(123)
num_simulaciones <- 1000 # Se puede ajustar según sea el interés

# Crear una matriz para almacenar los resultados
resultados <- data.frame(DEEoral = numeric(num_simulaciones),
  Parametro = character(num_simulaciones), stringsAsFactors = FALSE)

# Realizar simulaciones variando el parámetro C y manteniendo los demás parámetros constantes
param_C <- rlnorm (num_simulaciones, meanlog = medias [1],
  sdlog = desviaciones [1])
DEEoral <- modelo (param_C, medias [2], medias [4], medias [3])

# Calcular la densidad de kernel de DEEoral
densidad <- density (DEEoral)

# Definir los niveles de confianza deseados (pueden ajustarse según sea necesario)
conf_levels <- c (0.5, 0.75, 0.95)

# Calcular los intervalos de confianza como regiones de la densidad de kernel
ic_levels <- sapply (conf_levels, function(p) {quantile
  (DEEoral, probs = c ((1 - p) / 2, 1 - (1 - p) / 2)})})

# Almacenar los resultados en el dataframe
resultados$DEEoral <- DEEoral
resultados$Parametro <- rep ("C", num_simulaciones)
```

Anexo 6. (Continuación)
Código del Análisis de Sensibilidad en R

```
# Escribe los resultados en un archivo Excel  
write.xlsx (resultados, "resultados_analisis_sensibilidad.xlsx",  
            rowNames = FALSE)  
names(resultados)  
correlation_C <- cor (resultados [, c ("Parametro", "DEEoral")])  
print(correlation_C)
```

Anexo 7.

Código para la determinación de los Intervalos de Confianza (IC) del 95% estimados con el método de Máxima Verosimilitud en R

Instala y carga el paquete necesario para leer archivos de Excel

```
install.packages("readxl")
```

```
library(readxl)
```

Carga los datos desde tu archivo Excel

```
datos <- read_excel("ruta/del/archivo/tuarchivo.xlsx")
```

Calcula los IC95% utilizando el método de máxima verosimilitud

```
ic_95 <- t(sapply(datos, function(x) {  
  m <- MASS::fitdistr(x, "normal")  
  ql <- MASS::qnorm(0.025, m$estimate[1], sqrt(m$estimate[2]))  
  qu <- MASS::qnorm(0.975, m$estimate[1], sqrt(m$estimate[2]))  
  c(ql, qu)  
}))
```

Imprime los IC95% para cada variable

```
print(ic_95)
```

Anexo 8.

Encuestas aplicadas durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Datos generales de aplicación.

Identificación	Fecha de muestreo	Referencia	Hora	Latitud (X)	Longitud (Y)	Localidad	Entidad Responsable	Contacto
MZ-161	27-jun-23	Pozo Manzanitas 1	16:30	462794	2217399		CAPYAT	Ing. Hugo
MZ-68	27-jun-23	Pozo Insurgentes	10:20	467890.6	2217151.4		CAPYAT	Ing. Hugo
MZ-225	27-jun-23	Pozo Sta. Ana Ahuehuepan (Bp100)	11:28	463406	2225356		CAPYAT	Ing. Hugo
MZ-80	27-jun-23	Pozo Iturbe	12:50	466556.4	2220135		CAPYAT	Ing. Hugo
MZ-82	27-jun-23	Pozo Montezillo	13:24	465767	2215842		CAPYAT	Ing. Hugo
MZ-39	27-jun-23	Pozo Teocalco	09:52	470580	2220373		CAPYAT	Ing. Hugo
MZ-110	28-jun-23	Pozo Dendho	11:35	475406	2218264		La Comunidad	Casimiro Cirón Flores (pocero) 7731481736- 7732022618
MZ-104	28-jun-23	Pozo El 18 De Marzo	12:35	475159.3	2217377.2		Comisión de Agua y Alcantarillado de Atitalaquia	Jasmín
MZ-106	28-jun-23	Pozo El Tablon	13:50	477657.9	2216823.9			Marcelino (7731110515)
MZ-111	28-jun-23	Pozo Col. Dendho	14:52	474754	2218607		La Comunidad	Pablo Cruz Chávez (7731364875)
MZ-312	27-jun-23	Pozo Bojayito	15:42	479359	2219791		Comisión de Agua y Saneamiento del Municipio Tlaxcoapan	Ing. Uriel Nemese Joanna Rodríguez Lugo (5525365281)
MZ-326	28-jun-23	Pozo El Refugio	16:33	480165.8	2212460.8		La comunidad	Joaquín Valdés Montía
MZ-89	28-jun-23	Pozo Progreso	09:30	474639	2213653		CAASAT	Ing. Cuauhtemoc
TOTO-05	28-jun-23	Pozo La Toscana	11:00	474944	2201400		CAASAT	Ing. Cuauhtemoc
MZ-360	28-jun-23	Pozo La Melga	12:10	482959	2208111		Municipio	Dr. Choreño, Lic. Aide
AP-01	28-jun-23	Pozo Bicentenario	09:18	485035.4	2211180.3		Municipio	Dr. Choreño
AP-05	28-jun-23	Pozo Tepetates	10:14	483098	2210091		Municipio	Dr. Choreño
MZ-334	27-jun-23	Agua De Vito	12:08	479692	2211439		Privado	Gilberto López (5574229088) Alma Alvarado Badillo (esposa)
CN-2	27-jun-23	Manantial Damu	02:18	465768.3	2213389.4			
LC	27-jun-23	La Cantera		467746	2215967		Impulsora Turística y Deportiva La Cantera	Ligia Elisaldi Velázquez
MZ-60	27-jun-23	Cerro Colorado		472602	2224819	Cerro Colorado	CAASVAM	Ing. Mario Guerrero Josué Guzmán Reyes (operador)

Anexo 8. A

Encuestas aplicadas durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Resumen de la sección A.

Id	Uso	Colonia que abastece	Usuarios	Personas	Estado de la zona cercana a la fuente	Forma de captación	Variación por temporalidades en la fuente	Estado físico de la infraestructura	Mantenimiento
MZ-161	Doméstico	Malinche y Jalpa			Existen áreas verdes alrededor de la toma de agua. Existe peligro de contaminación causado por la cercanía de canales de riego y el río Tula.	por bombeo		malo	No
MZ-68	Doméstico	Colonia Segundo del Llano			Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente. Existe riesgo de contaminación causado por un canal de aguas negras	por bombeo		regular	No
MZ-225	Doméstico	Santa Ana Ahuhuepan			Existen áreas verdes alrededor de la toma de agua y delimitación con cerca. Existe peligro de contaminación causado por la cercanía de canales de riego.	por bombeo		regular	Si
MZ-80	Doméstico	Tultengo, el llano primera sección e Iturbe			Existe delimitación con cerca de la fuente	por bombeo		regular	No
MZ-82	Doméstico	Montezillo			Existe zonas erosionadas alrededor de la fuente. Pasa una sanja a unos 50m	por bombeo		regular	
MZ-39	Doméstico				Existencia de áreas verdes alrededor de la toma de agua. Existe riesgo de contaminación causada por basura, canales de riego y el río.	por gravedad		malo	No
MZ-110	potable, doméstico	comunidad Dendho	1000 a 1100	4000-4400	Existe delimitación con cerca de la fuente	por bombeo	En seca baja un poco pero no es significativo	bueno	No regularmente. Hace 3 meses se cambió la bomba la columna está al 70% de limpieza
MZ-104	doméstico	Colonia 18 de Marzo y Fraccionamiento Cardonal	4700	14000	Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente	por bombeo	En seca disminuyen los niveles y se bombea 2h en la mañana y en la tarde de 4h que se suele bombear	bueno	No
MZ-106	doméstico	El Tablón	1200	5000	Existe delimitación con cerca de la fuente	por bombeo	En seca no hay agua suficiente	regular. Hay mucho taponamiento por sarro	No regularmente, cuando se rompe algo
MZ-111	doméstico	Colonia Dendho	1500	6000	Existe delimitación con cerca de la fuente	por bombeo	No hay variación	bueno	No regularmente, cuando se rompe algo
MZ-312	doméstico, comercial e industrial	cabecera municipal		20000	Existe un canal de riego bordeando la cerca de protección, Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente	por bombeo	En seca no hay agua suficiente, se abastece también con pipas en este periodo	bueno	Si, cada 6 meses
MZ-326	doméstico	localidad El Refugio	950	1500		por bombeo	Baja el nivel en seca, pero si hay agua suficiente para el abastecimiento	bueno	Si, cada medio año. Acaban de cambiar la bomba
MZ-89	doméstico	El progreso			Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente	por bombeo		malo	Si, cepillado y desazolve

Anexo 8. A (CONTINUACIÓN)

Encuestas aplicadas durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Resumen de la sección A.

Id	Uso	Colonia que abastece	Usuarios	Personas	Estado de la zona cercana a la fuente	Forma de captación	Variación por temporalidades en la fuente	Estado físico de la infraestructura	Mantenimiento
TOTO-05	doméstico	Fraccionamiento, paseo de la pradera y la Fontana			Existe área verde alrededor de la fuente	por gravedad		bueno	Si, cuando falla la bomba y se cambian los filtros
MZ-360	doméstico	Colonia centro (Aldama, Galeana, Camino Rea)			Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente	por bombeo		malo	Si, sacaron bomba y limpiaron tubos
AP-01	doméstico	Colonia Juárez y barrio Coyotillos			Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente y zonas erosionadas.			regular	Si, cuando se rompe algo
AP-05	doméstico	Colonia arboledas, 23 de Noviembre, Tepetates			Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente y zonas erosionadas.	por bombeo		malo	Si, cuando se rompe algo
MZ-334	balneario				Existe un canal de riego, Existen áreas verdes y delimitación del manantial	por gravedad	No hay variación	bueno	Si, se llena de salitre y cada 4 meses se limpia
CN-2									
LC	balneario				Existe protección de la fuente	por gravedad	No hay agua suficiente ni en época de lluvia ni en época de seca desde el temblor	bueno	No
MZ-60	doméstico	15-20% de Fransisco Imadero 40% de Progreso 40-50% Mixiahula Tezontepec y parte se lleva Juanhdó		60000-70000	Existen áreas verdes y delimitación con cerca de la fuente	por gravedad	En seca disminuye el caudal	regular	Si, se limpia cada 3 meses

Anexo 8. B

Encuestas aplicadas durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Resumen de la sección B.

Identificación	¿Existe Almacenamiento?	Ocurre Mezcla	Limpieza	Estado físico de la infraestructura de almacenamiento	Observaciones
MZ-161	No				
MZ-68	Si			regular	Distribución directa en la tarde, por la mañana se almacena en un tanque
MZ-225	No				
MZ-80	No				
MZ-82	No				
MZ-39	Si		No	Malo	Tanque elevado
MZ-110	Si	No	Anual	Regular, pequeñas fracturas humedecidas	Tanque elevado, se base a en 2:20h y se llena en 2:30h
MZ-104	No				
MZ-106	No				
MZ-111	Si	No	Anual	Bueno	
MZ-312	Si	No	Semestral	Regular, existen filtraciones	El agua tiene dureza, genera cerro por lo que hay que limpiar, un tanque de almacenamiento sobre suelo para cada pozo
MZ-326	Si	No	Semestral	Regular, existen fisuras	Dos tanques
MZ-89	Si	Si	Quien sabe	Malo	
TOTO-05	Si	Si	cada 8 días	Bueno	Se almacena uen un tanque y se mezcla con agua de un pozo vecino para bajar su temperatura y diluir sales
MZ-360	Si	Si	Quien sabe	Malo	
AP-01					Directo a la red de distribución y a un tanque de almacenamiento
AP-05	No				
MZ-334	No				
CN-2					
LC	No				
MZ-60	No				

Anexo 8. C

Encuestas aplicadas durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Resumen de la sección C.

Identificación	Referencia	Se realizan muestreos de calidad	Observaciones	Se realiza desinfección con Cl	Observaciones	Otros tratamientos
MZ-161	POZO MANZANITAS 1	No		Si		No
MZ-68	POZO INSURGENTES	Si	2 veces por año, por el IMTA o CONAGUA	Si		No
MZ-225	POZO STA. ANA AHUEHUEPAN (BP100)	Si	cada 48 horas	Si		Planta potabilizadora
MZ-80	POZO ITURBE	No				No, tiene planta potabilizadora pero no funciona
MZ-82	POZO MONTEZILLO			Si	diariamente, permanentemente	No
MZ-39	POZO TEOCALCO	No		Si	permanentemente	No
MZ-110	POZO DENDHO	No		Si	Una vez se le olvidó por una hora, con hipoclorito de Na	No
MZ-104	POZO EL 18 DE MARZO	Si	Cada 6 meses, cumple la norma	Si	Hipoclorito, todo el tiempo	No
MZ-106	POZO EL TABLON	Si	CONAGUA realizó 3 muestreos con anterioridad que cumplieron la norma	Si	Hipoclorito, todo el tiempo	No
MZ-111	POZO COL. DENDHO	No		Si	Hipoclorito	No
MZ-312	POZO BOJAYITO	Si	2 muestreos al año por CEA	Si	Hipoclorito	No
MZ-326	POZO EL REFUGIO	Si	No recuerda nada al respecto salvo que se hizo uno este año y se cumplió la norma	Si	Hipoclorito	No
MZ-89	POZO PROGRESO	No		Si	En el tanque donde luego se distribuye a la población	No
TOTO-05	POZO LA TOSCANA	Si		Si	10L por día, diario	Ósmosis Inversa
MZ-360	POZO LA MELGA	No		No	Si, pero no funciona su sistema de cloración	No
AP-01	POZO BICENTENARIO	No		Si	continuo	No
AP-05	POZO TEPETATES	No		Si	cada que lo arrancan	No
MZ-334	AGUA DE VITO	Si	cada 3 meses por CONAGUA se llevan al laboratorio de Pachuca, siempre se cumple la norma	No		No
CN-2	MANANTIAL DAMU					
LC	LA CANTERA	Si	cada 6 meses, COFEPRICEH	Si	diariamente, la dosis varía en dependencia del público	No
MZ-60	CERRO COLORADO	Si	muy buena calidad del agua	Si	Gas Cl las 24h en diferentes puntos, Tezontepec clora su agua	No

Anexo 8. D

Encuestas aplicadas durante los trabajos de campo desarrollados en el marco del PRONAI 318998. Resumen de la sección D.

Id	Referencia	Se realizan muestreos de calidad	Área de captación en propiedad privada	Colonia que abastece	Se bebe agua de garrafón	Se filtra en domicilios	Observaciones
MZ-161	Pozo Manzanitas 1						
MZ-68	Pozo Insurgentes						
MZ-225	Pozo Sta. Ana						
MZ-80	Ahuehuepan (Bp100)						
MZ-82	Pozo Iturbe						
MZ-82	Pozo Montezillo						
MZ-39	Pozo Teocalco						
MZ-110	Pozo Dendho	No	Si	comunidad Dendho	Si, de forma mayoritaria	No, ni el 10% tiene	Agua dura, mucho sarro
MZ-104	Pozo El 18 De Marzo	Si	No	Colonia 18 de Marzo y Fraccionamiento Cardonal	Si, de forma mayoritaria	No	
MZ-106	Pozo El Tablon	Si	Si	El Tablón	Si, de forma mayoritaria	No, muy pocos	Agua muy dura, mucho sarro
MZ-111	Pozo Col. Dendho	No	Si	Colonia Dendho	Si, de forma mayoritaria	No	Se tiene previsto plantar más vegetación
MZ-312	Pozo Bojayito	Si	No	cabecera municipal	Si, de forma mayoritaria	No	
MZ-326	Pozo El Refugio	Si	Si	localidad El Refugio	Si, de forma mayoritaria	No	Se tiene previsto cambiar la camisa del pozo
MZ-89	Pozo Progreso						
TOTO-05	Pozo La Toscana						
MZ-360	Pozo La Melga						
AP-01	Pozo Bicentenario						
AP-05	Pozo Tepetates						
MZ-334	Agua De Vito	Si	Si				
CN-2	Manantial Damu						
LC	La Cantera	Si	No sabe				Se realizó un estudio geológico para conocer la causa de la disminución del caudal. Quieren perforar
MZ-60	Cerro Colorado	Si	No	15-20% de Fransisco Imadero 40% de Progreso 40-50% Mixiahula Tezontepec y parte se lleva Juanhdó	Si, de forma mayoritaria (todavía hay algunas colonias que la beben sobre todo en Tezontepec)	No	Se tiene previsto plantar más vegetación

