



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Evaluación geoquímica de los sedimentos de la presa El
Realito, sus afluentes y su impacto sobre la calidad de
agua**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en tecnología y gestión del agua

Presenta:

María de los Ángeles Marmolejo Bravo

Asesor:

Dr. Cristóbal Aldama Aguilera

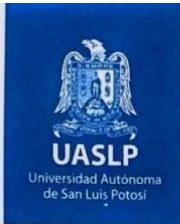
Co-asesor:

Dr. Roberto Briones Gallardo



San Luis Potosí, S. L. P.

Septiembre de 2025



FACULTAD DE
INGENIERÍA

19 de junio de 2025

**ING. MARÍA DE LOS ÁNGELES MARMOLEJO BRAVO
P R E S E N T E.**

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

TEMARIO:

"Evaluación geoquímica de los sedimentos de la presa El Realito, sus afluentes y su impacto sobre la calidad de agua"

Introducción.

1. Antecedentes del abastecimiento de agua potable.
2. Descripción del área de estudio.
3. Metodología para la evaluación geoquímica del agua y sedimentos.
4. Fisicoquímica del agua y mineralogía de sedimentos.
5. Geoquímica de elementos potencialmente tóxicos.
6. Correlación geoquímica ambiental de la presa El Realito.

Referencias.

Conclusiones.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

ATENTAMENTE



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR
DIRECCION

www.uaslp.mx

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

Ccp. Archivo
-bvlg

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



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

DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

Evaluación geoquímica de los sedimentos de la presa El Realito, sus afluentes y su impacto sobre la
calidad de agua

se realizó en el periodo septiembre de 2023 a septiembre de 2025 bajo la dirección del Dr. Cristóbal
Aldama Aguilera y del co-asesor Dr. Roberto Briones Gallardo.

Originalidad

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

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

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

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

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

El autor del trabajo escrito, María de los Ángeles Marmolejo Bravo

Mar,

formaste parte invaluable de esta etapa y siempre te estaré agradecida por todas las enseñanzas que me dejaste. Después de tu partida comprendí que lo que me esperaba no era vivir sin ti, sino aprender a vivir contigo, acompañándome desde otro lugar.

¡Gracias infinitas, te amo infinitamente!

Con mucho amor y cariño para ti.

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, en particular a los profesores del Posgrado en Tecnología y Gestión del Agua, por su apoyo, consejos y aliento, así como por permitirme formarme profesionalmente durante la maestría.

Al Instituto de Metalurgia, por brindarme el acceso a sus instalaciones para la realización de análisis en sus laboratorios, y a la A.M.M.I.M. Rosa Lina Tovar Tovar por su valioso apoyo en los análisis de DRX y MEB.

Al Laboratorio de Ciencias Ambientales de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la UASLP, y a su responsable M.E. Erika Judith Victorino Hernández, por permitirme el acceso y el uso de equipos e instalaciones.

Al Instituto de Geología y al L.Q. Miguel Ángel Cortina Rangel responsable del Laboratorio de Geología por su apoyo con análisis químicos.

Al Dr. Cristóbal Aldama Aguilera, muchas gracias por su confianza, apoyo constante y tiempo generosamente dedicado. Gracias por compartir su sabiduría y consejos, por creer en mi nuevamente, por confiar en mis capacidades, por considerar y respetar siempre mi opinión, y por brindarme la oportunidad de hacer realidad este proyecto; su influencia ha sido importante en mi crecimiento profesional.

Al Dr. Roberto Briones Gallardo, muchas gracias por aceptarme como su estudiante y compartir su conocimiento. Agradezco su enseñanza, paciencia y confianza, así como su disposición para resolver mis dudas, brindar sugerencias y por permitirme el acceso a su laboratorio, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Israel Razo Soto, por sus recomendaciones y colaboración en el proyecto.

Al Dr. Isidro Montes Ávila, por su apoyo, las clases rápidas y consejos durante el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Guillermo Javier Castro Larrogoitia y al Dr. Hermann Rocha Escalante, por su disposición y valiosa asesoría; y a la Dra. Marisol Gallegos García, por sus valiosos consejos y orientación.

A Jared Abdiel López Ramírez , por su apoyo en el laboratorio, colaboración en los muestreos en campo y por su amistad.

A mis compañeros de laboratorio de Remediación Ambiental: Marcos Benjamín Cruz Jiménez por su colaboración en laboratorio y en los muestreos de campo: y a Jazmín, Caro, Ángel y luz, por su apoyo.

A Gustavo Adolfo Pérez Alvis por su apoyo en los muestreos a campo.

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios. Gracias vida. Gracias universo.

A mi madre por su apoyo y amor.

A mi hermano Juan, a mis tíos Luciano y Isabel por siempre apoyarme, estar para mí cuando los necesito y por brindarme su cariño incondicional.

A mis sobrinos Cristian, Nayeli, Camila y Mateo, por su cariño y alegría.

A mis tías Chana y Nica por su apoyo y consejos.

A mi amiga Paty, por estar siempre a mi lado, por sus consejos y constante apoyo.

A mi amigo Rafa, por apoyo y comprensión en todo momento.

A Sonia, por sus valiosos consejos.

A mi abuela materna, María, gracias por permitirme hacer las cosas diferentes; te honro.

A Liz, gracias por coincidir conmigo en esta etapa; ha sido un placer conocerte y coincidir en este camino, honrando nuestros procesos. Te agradezco, te honro y honro tu proceso.

A mi guía Lili, muchas gracias por llegar a mi vida y acompañarme en este camino de aprendizaje y transformación. Te honro y honro tus procesos, así como a todo el grupo de mujeres que me acompañan, que con su apoyo respetan y enriquecen mi camino; celebro y respeto los suyos, tal como ellas honran el mío.

GRACIAS, GRACIAS, GRACIAS.

Resumen

La presa El Realito, ubicada en el municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato, sobre el cauce del río Santa María, fue construida para garantizar el abastecimiento de agua potable y mitigar la sobreexplotación del acuífero en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (ZMSLP). A nivel de cuenca, se identificaron 13 microcuencas que drenan hacia la presa, dentro de las cuales se ubican 162 sitios mineros metálicos (Sn, Ag, Pb, Zn, Cu, Au, Fe y Hg) y 41 sitios no metálicos (caolín, fluorita, calcita, fosforita y yeso), así como canales de descarga de aguas residuales y plantas de tratamiento sin operación. Con el objetivo de evaluar geoquímica y ambientalmente las características del agua y de los sedimentos, se realizaron muestreos en diversos puntos de la cuenca. En campo, se midieron parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, potencial óxido-reducción, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales con un potenciómetro multiparamétrico en el lecho de arroyos y ríos (álveo) en pozos superficiales sobre los cauces, donde se aprovechan aguas someras (subálveo), y presas dentro de la cuenca. El análisis de cationes se efectuó por ICP-OES, y los aniones (alcalinidad, cloruros, sulfatos, nitratos, fluoruros y arseniatos) mediante técnicas volumétricas y espectrofotométricas. En agua, se detectaron concentraciones de arseniato y fluoruros entre 0.04-1.05 mg/L y 0.83-10 mg/L, respectivamente. En sedimentos, las fracciones <63 μm y <38 μm fueron analizadas por FRX, encontrándose contenidos de arsénico entre 7.18-97.5 mg/kg. Las fracciones enriquecidas en elementos tóxicos se estudiaron por DRX y MEB, identificándose fases minerales como piritita, fluorita, calcita, cuarzo, silicatos y arcillas, con presencia de arsénico y flúor asociados superficialmente. Se evaluó la movilidad del arsénico y fluoruros con el método ASTM D3987-85. Los mayores índices de liberación se observaron en los primeros ciclos de lavado con agua meteórica, indicando alta solubilidad con valores cercanos o iguales a 1. El aporte estimado anual máximo fue de 3,154.2 mg As/año y 38,327.8 mg F⁻/año, dependiendo del sitio. El modelado geoquímico mediante diagramas Eh-pH (Geochemist's Workbench®) reveló que el arsénico predomina como HAsO₄²⁻ y H₃AsO₃, dependiendo del pH y Eh, mientras que el flúor se encuentra como F⁻, en equilibrio con la fluorita (CaF₂).

Palabras clave: arsénico, fluoruros, piritita, subálveo, álveo.

Tabla de contenido

Resumen	V
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XII
INTRODUCCIÓN-----	14
1. ANTECEDENTES DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE-----	16
1.1 Disponibilidad y problemática del recurso hídrico en México y San Luis Potosí	16
1.2 Dinámica del transporte de sedimentos y composición mineralógica en el ciclo hidrológico.....	19
1.3 Casos de transporte de sedimentos en sistemas fluviales	21
1.4 Abastecimiento de la presa El Realito a la Zona Metropolitana de San Luis Potosí .	21
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO -----	25
2.1 Localización.....	25
2.2 Clima	26
2.3 Uso de suelo y vegetación	27
2.4 Edafología.....	29
2.5 Hidrología.....	30
2.5.1 Agua superficial -----	30
2.5.2 Agua subterránea -----	32
2.5.3 Agua residual -----	33
2.6 Geología	38
2.6.1 Yacimientos minerales -----	40
Justificación	41
Hipótesis	42
Objetivos.....	43

General -----	43
Específicos -----	43
3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DEL AGUA Y SEDIMENTOS -----	44
3.1 Diseño de muestreo	44
3.2 Precipitación y coeficiente de escorrentía en la cuenca presa El Realito	47
3.3 Caracterización fisicoquímica del agua	50
3.3.1 Cuantificación de aniones -----	50
3.3.2 Cuantificación de cationes -----	52
3.4 Caracterización de los sedimentos	52
3.4.1 Fluorescencia de rayos X (FRX) -----	53
3.4.2 Difracción de rayos X (DRX) -----	54
3.4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB) -----	55
3.4.4 Movilidad simulando agua meteórica -----	55
3.4.5 Especiación geoquímica -----	56
3.5 Análisis estadístico	56
4. FISICOQUÍMICA DEL AGUA Y MINERALOGÍA DE SEDIMENTOS -----	58
4.1 Resultados del análisis de agua	58
4.1.1. Parámetros fisicoquímicos en campo y aniones en agua -----	58
4.1.2 Análisis de cationes en agua -----	65
4.2 Resultados del análisis de sedimentos	71
4.2.1 Concentraciones de elementos en los sedimentos por FRX -----	71
4.2.2 Caracterización mineralógica por DRX -----	79
4.2.3 Caracterización mineralógica por MEB -----	81
5. GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS -----	84

5.1 Distribución de metales y metaloides en agua y sedimentos	84
5.1.1 Agua-----	84
5.1.2 Sedimentos -----	91
5.2 Prueba de movilidad de arsénico (V) y fluoruros.....	94
5.2.1 Arsénico (V) -----	98
5.2.2 Fluoruros -----	102
5.3 Análisis de sedimentos después del lavado (post-lavado).....	104
6. CORRELACIÓN GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE LA PRESA EL REALITO	
106	
6.1 Correlación fisicoquímica y mineralógica.....	106
6.1.2 Correlación lineal de arsénico (V) con la conductividad eléctrica -----	109
6.1.3 Correlación lineal de fluoruros con la conductividad eléctrica -----	112
6.2 Dinámica Geoquímica de Arsénico y Fluoruro:.....	114
6.2.1 Índice de liberación de arsénico-----	114
6.2.2 Índice de liberación de fluoruros-----	115
6.2.3 Aportación de arsenico y fluoruros a la cuenca presa El Realito-----	116
6.3 Especiación geoquímica	119
6.3.1 Microcuenca Arroyo San José-----	121
6.3.2 Presa El Realito-----	123
CONCLUSIONES-----	127
RECOMENDACIONES -----	129
REFERENCIAS -----	130
ANEXOS -----	140

Índice de figuras

Figura 1. Comparación del porcentaje de usos del agua a nivel nacional y el estado de San Luis Potosí (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2021).....	17
Figura 2. Regiones hidrológicas y cuencas de las presas San José y El Realito (CONABIO, 2023).	22
Figura 3. Distribución de agua potable para la ciudad de San Luis Potosí (INTERAPAS, 2024)....	23
Figura 4. Imagen satelital de la potabilizadora El Realito (Google Earth, 2025).....	24
Figura 5. Municipios en la cuenca presa El Realito.	25
Figura 6. Fotografías de la Presa El Realito; A) cortina, B) vaso de la presa (diciembre 2023).....	26
Figura 7. Clima de acuerdo con la clasificación de Köppen en la cuenca presa El Realito (INEGI, 2021).	27
Figura 8. Uso de suelo y vegetación en la cuenca presa El Realito.	29
Figura 9. Edafología en la cuenca presa El Realito.....	30
Figura 10. Red hidrográfica de la cuenca presa El Realito.	31
Figura 11. Acuíferos y pozos en la Cuenca presa El Realito.	33
Figura 12. PTARs y canales de agua residual en la cuenca presa El Realito.....	35
Figura 13. Canal de agua residual en Villa de Zaragoza.....	36
Figura 14. a) Canal de agua residual sobre el cauce del río Santa María; b y c) PTAR en Santa María del Río.	36
Figura 15. PTAR en Villa de Reyes.....	37
Figura 16. PTAR en la localidad de Tierra Nueva.	38
Figura 17. PTAR en la localidad de El Fuerte.	38
Figura 18. Litología en la cuenca presa El Realito (SGM, 2024).	40
Figura 19. Yacimientos minerales metálicos y no metálicos en le cuenca presa El Realito (SGM, 2017).	41
Figura 20. Microcuencas en la cuenca presa El Realito.....	44
Figura 21. Microcuenca del Río Jofre.....	46
Figura 22. Puntos de muestreo en la cuenca presa El Realito.....	47
Figura 23. Potenciómetro multiparamétrico portátil.	50
Figura 24. Electrodo de fluoruro (izquierda) y espectrofotómetro (derecha).....	51
Figura 25. Formación de coloración azul en la determinación de arsénico (V).....	51
Figura 26. Equipo de espectrometría ICP-OES.....	52
Figura 27. a) Muestra homogenizada por cuarteo, b) Equipo ROTAP para análisis granulométrico, c) Fracciones granulométricas resguardadas en bolsas de polietileno.	53
Figura 28. Equipo de Fluorescencia de rayos X.....	54
Figura 29. Equipo de difracción de rayos X.....	54
Figura 30. Equipo de microscopia electrónica de barrido.....	55
Figura 31. Agitador rotativo (IKA Trayster Digital).....	56
Figura 32. Resultados de los valores Eh, OD, CE, T y Cl ⁻ en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito.....	60
Figura 33. Resultados de los valores pH, SDT, SO ₄ ²⁻ , alcalinidad medida (como mg CaCO ₃ /L) y N-NO ₃ ⁻ en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-2021.....	62
Figura 34. Resultados de los valores de fluoruros (F ⁻) en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-2021, correspondiente a 1 mg F/L.....	63

Figura 35. Resultados de los valores As (V) en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-2021, correspondiente a 0.010 mg As/L.....	64
Figura 36. Concentraciones en agua de Mn, Fe, Al, Ba, Cu y Pb en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. Las concentraciones se reportan en mg/L. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite permisible de la NOM-127-SSA1-2021, y la línea verde representa el límite de detección del equipo.	68
Figura 37. Concentraciones en agua de Hg en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. Las concentraciones se reportan en mg/L. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite permisible de la NOM-127-SSA1-2021 y la línea verde representa el límite de detección del equipo. 2021.....	69
Figura 38. ACP de los sitios de muestreo de agua en la cuenca de la presa El Realito.	70
Figura 39. ACP que muestra la asociación de elementos en agua de la cuenca de la presa El Realito.	71
Figura 40. Resultados de la concentración de Si, Ca, Fe, Mg Al y S en los sitios de muestreo respecto a la distancia de la cortina de la presa El Realito.	74
Figura 41. Resultados de la concentración de Cr, Ni, Ba y Pb en sedimentos respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito.....	75
Figura 42. Resultados de la concentración de arsénico en sedimentos respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. la línea roja es la concentración de referencia de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.	77
Figura 43. ACP de los sitios de muestreo de sedimentos en la cuenca de la presa El Realito.	78
Figura 44. ACP que muestra la asociación de elementos en sedimentos de la cuenca de la presa El Realito.	78
Figura 45. Micrografía de la muestra RV-1.2 y resultados de análisis EDS sobre el punto que ahí indica.	81
Figura 46. Micrografía de la muestra RV-2.1 y resultados de análisis EDS con presencia de tierras raras.	82
Figura 47. Micrografía de la muestra RV-2.5 y resultados de análisis EDS sobre el punto que ahí indica.	82
Figura 48. Resultados de la prueba de Tukey para pH en campo en muestras de agua comparando el tipo de agua. $n = 28$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.262$	85
Figura 49. Resultados de la prueba de Tukey para cloruros en muestras de agua comparando el tipo de agua. $n = 28$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.558$	85
Figura 50. Resultados de la prueba de Tukey para nitrógeno de nitratos en muestras de agua comparando el tipo de agua. $n = 23$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.475$	85
Figura 51. Resultados de la prueba de Tukey para cobre en muestras de agua comparando tipo de agua. $n = 23$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.322$	87
Figura 52. Resultados de la prueba de Tukey para plomo en muestras de agua comparando tipo de agua. $n = 23$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.453$	87
Figura 53. Subálveos en la cuenca presa El Realito. a, b y c) río Santa María; d) Tierra Nueva; e) Arroyo San José; f) Arroyo El Tigre.	90
Figura 54. Zonas de cultivos sobre el cauce del río Santa María regadas con agua de subálveo.....	91
Figura 55. Uso del agua en la ganadería. a) subálveo en el Arroyo El Tigre; b) presa El Refugio...	91
Figura 56. Resultados de la prueba de Tukey para bario en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 57$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.692$	93
Figura 57. Resultados de la prueba de Tukey para aluminio en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 56$; $\alpha = 0.05$, $p = 0.001$	93

Figura 58. Resultados de la prueba de Tukey para sílice en sedimentos comparando el tipo de agua. n = 57; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.009$.	93
Figura 59. Resultados de la prueba de Tukey para magnesio en sedimentos comparando el tipo de agua. n = 57; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.09$.	93
Figura 60. Resultados de la prueba de Tukey para azufre en sedimentos comparando el tipo de agua. n = 57; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.009$.	93
Figura 61. Litología y ubicación de los sitios de interés.	95
Figura 62. Concentraciones de arsénico en sedimentos de los sitios de interés respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito.	96
Figura 63. Litología y ubicación de los sitios de interés.	98
Figura 64. Resultados del agua meteórica y su relación con la concentración de arsénico (V) y conductividad eléctrica.	101
Figura 65. Resultados del agua meteórica y su relación con la concentración de fluoruros y conductividad eléctrica.	103
Figura 66. Correlación lineal de arsénico (V) con la conductividad eléctrica.	111
Figura 67. Correlación lineal de fluoruros con la conductividad eléctrica.	113
Figura 68. Índice de liberación de arsénico (V).	115
Figura 69. Índice de liberación de fluoruros.	116
Figura 70. Estaciones meteorológicas y precipitación estimada por el método de isoyetas en la cuenca presa El Realito. (Servicio Meteorológico Nacional (SMN)-Conagua, 2024).	117
Figura 71. Diagrama de arsénico de Rancho Viejo-2.4 de Eh vs pH.	122
Figura 72. Diagrama de flúor en Rancho Viejo-2.4 de Eh vs pH.	123
Figura 73. Diagrama para el sistema AsO_4 en la presa El Realito de Eh vs pH.	125
Figura 74. Diagrama de Eh vs pH para el sistema F^- en la presa El Realito.	126

Índice de tablas

Tabla 1. Características principales de las presas que abastecen a la ZMSLP. -----	22
Tabla 2. Descripción del uso de suelo y vegetación en la cuenca presa El Realito. -----	28
Tabla 3. Principales presas en la cuenca presa El Realito (INEGI, 2002; DOF, 2018). -----	32
Tabla 4. Litología en la cuenca presa El Realito. -----	39
Tabla 5. Microcuencas en la Presa El Realito. -----	45
Tabla 6. Precipitaciones medias anuales de las estaciones meteorológicas. -----	48
Tabla 7. Tamices utilizados para el análisis de granulometría. -----	53
Tabla 8. Claves de sitios de muestreo de agua y su distancia hacia la cortina de la presa El Realito. RSM (río Santa María). -----	58
Tabla 9. Estadística de los parámetros fisicoquímicos de agua en la cuenca presa El Realito y prueba de normalidad (valor de p) de Shapiro-Wilk's ($\alpha=0.05$; $n=28$). -----	59
Tabla 10. Registros de los valores promedio de las concentraciones en agua de parámetros fisicoquímicos y aniones en solución en la presa y potabilizadora El Realito. -----	65
Tabla 11. Concentraciones de metales y metaloides en agua en la cuenca presa El Realito y prueba de normalidad (valor de p) de Shapiro-Wilk's ($\alpha=0.05$). -----	66
Tabla 12. Registros de los valores promedio de las concentraciones en agua de metales en la presa y potabilizadora El Realito (Cardona Benavides et al., 2016). -----	69
Tabla 13. Claves de sitios de muestras de sedimentos y su distancia a la cortina de presa El Realito. -----	71
Tabla 14. Resultados de concentraciones de metales y metaloides en sedimentos en la cuenca presa El Realito y prueba de normalidad (valor de p) de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0.05$). -----	73
Tabla 15. Límites permisibles para metales en sedimentos establecidos por la NOM-147- SEMARNAT/SSA1-2004, ISQG y PEL. (Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999). -----	76
Tabla 16. Fases cristalinas y su abundancia relativa en los sitios de interés. -----	79
Tabla 17. Proporciones atómicas de elementos en la muestra RV-1.2. -----	81
Tabla 18. Proporciones atómicas de elementos en la muestra RV-1.2 con contenido de tierras raras. -----	82
Tabla 19. Proporciones atómicas de elementos en la muestra RV-2.5. -----	83
Tabla 20. Valores promedio de los paramétricos fisicoquímicos comparando con el tipo de agua. -----	84
Tabla 21. Resultados del valor de p al comparar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos de tipo de agua en la cuenca presa El Realito con el método de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$). -----	86
Tabla 22. Valores promedio de las concentraciones de metales y metaloides comparando con el tipo de agua. -----	86
Tabla 23. Resultados del valor de p al comparar las concentraciones de metales y metaloides en agua en la cuenca presa El Realito con el método de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$). -----	87
Tabla 24. Localidades remotas ubicadas en la Sierra Madre Oriental (este de la cuenca) en los municipios de Santa María del Río y Tierra Nueva. -----	89
Tabla 25. Valores promedio de las concentraciones de metales y metaloides en sedimentos según el tipo de agua. -----	92
Tabla 26. Resultados del valor de p al comparar las concentraciones de metales y metaloides en sedimentos en la cuenca presa El Realito con el método de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$). -----	94
Tabla 27. Resultados de las concentraciones promedio de metales y metaloides en sedimentos en los sitios de interés. RSM (río Santa María). -----	96
Tabla 28. Valores obtenidos de pH y conductividad eléctrica iniciales en cada lavado con agua meteórica. -----	99
Tabla 29. Valores obtenidos de pH y conductividad eléctrica finales en cada lavado con agua meteórica. -----	100

Tabla 30. Resultados de las concentraciones promedio de metales y metaloides en sedimentos después de los lavados con agua meteórica. RSM (río Santa María). -----	105
Tabla 31. Fases cristalinas y su abundancia relativa en los sitios de interés después del agua meteórica. -----	107
Tabla 32. Correlación lineal de arsénico (V) con la conductividad eléctrica. Ecuación ($y = a + b \cdot x$); a = intercepción con el eje y; b = pendiente. -----	110
Tabla 33. Correlación lineal de fluoruros con la conductividad eléctrica. Ecuación ($y = a + b \cdot x$); a = intercepción con el eje y; b = pendiente. -----	112
Tabla 34. Contribución de arsénico de los sitios Rancho Viejo, río Santa María y presa El Realito. -----	118
Tabla 35. Contribución de fluoruros de los sitios Rancho Viejo, río Santa María y presa El Realito. -----	119
Tabla 36. Valores de los parámetros fisicoquímicos y de las concentraciones de elementos traza y mayoritarios en agua de RV-2.4 y de la presa El Realito. -----	121

INTRODUCCIÓN

Una cuenca hidrológica se define como una unidad del territorio normalmente delimitada por agua, en donde el agua ocurre en distintas formas, y se almacena o fluye hasta un punto de salida como el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal. La unidad básica de gestión de los recursos hídricos está constituida por la cuenca hidrológica. Una cuenca hidrológica está constituida por subcuencas y estas a su vez por microcuencas (DOF, 2023). En el estado de San Luis Potosí, la hidrología se organiza principalmente en tres regiones: la Región Hidrológica 26 (Pánuco); la Región Hidrológica 37 (El Salado); y una pequeña parte de la Región Hidrológica 12 (Lerma-Santiago) (INEGI, 2002).

El río Santa María, uno de los principales afluentes de la RH-26, nace en Santa María Río, San Luis Potosí y una parte de su recorrido sirve como límite natural entre Guanajuato y Querétaro. Sobre su cauce se localiza la presa El Realito, infraestructura hidráulica construida para abastecer de agua potable a la Zona Metropolitana de San Luis Potosí. Esta presa forma parte de una cuenca donde convergen importantes afluentes, entre ellos los ríos y arroyos Altamira, El Chiquito, Santa María, Villela, Jofre, entre otros (INEGI, 2023).

La presencia de metales y metaloides en el agua superficial depende de una combinación de factores naturales (como la mineralogía y geoquímica de las rocas) y antrópicos (como la minería, el uso agrícola e industrial del suelo, y las descargas de aguas residuales). Estos elementos pueden estar disueltos en la columna de agua o asociados a partículas en suspensión, y su comportamiento está condicionado por variables fisicoquímicas como el pH, las condiciones redox, la solubilidad de los compuestos y la presencia de materia orgánica (O'Sullivan & Reynolds, 2003). Además, el transporte de estos elementos puede verse amplificado por los procesos hidrológicos y geomorfológicos que movilizan sedimentos a lo largo de la cuenca.

El transporte físico de sedimentos en ríos está fuertemente influenciado por el tamaño de partícula. Las partículas más gruesas, como arena y grava, tienden a desplazarse por rodamiento o saltación sobre el lecho del río, recorriendo distancias cortas. En contraste, las partículas finas, como los limos y arcillas, pueden mantenerse en suspensión durante

periodos prolongados y ser transportadas a lo largo de grandes distancias antes de sedimentar (Smith & Huyck, 1999). Este comportamiento es relevante para la dispersión de contaminantes metálicos, ya que los metales tienden a adsorberse con mayor afinidad a las fracciones granulométricas más finas (Smith & Huyck, 1999).

La actividad minera, en estados como Guanajuato y San Luis Potosí, cuentan con una larga tradición extractiva. Guanajuato se ha destacado por su auge minero desde la época colonial principalmente como un gran productor de oro y plata (INEGI, 1980), mientras que San Luis Potosí ha explotado por más de 400 años minerales metálicos y no metálicos como oro, cobre, plata, zinc, plomo, fluorita, yeso y azufre (INEGI, 1985).

Las características geológicas de un yacimiento, como la mineralogía, la geoquímica y la litología de la roca huésped, son fundamentales para clasificar depósitos minerales y entender sus impactos ambientales (Plumlee & Logsdon, 1999). La caracterización mineralógica y el análisis químico en sedimentos son herramientas clave para predecir, mitigar y remediar los efectos ambientales de la minería. Los minerales primarios, ya sean mena o ganga, pueden liberar elementos tóxicos al medio ambiente a través de procesos de meteorización. Estas reacciones pueden generar o neutralizar acidez, lo cual influye directamente en la solubilidad de los metales. Por otro lado, los minerales secundarios, formados como productos de alteración, pueden actuar como sumideros temporales o permanentes de metales, dependiendo de las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad y el pH (Hammarstrom & Smith, 2002). La caracterización mineralógica de los sedimentos es, por tanto, una herramienta clave para anticipar y mitigar los impactos ambientales de origen minero.

El modelado geoquímico es clave para entender la movilidad y toxicidad de elementos en medios naturales, ya que estas dependen de las especies químicas presentes, determinadas por factores como el pH, las condiciones redox, la solubilidad y procesos como la complejación o la adsorción (Bychinsky et al., 2021). Geochemist's Workbench (GWB) es una herramienta ampliamente utilizada para simular estos procesos, permitiendo evaluar cómo interactúan los elementos bajo diferentes condiciones (Montes-Ávila, 2019).

1. ANTECEDENTES DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

1.1 Disponibilidad y problemática del recurso hídrico en México y San Luis Potosí

El agua es un recurso esencial para la vida y para el desarrollo de las actividades humanas, económicas y ambientales. A nivel mundial, se estima que existen aproximadamente 1,400 millones de km³ de agua, de los cuales solo el 2.5% corresponde al agua dulce, distribuida en ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos. De esta fracción, el 68.7% se encuentra en glaciares y mantos de hielo, el 30% en aguas subterráneas, el 0.8% como permafrost y únicamente el 0.4% constituye agua superficial disponible (SEMARNAT, 2018). En México, el volumen de agua dulce renovable es de aproximadamente 461,640 millones de m³, con una disponibilidad promedio de 3,692 m³ por habitante (INEGI, 2025), aunque esta distribución es desigual. El sureste del país concentra el 67% del recurso, mientras que el resto, incluido San Luis Potosí, recibe solo el 33%.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), una persona requiere entre 50 y 100 litros diarios para cubrir necesidades básicas, pero en México el consumo promedio alcanza 366 litros per cápita diarios (ONU, 2010; PROFECO, 2024). Durante 2023, el país registró 1,464,734 millones de m³ de precipitación anual, de los cuales solo el 22% escurren superficialmente y el 6.3% recarga acuíferos. Los principales usos de agua por sector corresponden a agricultura, ganadería y acuacultura (75.7%), abastecimiento público (14.7%), industria autoabastecida (5%) y centrales termoeléctricas (4.6%) como se muestra en la Figura 1 y se compara el porcentaje con el estado de San Luis Potosí (INEGI, 2025).

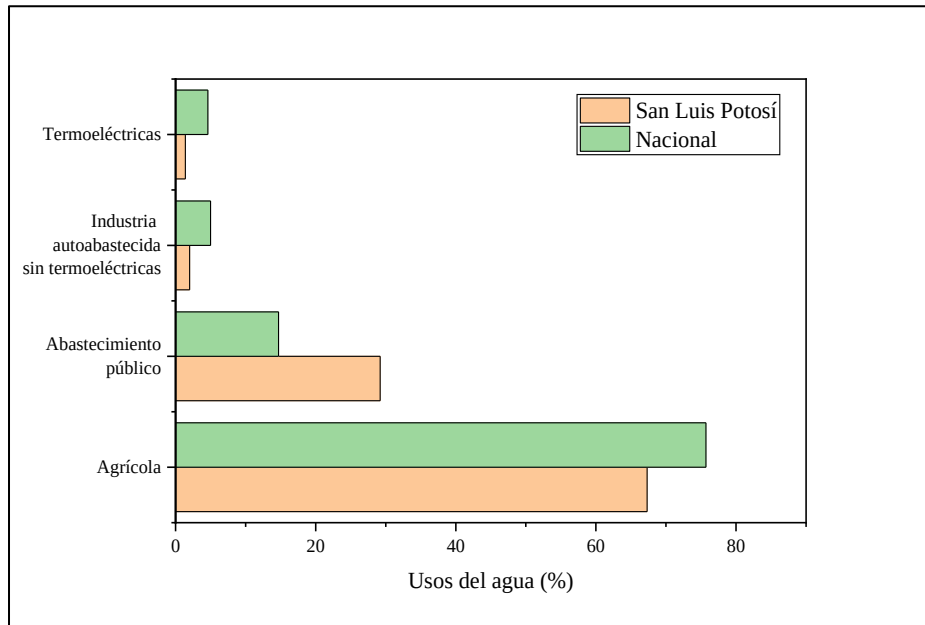


Figura 1. Comparación del porcentaje de usos del agua a nivel nacional y el estado de San Luis Potosí (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2021).

El estado de San Luis Potosí, ubicado en el centro-oriente de México, presenta condiciones hidroclimáticas contrastantes debido a su diversidad geográfica y fisiográfica. Está dividido en cuatro regiones socioeconómicas: Altiplano, Centro, Zona Media y Huasteca, las cuales presentan diferencias marcadas en cuanto a disponibilidad hídrica.

- En el Altiplano, predominan climas secos y desérticos, con una precipitación anual entre 300 y 400 mm, lo que limita el aprovechamiento de aguas superficiales (Alfaro de la Torre et al., 2021).
- La región Centro, con climas semisecos templados, presenta temperaturas entre 16 y 20 °C y precipitaciones entre 100 y 577 mm anuales (Contreras Servín, 2019).
- En la Zona Media, con clima cálido subhúmedo, la precipitación varía entre 500 y 1200 mm al año, predominando el uso de aguas subterráneas (Alfaro de la Torre et al., 2021).
- Finalmente, la región Huasteca presenta climas cálidos y húmedos, con precipitaciones que pueden superar los 3,000 mm anuales, concentrando la mayor disponibilidad de agua del estado (INEGI, 2002).

Actualmente, el 65% del agua utilizada en San Luis Potosí proviene de fuentes superficiales y el 35% de acuíferos. Sin embargo, 8 de los 19 acuíferos del estado presentan sobreexplotación, entre ellos el acuífero de San Luis Potosí y el de Santa María del Río (Gobierno de San Luis Potosí, 2021). El sector agrícola es el mayor consumidor de agua, seguido del abastecimiento público, pero se enfrentan a pérdidas significativas, de hasta el 50% del agua extraída, además de problemas de contaminación y deficiencias en la cobertura de servicios básicos (Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 2021).

Históricamente, el abastecimiento de agua en la ciudad se basaba en manantiales y pozos domiciliarios. En el siglo XVIII, los ríos Santiago y Españita se usaban para riego. Posteriormente, se construyeron infraestructuras hidráulicas como el acueducto de La Cañada del Lobo (1824) y las presas San José, El Peaje y El Potosino, que ampliaron y mejoraron el suministro de agua potable y control de avenidas (Hernández & Betancourt, 2015; Espinosa, 2000).

De acuerdo a un estudio sobre la gestión del agua, realizado por INTERAPAS en el 2011, se informó sobre la sobreexplotación del acuífero Valle de San Luis Potosí en una proporción 1 a 2, con una profundidad del acuífero que descendía entre 1 a 4 metros por año, y perforaciones de nuevos pozos a profundidades mayores a 700 metros, provocando altos costos de inversión, mantenimiento y operación. También se informó sobre la **presencia de fluoruros por arriba del límite máximo permisible de la NOM-127-SSAI-1994**, situación derivada de la disminución de agua subterránea. Las medidas tomadas por INTERAPAS para la resolución de ese problema, fue la mezcla de agua de pozos con altas concentraciones de flúor con agua de pozos sin presencia de flúor y agua del sistema de presas (San José, El Peaje y El Potosino), con la finalidad de diluir y disminuir los niveles de flúor, la otra medida era la incorporación del agua proveniente de la presa El Realito que llevaría a solucionar la problemática de flúor dejando de operar pozos con altos niveles.

El flúor es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre, presente en minerales como fluorita, criolita y fluorapatita. Puede liberarse al ambiente tanto por procesos naturales (meteorización, emisiones volcánicas) como por actividades humanas (producción de fertilizantes fosfatados, fabricación de aluminio, quema de carbón). En el agua potable, la exposición prolongada a concentraciones entre 3 y 6 mg/L puede ocasionar fluorosis

esquelética (OMS, 2019). En San Luis Potosí, estudios realizados entre 1987 y 2007 identificaron un incremento del 85% en el contenido de flúor en el acuífero, atribuido a la interacción agua-roca con riolitas locales durante la sobreexplotación del recurso (Cardona et al., 2018).

El arsénico (As), aunque en menor proporción en la corteza terrestre (0.0005%), también representa un contaminante relevante. Su origen puede ser natural (meteorización, emisiones volcánicas) o antrópico (minería, fundición de metales, uso de biocidas). En el ambiente acuático, su toxicidad depende de la especie química: el arsenito [As(III)], en condiciones reductoras, es 60 veces más tóxico que el arseniato [As(V)], presente en ambientes más oxidados (Bundschuh et al., 2008). El As(III) es una especie neutra y soluble hasta un pH menor a 10, mientras que el As(V) puede encontrarse en distintas formas protonadas según el pH de la solución.

Los niveles de arsénico son menores en aguas superficiales (mares, ríos y lagos) y más elevados en aguas subterráneas, especialmente en zonas con rocas volcánicas o depósitos minerales ricos en As. En suelos y sedimentos, las concentraciones también aumentan en presencia de fuentes de contaminación natural o antropogénica. La ingesta prolongada de agua contaminada puede causar hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), una enfermedad que se manifiesta inicialmente en la piel (melanodermia, leucodermia, queratosis) y puede evolucionar a tipos de cáncer.

En un estudio reciente del acuífero del Valle de San Luis Potosí, se detectaron concentraciones de As entre 0.01 y 0.126 mg/L, superando los límites permisibles en algunos puntos. Estas concentraciones se han asociado a la liberación de As desde jales mineros, remanentes de antiguas explotaciones, así como al uso de fertilizantes con compuestos arsenicales (Torres-Rivera et al., 2023).

1.2 Dinámica del transporte de sedimentos y composición mineralógica en el ciclo hidrológico

El ciclo del agua y el ciclo de las rocas están íntimamente conectados, ya que el agua es un agente clave en la meteorización, transporte y deposición de sedimentos, que eventualmente

forman nuevas rocas. Una parte del agua de lluvia se infiltra en el subsuelo, llenando poros y fisuras; si esta cantidad es significativa, recarga los acuíferos. En cambio, si la infiltración es limitada, el agua permanece como humedad del suelo, desde donde vuelve a la atmósfera por evapotranspiración. Otra fracción del agua fluye sobre la superficie como escorrentía, formando arroyos y ríos que desembocan en lagos, embalses o mares (Campos Aranda, 1998; Tarbuck et al., 2005).

Este flujo superficial es el principal agente geológico de erosión, ya que arrastra enormes cantidades de material meteorizado. Los ríos transportan sedimentos de tres formas: carga disuelta (iones y compuestos solubles), carga suspendida (partículas finas como arcilla y limo), y carga de fondo (granos más gruesos que ruedan o saltan por el lecho del cauce) (Tarbuck et al., 2005). En este contexto, se definen elementos importantes como el álveo, que es el lecho del río o arroyo; el subálveo, correspondiente al agua subterránea justo debajo del cauce pero que se encuentra en los niveles superiores del acuífero, donde se perforan pozos superficiales que explotan aguas subterráneas someras y que han sido una alternativa de relativamente bajo costo y tecnología simple para el abastecimiento de agua donde no hay o donde son insuficientes las aguas superficiales (Chávez et al., 2013). Las presas son estructuras construidas para almacenar agua con fines de abastecimiento, riego o control de avenidas (UNAM, Instituto de Geografía, 2011; CENAPRED, 2025).

Las rocas ígneas se originan por el enfriamiento y solidificación del magma, mientras que las sedimentarias provienen de la acumulación de sedimentos generados por la meteorización física y química de otras rocas. Las ígneas están compuestas casi en su totalidad por minerales silicatos, que constituyen más del 90 % de la corteza terrestre. Estos minerales contienen silicio y oxígeno, junto con cationes como Al, Ca, Na, K, Fe y Mg (Tarbuck et al., 2005).

Entre los silicatos, los feldespatos son especialmente abundantes y se caracterizan por una estructura tridimensional donde átomos de silicio comparten oxígeno, sustituidos parcialmente por aluminio. Los feldespatos incluyen minerales como la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y los feldespatos potásicos, como la ortoclasa y la microclina, que contienen potasio en su estructura. La meteorización de estos minerales da lugar a minerales arcillosos, como la caolinita, que poseen estructura laminar y grano muy fino (Tarbuck et al., 2005).

1.3 Casos de transporte de sedimentos en sistemas fluviales

Un estudio realizado por Escot-Espinoza et al. (2021) evaluaron el impacto de residuos mineros en cuerpos de agua cercanos a la mina La Aurora, en Guanajuato, incluyendo arroyos como Xichú, La Laja, y el río Santa María. Se detectaron concentraciones elevadas de As, Hg y Tl que superan los límites internacionales para agua potable. El arsénico presente en el manantial El Ojo de Agua se asoció con la disolución de fases minerales secundarias presentes en sedimentos, producto de la alteración de los jales, transportadas por escurrimientos superficiales. Estas partículas finas con arsénico se transportaron a lo largo del arroyo Xichú hasta alcanzar el manantial, donde pueden disolverse fácilmente al entrar en contacto con el agua. El estudio sugiere que estas concentraciones se atribuyen a la meteorización de desechos mineros, así como a fuentes naturales asociadas a interacciones de agua de lluvia y rocas ígneas.

En el estudio de Burillo et al. (2017) analiza extractos acuosos de lixiviados mineros y sedimentos de arroyo en la microcuenca Cerro San Pedro, en San Luis Potosí, mostrando que las concentraciones de arsénico y metales en los sedimentos son significativamente menores que en los lixiviados, lo que refleja una limitada capacidad de retención. Sugiere que los sedimentos actúan en un proceso de atenuación natural, donde minerales como cuarzo, calcita, albita y montmorillonita ayudan a retener o estabilizar ciertos elementos. En contraste, los residuos mineros contienen fases secundarias como yeso y jarosita, que liberan arsénico y metales bajo condiciones ácidas. Identificaron también procesos de disolución de minerales carbonatados y sulfatados en los sedimentos, mientras que en los lixiviados ocurrían reacciones de precipitación de arseniatos y sulfatos metálicos. Además, mencionan que las condiciones redox y de pH favorecen la formación de fases como jarosita, realgar y arsenopirita, las cuales influyen en la movilidad o retención del arsénico en el sistema.

1.4 Abastecimiento de la presa El Realito a la Zona Metropolitana de San Luis Potosí

Las principales fuentes de abastecimiento hídrico para los habitantes de la ZMSLP son el acuífero del Valle de San Luis Potosí, así como las presas El Peaje, San José y El Potosino, en la Región Hidrológica El Salado, y El Realito en la Región Hidrológica El Panuco (Tabla 1 y Figura 2).

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 1. Características principales de las presas que abastecen a la ZMSLP.

Nombre de la presa	Municipio	Corriente principal	Región hidrológica
El Peaje	San Luis Potosí	Río Santiago	El Salado
San José		Arroyo El Potosino	
El Potosino			
El Realito	San Luis de la Paz	Río Santa María	Pánuco

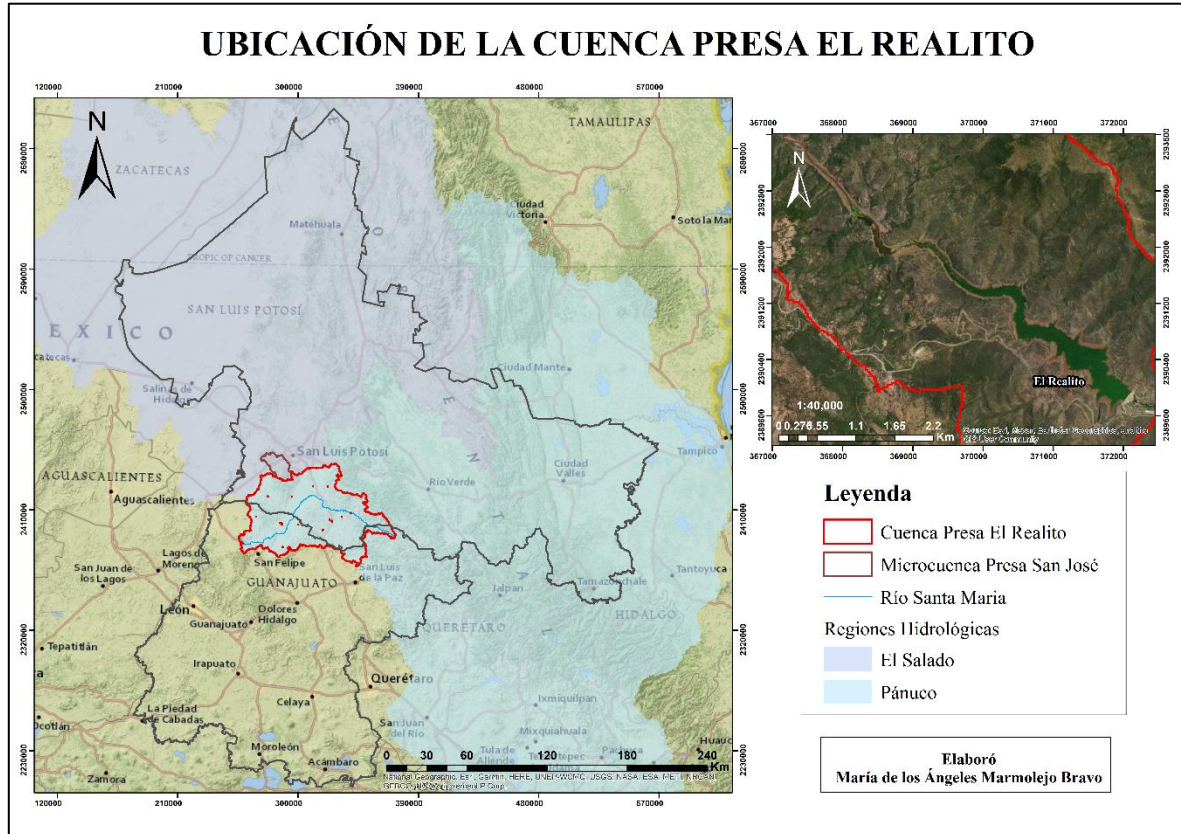


Figura 2. Regiones hidrológicas y cuencas de las presas San José y El Realito (CONABIO, 2023).

La presa El Realito se construyó con una capacidad de 50 millones de m³, el sistema cuenta con un acueducto, tres estaciones de bombeo, un tanque de cambio de régimen, una planta potabilizadora y seis tanques de regulación y distribución, y con un suministro de 2,000 L/s para San Luis Potosí y Guanajuato. El programa entró en vigor el 9 de enero del 2015.

El acueducto El Realito tiene la capacidad para conducir 1 m³/s desde la potabilizadora hasta los tanques de recepción que se encuentran en la ciudad de San Luis Potosí para su posterior

distribución. De acuerdo con el informe anual de INTERAPAS (2023), el acueducto El Realito suministró un promedio de 460 L/s con un área de beneficios de 80,600 viviendas con una población de 280,000 habitantes promedio en la ciudad de San Luis Potosí. El suministro de agua potable continuo no fue factible por las diversas fallas en el acueducto padeciendo por un periodo mayor a 78 días sin abastecimiento de agua, lo que conllevó a una deficiencia en el suministro que se mitigó con el suministro de pipas de agua que extrae agua de los pozos, lo que provoca una afectación paulatinamente mayor.

La distribución de agua potable en la zona urbana del municipio de San Luis Potosí, se realiza mediante cuatro zonas geográficas Norte, Centro-Sur, Oriente y Poniente como se muestra en la Figura 3.

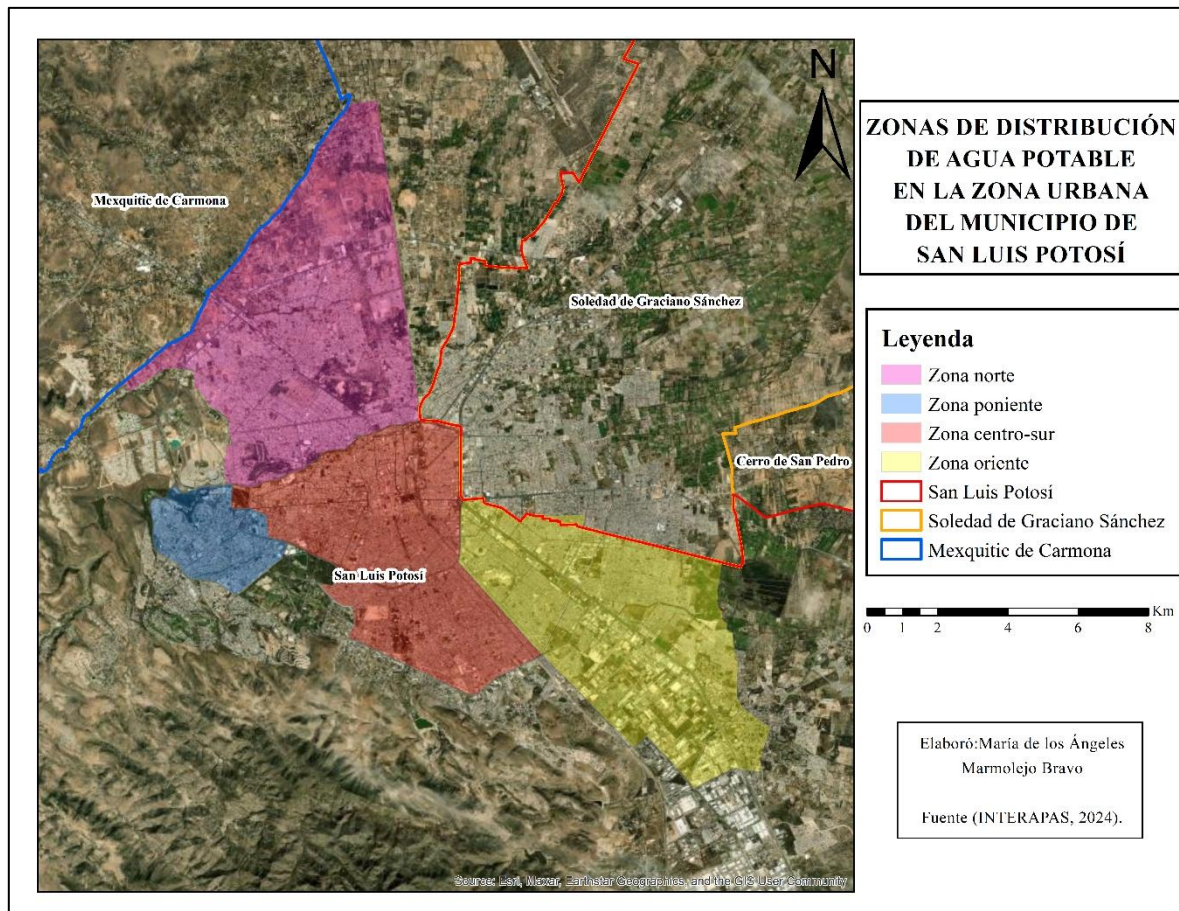


Figura 3. Distribución de agua potable para la ciudad de San Luis Potosí (INTERAPAS, 2024).

Durante el 2024 estuvieron en operación 140 pozos y 86 estaciones de rebombeo de agua potable en la ZMSLP, de los cuales, 93 pozos profundos se encuentran en el municipio de San Luis Potosí. En las estaciones de rebombeo se inyectó a la red de distribución agua subterránea de los pozos profundos con el agua superficial de las presas San José, El Potosino y El Realito. La presa El Realito reinicio actividades en agosto del 2024.

La potabilizadora El Realito (Figura 4) cuenta con 2 tanques de para la recepción del agua cruda de 5,050 m³ cada uno. Para la potabilización del agua proveniente de la presa El Realito se utiliza un proceso de clarificación convencional que incluye las etapas de coagulación, floculación, sedimentación, filtración y dual-desinfección (Aqualia, 2024). En la coagulación, se añaden productos químicos (generalmente sales de aluminio o hierro) que neutralizan las cargas de partículas coloidales, permitiendo su desestabilización. Luego, en la floculación, se aplica agitación lenta para favorecer que las partículas desestabilizadas se unan y formen flóculos más grandes. En la sedimentación, estos flóculos se separan del agua por efecto de la gravedad, produciendo un efluente más claro. La filtración elimina impurezas restantes mediante el paso del agua a través de un medio poroso, contribuyendo también a mejorar el color, sabor y olor. Finalmente, en la desinfección, se aplican agentes químicos como el cloro para eliminar microorganismos patógenos; este método es eficaz y económico, aunque puede generar subproductos potencialmente nocivos como los trihalometanos (SEMARNAT, 2015; EPA, 1999).

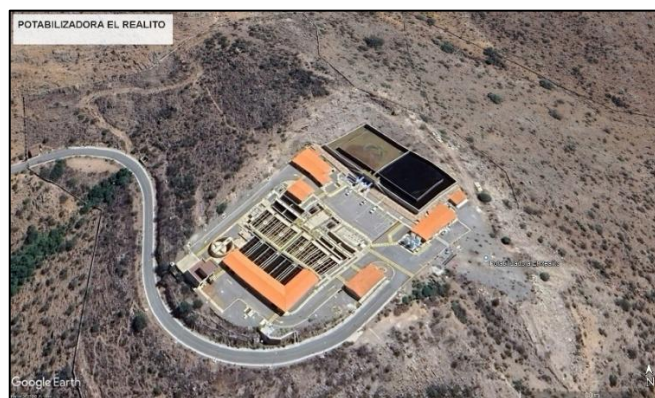


Figura 4. Imagen satelital de la potabilizadora El Realito (Google Earth, 2025).

2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Localización

La cuenca de la presa El Realito abarca, para el estado de San Luis Potosí, partes de los municipios de Villa de Arriaga, San Luis Potosí, Villa de Zaragoza, Villa de Reyes, Santa María del Río y Tierra Nueva, para el estado de Guanajuato parte de Ocampo, San Felipe, San Diego de la Unión y San Luis de la Paz (Figura 5). Las principales localidades dentro de la cuenca presa El Realito son Villa de Zaragoza, Villa de Reyes, Santa María del Río y Tierra Nueva. La presa El Realito se ubica en el municipio de San Luis de la Paz, Guanajuato y está construida sobre el cauce del río Santa María (Figura 6).

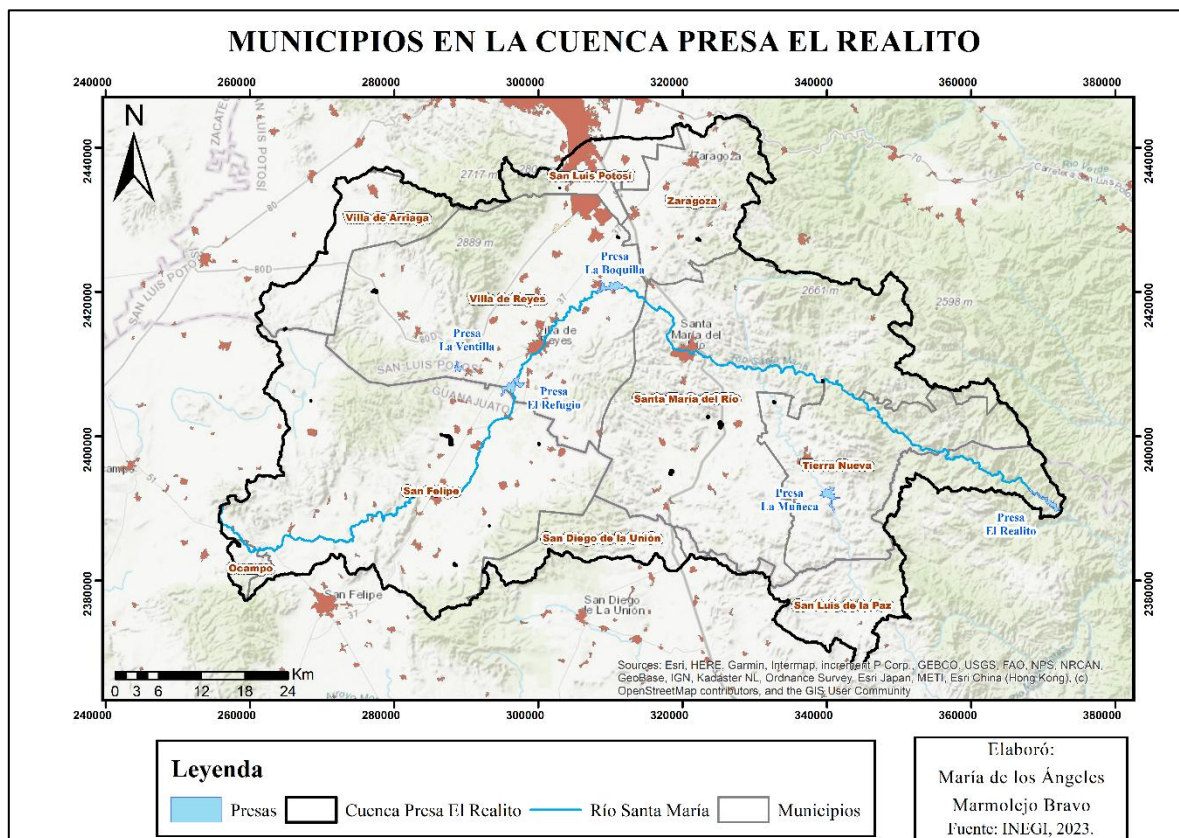


Figura 5. Municipios en la cuenca presa El Realito.

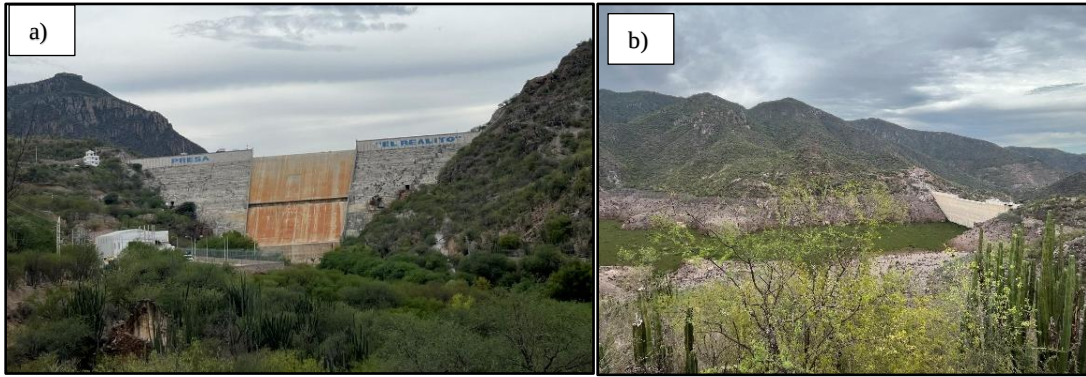


Figura 6. Fotografías de la Presa El Realito; A) cortina, B) vaso de la presa (diciembre 2023).

2.2 Clima

De acuerdo a la clasificación climática de Wladimir Köppen (1936), modificada por Enriqueta García (1964) e INEGI (1980), en la cuenca presa El Realito predomina el clima semiseco templado (BS1kw) seguido de seco templado (BS0kw), seco semicálido (BS0hw), semiseco semicálido (BS1hw) y en menor proporción el templado subhúmedo (C(w0)) como se muestra en la Figura 7. Los climas seco templado y semiseco templado se caracterizan por un verano cálido con temperaturas medias anuales de 12° a 18°C y el mes más frío entre 3° y 18°C con lluvias en verano; los climas seco semicálido, semiseco semicálido presentan un invierno fresco con temperaturas medias anuales de 18° a 22 °C con el mes más frío temperaturas menores a 18 °C; y templado subhúmedo presenta temperaturas medias anuales entre 12° y 18°C. La presa El Realito presenta un clima semiseco semicálido (INEGI, 2021).

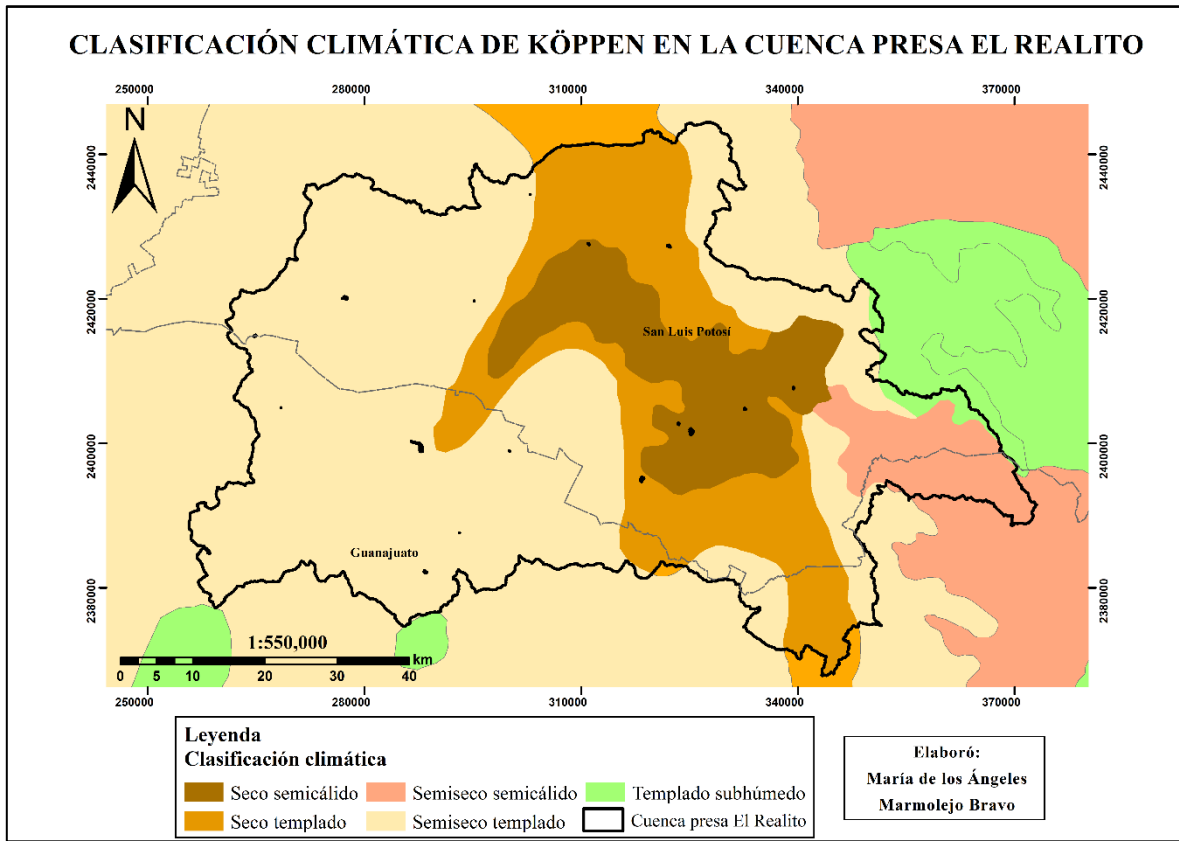


Figura 7. Clima de acuerdo con la clasificación de Köppen en la cuenca presa El Realito (INEGI, 2021).

2.3 Uso de suelo y vegetación

De acuerdo con INEGI (2017), la mayor cobertura presente en la cuenca es pastizal natural (19.46%) seguido por matorral crasicaule (19.11%), agricultura de temporal anual (10.34%), vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural (10.13%) y bosque de encino (7.28%). La presa El Realito se encuentra sobre un tipo de vegetación de matorral submontano (Tabla 2 y Figura 8).

En el pastizal natural es predominado por especies de gramíneas y graminoides acompañadas de hierbas y arbustos y que en ocasiones se pueden acompañar por especies de diferentes familias de leguminosas, su principal área de distribución se encuentre en la zona de transición entre matorrales xerófilos y diversos tipos de bosques, de preferencia se desarrolla en suelos mediamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

siempre sobre formaciones de roca ígnea, altitudes entre 1,100 y 2,500, también se consideran suelos fértiles mediamente ricos en materia orgánica que se erosionan con facilidad cuando se encuentran en declive y con poca vegetación. El matorral submontano se encuentra entre laderas, cañadas y partes altas ya sean planas o con pendiente, mesetas y lomeríos, con altitudes entre 1,500 y 1,700 m, el suelo es muy delgado y poco desarrollado constituido por material suelto semejante a la roca, por lo que es común encontrar plantas creciendo sobre rocas (INEGI, 2017;).

Tabla 2. Descripción del uso de suelo y vegetación en la cuenca presa El Realito.

Descripción	Clave	Área (km ²)	%
Desprovisto de vegetación	DV	2.73	0.05
Asentamientos humanos	AH	74.92	1.49
Bosque de táscate	BJ	27.29	0.54
Bosque de pino	BP	366.99	7.28
Bosque de pino-encino	BPE	32.29	0.64
Bosque de encino	BQ	97.98	1.94
Bosque de encino-pino	BQP	61.43	1.22
Sin vegetación aparente	DV	1.37	0.03
Cuerpo de agua	H ₂ O	26.15	0.52
Matorral crasicaule	MC	963.28	19.11
Mezquital xerófilo	MK	3.09	0.06
Matorral submontano	MSM	42.05	0.83
Pastizal inducido	PI	313.48	6.22
Pastizal natural	PN	980.75	19.46
Agricultura de riego anual	RA	29.86	0.59
Agricultura de riego anual y permanente	RP	6.29	0.12
Agricultura de riego anual y semipermanente	RAS	256.74	5.09
Agricultura de riego semipermanente	RSP	2.79	0.06
Agricultura de temporal anual	TA	521.14	10.34
Agricultura de temporal anual y permanente	TAP	5.04	0.10
Vegetación halófila xerófila	VH	3.78	0.08
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	Vsa_BJ	33.72	0.67
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	Vsa_BP	252.99	5.02
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	Vsa_BPQ	18.03	0.36
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	Vsa_BQ	113.93	2.26
Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	VSA_BQ	0.25	0.01
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	Vsa_BQP	31.85	0.63
Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	VSa_MC	240.66	4.77
Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	VSa_MDM	7.51	0.15
Vegetación secundaria arbustiva de mezquital xerófilo	VSa_MKX	11.37	0.23
Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	VSa_PN	510.34	10.13
Total		5040.09	100

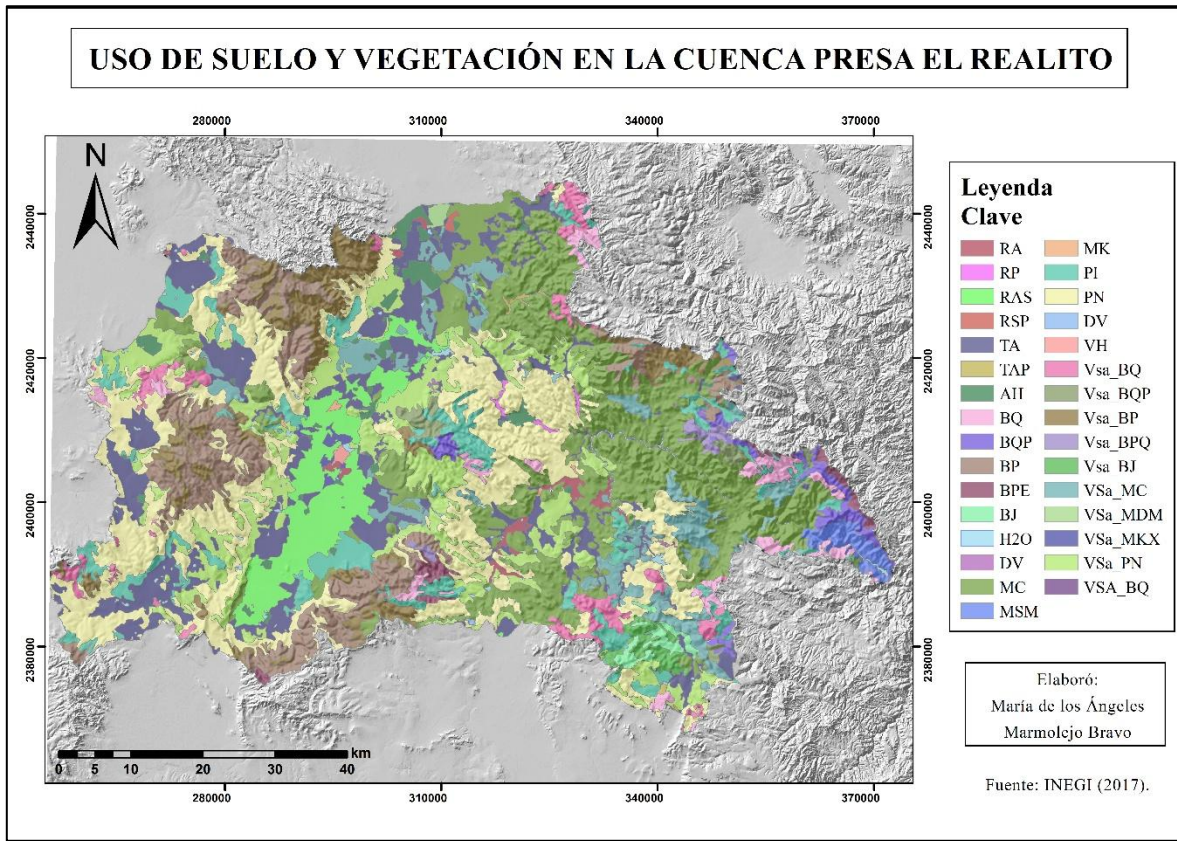


Figura 8. Uso de suelo y vegetación en la cuenca presa El Realito.

2.4 Edafología

El suelo que predomina en la cuenca presa El Realito (Figura 9) es feozem háplico que se caracteriza por una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes; le sigue en mayor proporción en la cuenca el litosol; que se caracteriza por tener 25 cm de espesor o con más del 80% de volumen ocupado por piedras y gravas, que lo vuelve susceptible a la erosión. Este generalmente se localiza en zonas montañosas con una pendiente mayor al 40% (INEGI, 2014). La presa El Realito se encuentra sobre la clasificación de litosol.

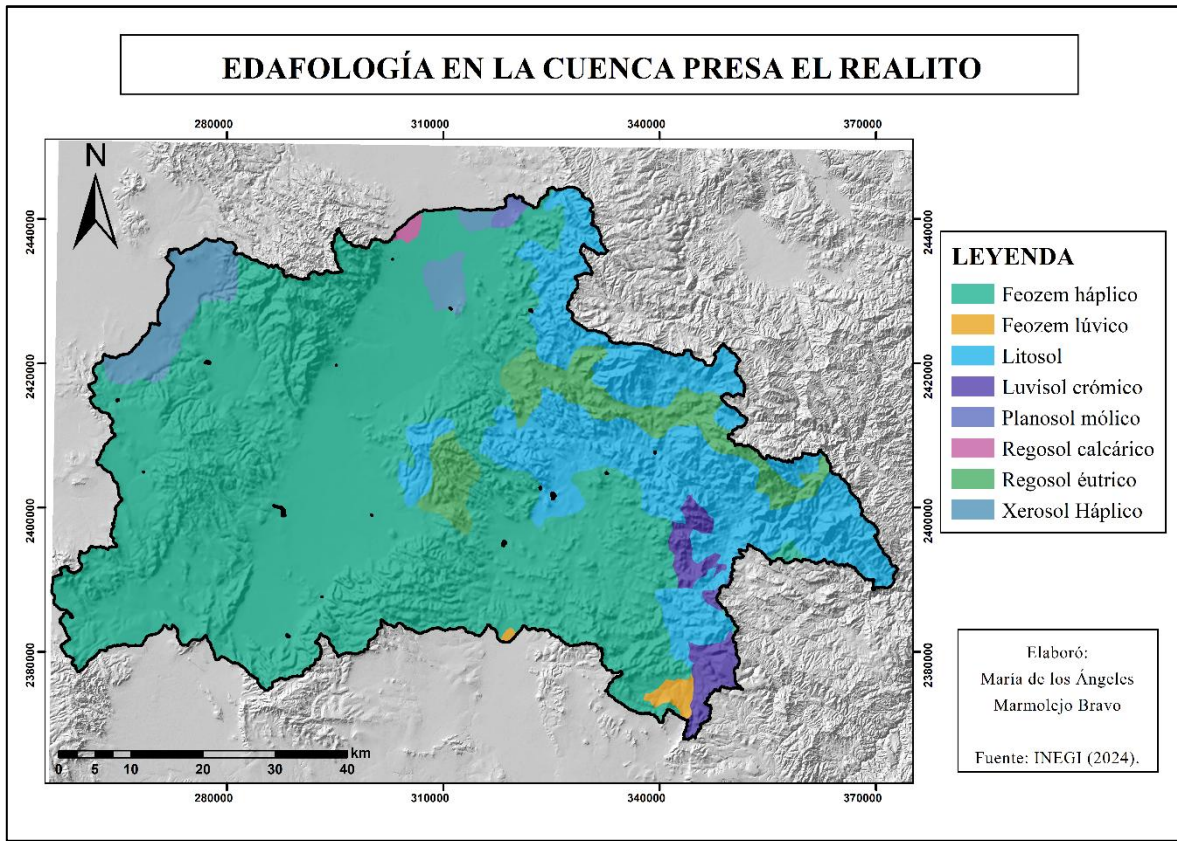


Figura 9. Edafología en la cuenca presa El Realito.

2.5 Hidrología

El estado de San Luis Potosí presenta una marcada diversidad fisiográfica que condiciona directamente su hidrología superficial. Se divide en tres grandes provincias: la Mesa del Centro, la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo Norte (INEGI, 2023). La cuenca de la presa El Realito se sitúa entre las provincias Mesa del Centro y Sierra Madre Oriental.

2.5.1 Agua superficial

Al noroeste de la cuenca, en la Mesa del Centro, se ubica la sierra de San Miguelito cuyos escurrimientos alimentan al arroyo El Chiquito y el río Altamira. Al noreste, los escurrimientos de la Sierra de Álvarez se encauzan hacia el arroyo El Meco. Estos escurrimientos reducen la velocidad de su caudal en la planicie del Valle de Villa de Reyes

y además son captados en las presas La Ventilla y La Boquilla. Después de la presa La Boquilla se encuentran sierras alargadas, cañones y valles profundos, lo que favorece un escurrimiento superficial concentrado, con una red hidrográfica densa y sujeta a procesos erosivos intensos. especialmente por sus pendientes pronunciadas en los arroyos Paso Hondo, El Camarón, La Cañada, entre otros, ubicados en la Sierra Madre Oriental (Figura 10).

La región también cuenta con infraestructura hidráulica clave, como las presas La Muñeca, Valentín Gama (La Boquilla), El Refugio Carranco, Dolores Ventilla (La Ventilla). En la Tabla 3 se muestra el uso y capacidad de las principales presas (INEGI, 2023) en la cuenca presa El Realito.

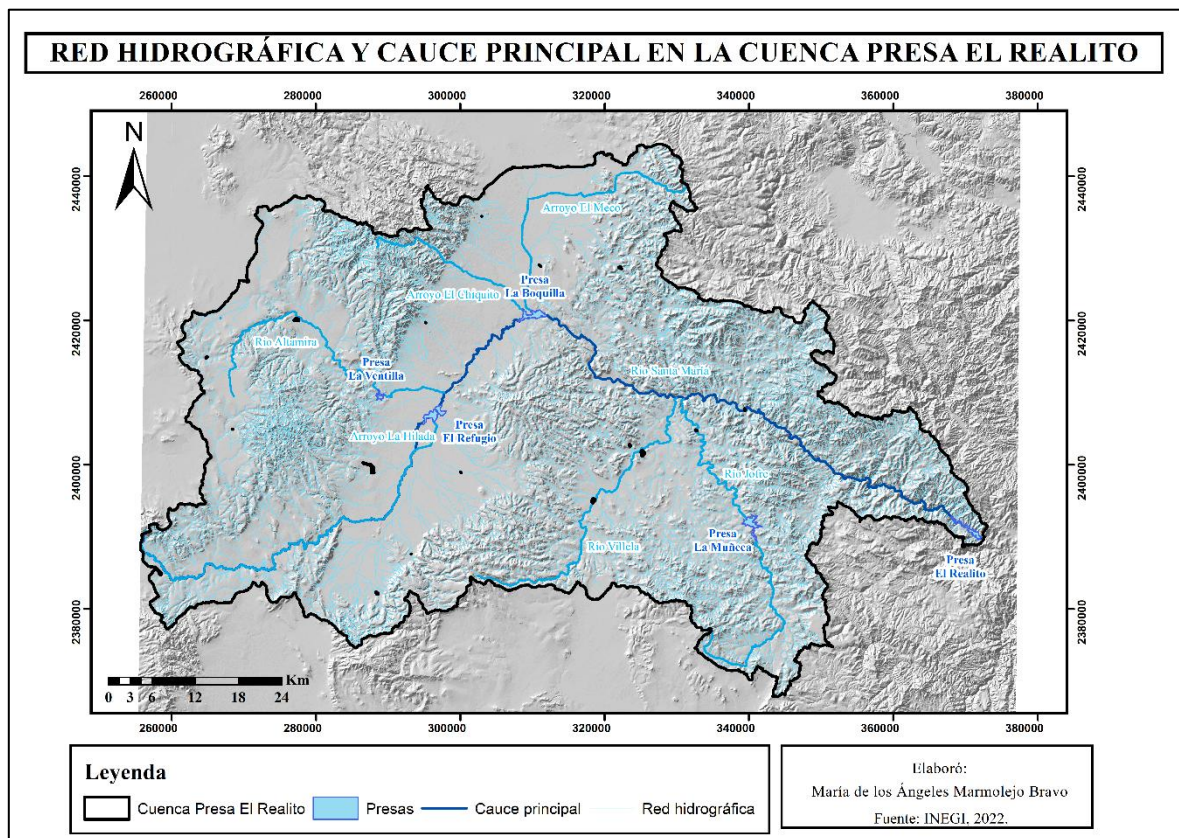


Figura 10. Red hidrográfica de la cuenca presa El Realito.

Tabla 3. Principales presas en la cuenca presa El Realito (INEGI, 2002; DOF, 2018).

Nombre	Municipio	Corriente principal	Capacidad (Mm ³)	Uso
La Muñeca	Tierra Nueva	Río Jofre	25	Riego y doméstico
Valentín Gama (La Boquilla)	Villa de Reyes	Río Santa María	10	Riego y doméstico
El Refugio Carranco	Villa de Reyes	Arroyo La Hilada	0.50	Riego
Dolores Ventilla (La Ventilla)	Villa de Reyes	Río Altamira	2.79	Riego
El Realito	San Luis de la Paz	Río Santa María	50	Doméstico

2.5.2 Agua subterránea

El área de la cuenca presa El Realito abarca acuíferos como el de San Luis Potosí (2411), Jaral de Berrios-Villa de Reyes (2412), Santa María del Río (2417), Villa de Arriaga (2406), Xichú-Atarjea (1101), Ocampo (1103), Laguna Seca (1104), Cuenca Alta del Río Laja (1108) y San Nicolás Tolentino (2416) (Figura 11). Además, de acuerdo con el portal de Geovisor de mediciones piezométricas de la Gerencia de Aguas Subterráneas, se identificaron 168 pozos en la cuenca, de los cuales 2 pertenecen al acuífero San Luis potosí, 99 a Jaral de Berrios-Villa de Reyes, 63 a Santa María del Río y 4 a Villa de Arriaga (CONAGUA, 2024).

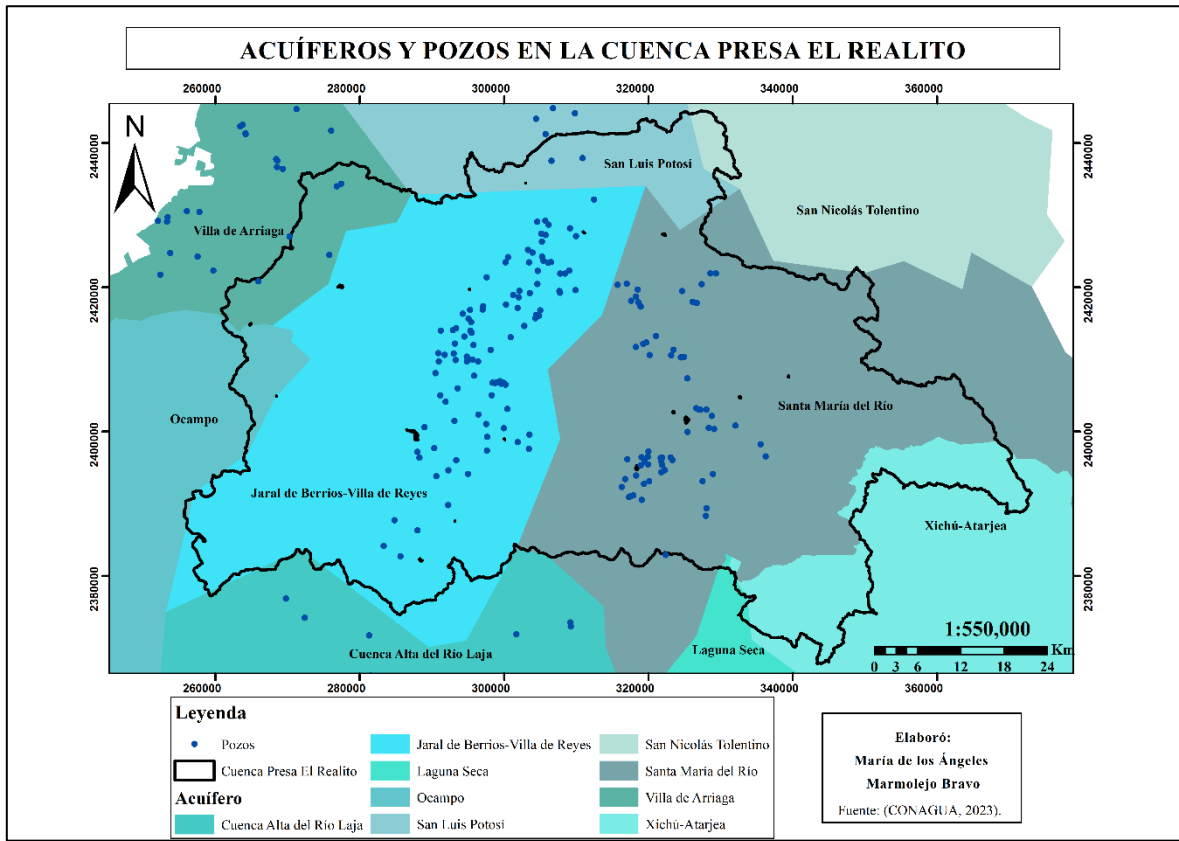


Figura 11. Acuíferos y pozos en la Cuenca presa El Realito.

2.5.3 Agua residual

Se denomina aguas residuales a aquellas que resultan de diversas actividades humanas, incluyendo usos urbanos, domésticos, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, y de plantas de tratamiento, así como cualquier combinación de estas. Estas aguas presentan una composición variable derivada de los residuos generados por dichos usos (DOF, 2023). Las descargas de aguas residuales pueden clasificarse en dos categorías: municipales y no municipales. Las municipales corresponden a aquellas generadas en asentamientos humanos y recolectadas por sistemas de alcantarillado urbano o rural. Las no municipales se generan en actividades como la industria autoabastecida y se vierten directamente a cuerpos de agua nacionales, sin intervención de redes de alcantarillado (CONAGUA, 2023).

En México, la NOM-001-SEMARNAT-2021 es la norma que regula los límites máximos permisibles de contaminantes de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 2022). El tratamiento de las aguas residuales puede incluir varias etapas dependiendo de la calidad de la fuente de agua residual y del ambiente que dispone (naturaleza y tamaño del cuerpo receptor) y la disposición de los residuos no reutilizados (DOF, 2009).

El agua residual eventualmente se reintegra al ambiente y genera un impacto significativo en la cantidad y calidad de los recursos hídricos. El cuerpo receptor puede ser un río, arroyo, lago, presa, océano o terrenos donde se infiltran o se inyectan y pueden contaminar el suelo y los acuíferos, dichas aguas pueden ser tratadas o sin tratar (Rivas Hernández, 2022).

En la cuenca presa El Realito se identificaron plantas de tratamiento de agua residual (PTARs) y canales de agua residual en las principales localidades de Villa de Reyes, Villa de Zaragoza, Ojo Caliente, Santa María del Río, El Fuerte y Tierra Nueva (Figura 12). Sin embargo, estas se encuentran sin funcionamiento o en obra negra por lo que descargan sus aguas residuales sobre los afluentes del río Santa María, río Jofre, río Villela y Arroyo El Meco.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

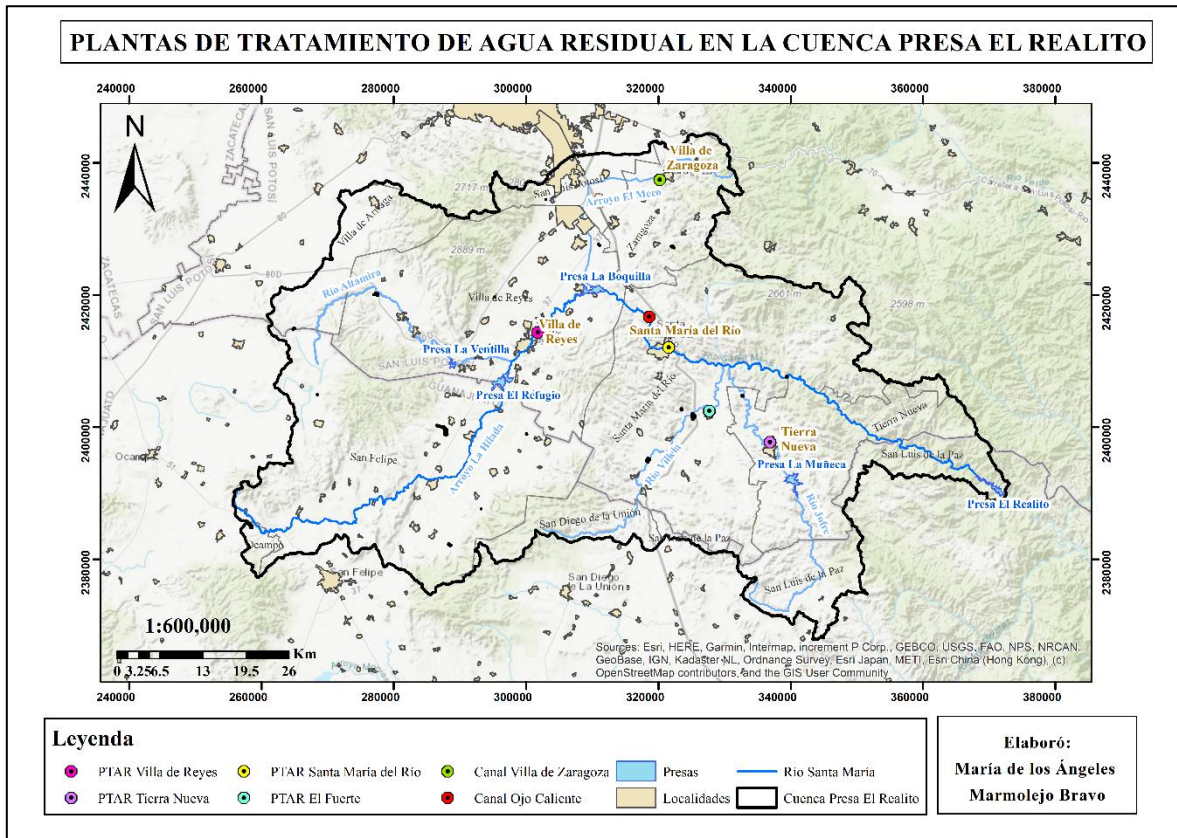


Figura 12. PTARs y canales de agua residual en la cuenca presa El Realito.

En Villa de Zaragoza se identificaron canales de agua residual sobre el Arroyo El Meco, el cual recorre una distancia de 30.72 km hasta su intercepción con la presa La Boquilla (Figura 13)



Figura 13. Canal de agua residual en Villa de Zaragoza.

En el municipio de Santa María del Río se identificaron sobre el cauce del río Santa María un canal de agua residual en la localidad de Ojo Caliente (Figura 14 a) y una PTAR en la localidad de Santa María del Río sin funcionamiento (Figura 14 b y c).

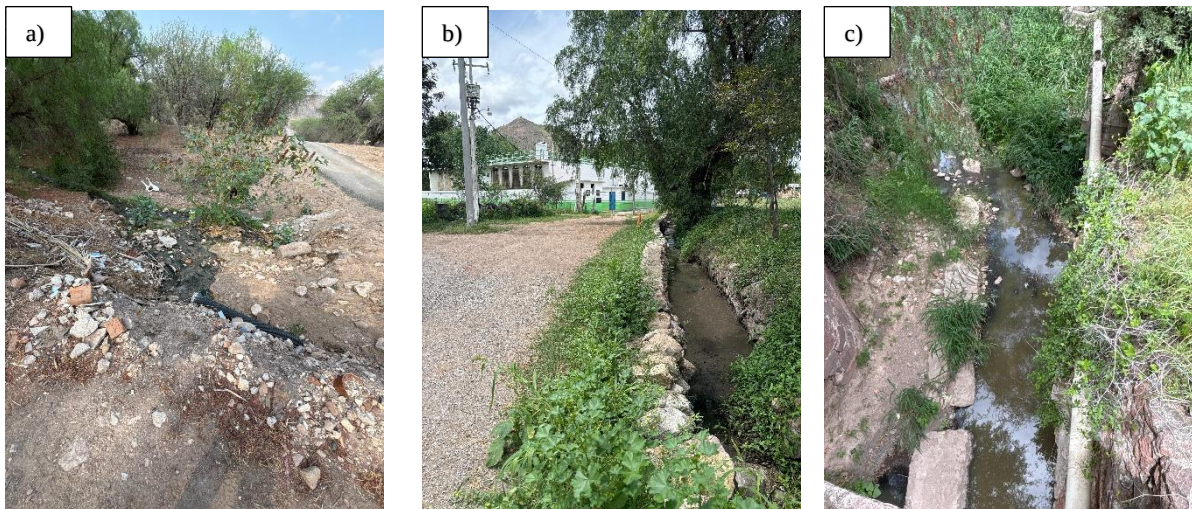


Figura 14. a) Canal de agua residual sobre el cauce del río Santa María; b y c) PTAR en Santa María del Río.

En la Figura 15 en la localidad de Villa de Reyes sobre el cauce del río Santa María también se identificó una PTAR en obra negra.



Figura 15. PTAR en Villa de Reyes.

En el municipio de Tierra Nueva se encontraron PTARs en las localidades de Tierra Nueva y El Fuerte. La PTAR de Tierra Nueva (Figura 16) se encuentra sobre el cauce del río Jofre y las aguas residuales recorren una distancia de 22.16 km hasta su intercepción con el río Santa María, mientras que la PTAR de El Fuerte (Figura 17) se encuentra sobre el afluente del río Villela y recorre una distancia de 9.14 km hasta su intercepción con el río Santa María.

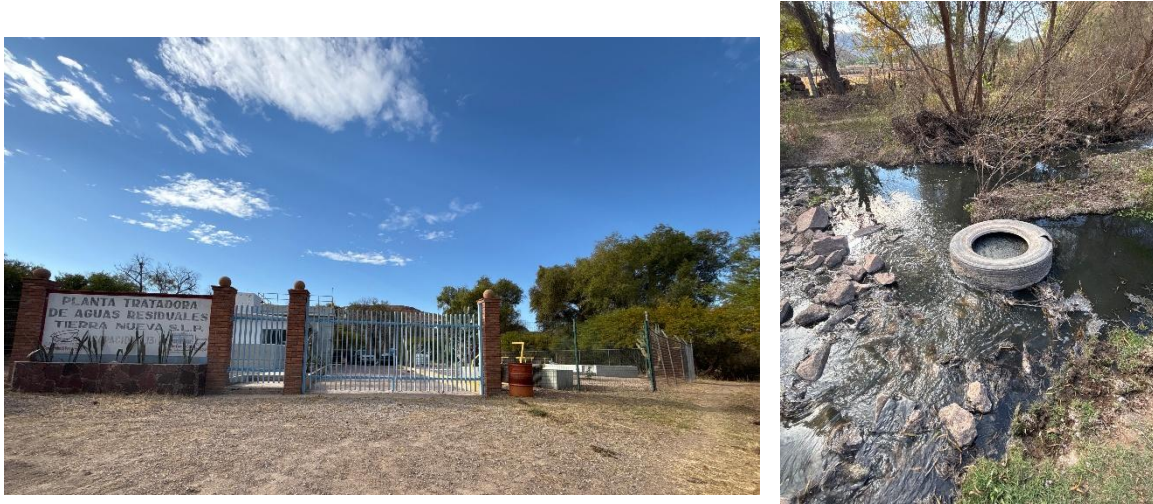


Figura 16. PTAR en la localidad de Tierra Nueva.



Figura 17. PTAR en la localidad de El Fuerte.

2.6 Geología

De acuerdo con información del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2024) en la cuenca de la presa El Realito se caracteriza por la presencia predominante de rocas ígneas, destacando que la presa El Realito se encuentre sobre geológicas de tipo Riodacita (ToRd) e Ignimbrita (ToIg) (Tabla 4, Figura 18).

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 4. Litología en la cuenca presa El Realito.

Litología	Roca	Clave (SGM)	Litología	Roca	Clave (SGM)
Aluvial	Sedimentaria	Qhoal	Granito	Intrusiva	ToGr
Andesita	Extrusiva	ToA	Ignimbrita	Extrusiva	ToIg
Andesita-Basalto	Extrusiva	TmA-B	Ignimbrita-Toba riolítica	Extrusiva	ToIg-TR
Andesita-Dacita	Extrusiva	ToA-Da	Lacustre	Sedimentaria	Tplla
Andesita-Riolita-Conglomerado poligénico	Híbrida	JimA-R-Cgp	Latita	Extrusiva	ToLa
Andesita-Toba andesítica	Extrusiva	Kvh(?)A-TA	Limolita-Caliza	Sedimentaria	JktLm-Cz
Anhidrita-Yeso	Sedimentaria	KapAh-Y	Lutita-Arenisca	Sedimentaria	KcmLu-Ar
Arenisca-Conglomerado poligénico	Sedimentaria	TplAr-Cgp	Lutita-Caliza	Sedimentaria	KtcLu-Cz
Arenisca-Limolita	Sedimentaria	TplAr-Lm	Meta-arenisca-Metalutita	Metamórfica	TRmsMAR-MLu
Arenisca-Lutita	Sedimentaria	KcrossAr-Lu	Metavolcano-sedimentario	Metamórfica	JtKvMs-Mv
Arenisca-Toba riolítica	Híbrida	TplAr-TR	Riodacita	Extrusiva	ToRd
Basalto	Extrusiva	QptB	Riolita	Extrusiva	ToR
Brecha volcánica andesítica	Extrusiva	ToBvA	Riolita-Brecha volcánica riolítica	Extrusiva	ToR-BvR
Caliza	Sedimentaria	KtssCz	Riolita-Ignimbrita	Extrusiva	TomR-Ig
Caliza-Dolomía	Sedimentaria	KaceCz-Do	Riolita-Toba riolítica	Extrusiva	ToR-TR
Caliza-Limolita	Sedimentaria	KiCz-Lm	Toba basáltica	Extrusiva	QptTB
Caliza-Lutita	Sedimentaria	KiCz-Lu	Toba riolítica	Extrusiva	ToTR
Caliza-Pedernal	Sedimentaria	KaceCz-ped	Toba riolítica-Riolita	Extrusiva	ToTR-R
Conglomerado poligénico	Sedimentaria	QptCgp	Tonalita	Intrusiva	JsTn
Conglomerado poligénico-Arenisca	Sedimentaria	TeoCgp-Ar	Traquiandesita	Extrusiva	ToTqA
Dacita	Extrusiva	ToDa	Traquita	Extrusiva	ToTq
Dacita-Andesita	Extrusiva	ToDa-A	Ultramáfica	Intrusiva	JsUm
Diorita	Intrusiva	JsD	Volcanosedimentaria	Sedimentaria	Kbet(?)Vs

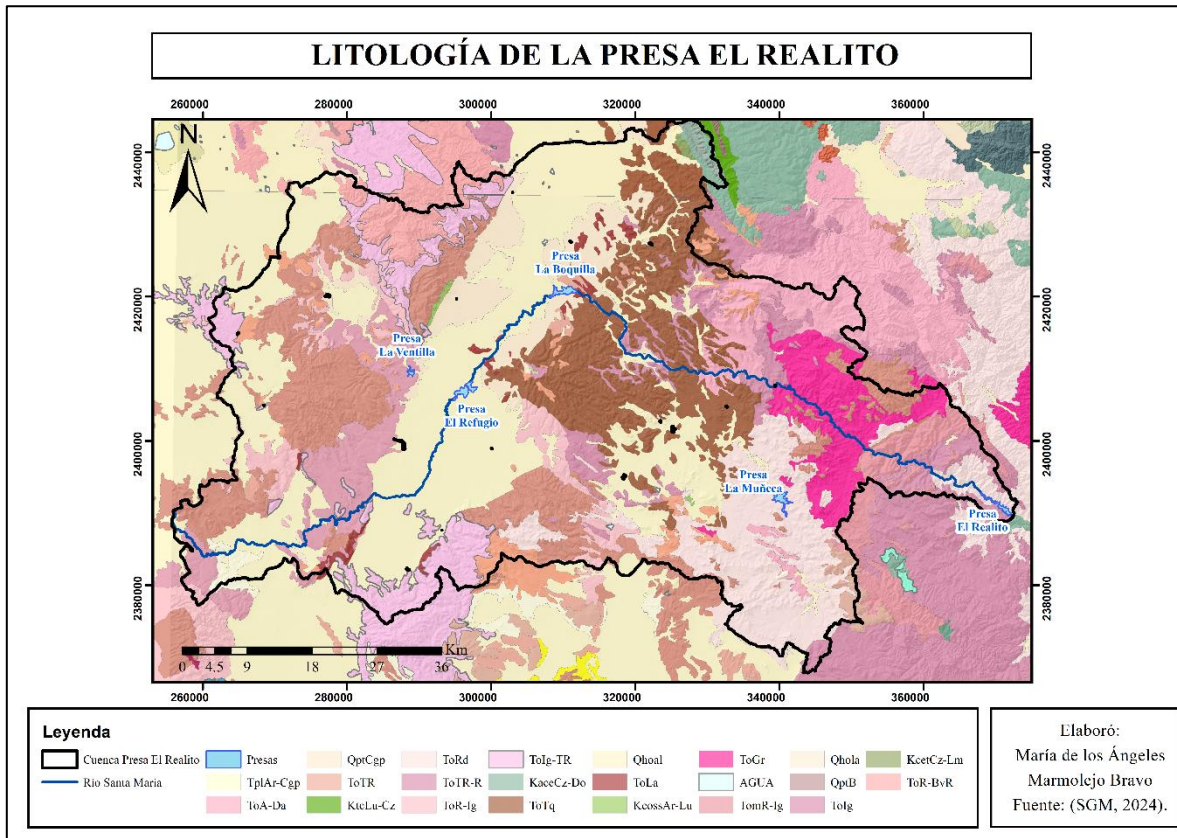


Figura 18. Litología en la cuenca presa El Realito (SGM, 2024).

2.6.1 Yacimientos minerales

Un yacimiento mineral es una parte de la corteza terrestre que debido a procesos geológicos presenta una acumulación de materia prima mineral que son minerales, rocas, elementos y compuestos que se extraen de la corteza terrestre para provechar sus propiedades físicas y químicas, las cuales, por sus características de cantidad, calidad y condiciones del depósito, es redituable su explotación (SGM, 2017).

En la cuenca presa El Realito se identificaron 162 yacimientos metálicos de Sn, Ag, Pb, Zn, Cu, Au, Hg y Fe, y 41 yacimientos no metálicos de caolín, calcita, fosforita, caliza, fluorita y yeso (Figura 19).

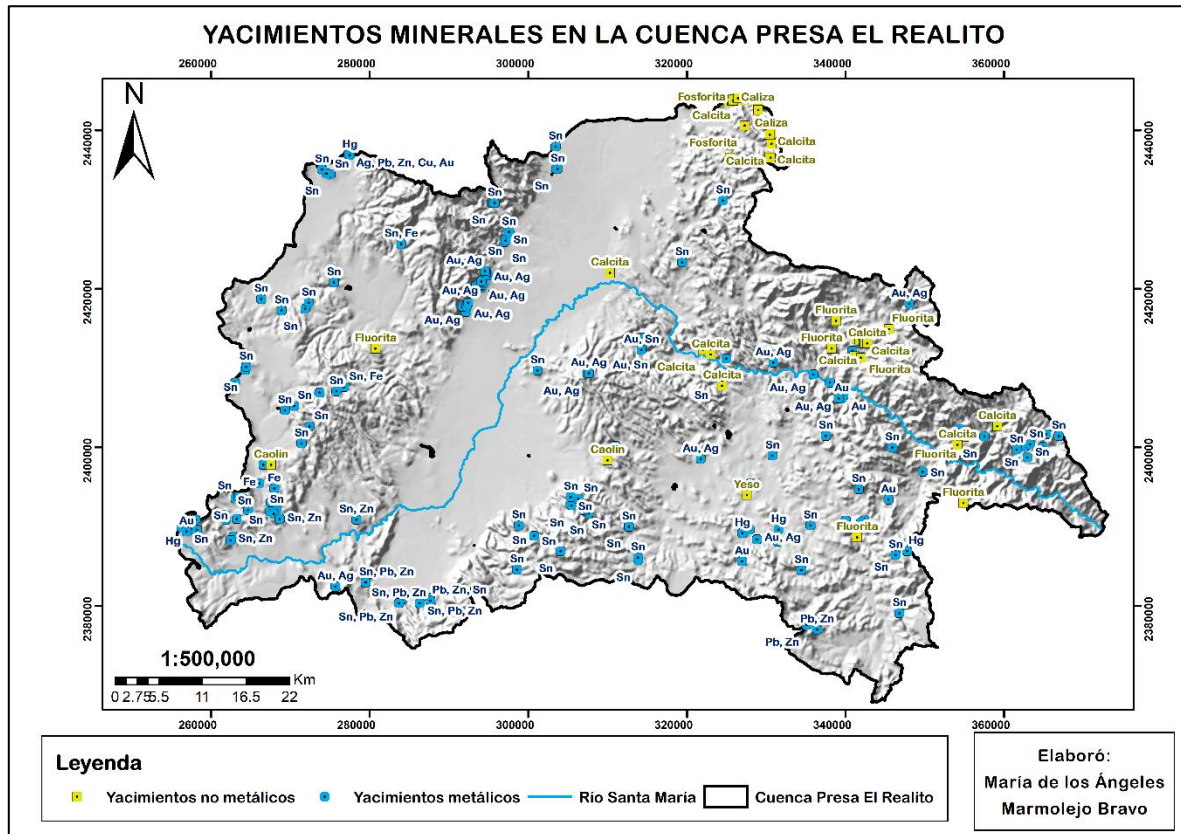


Figura 19. Yacimientos minerales metálicos y no metálicos en le cuenca presa El Realito (SGM, 2017).

Justificación

Los sedimentos lacustres constituyen un medio clave para el depósito y acumulación de diversos componentes orgánicos e inorgánicos, que son transportados y reciclados dentro de los sistemas lacustres. La interfaz sedimento-agua representa una zona altamente dinámica, donde ocurre el intercambio constante de sustancias entre el fondo y la columna de agua, lo que permite que los sedimentos superficiales integren información sobre las condiciones biogeoquímicas del sistema, tanto a nivel temporal como espacial. En consecuencia, la geoquímica de los sedimentos se ha consolidado como un indicador confiable de la calidad del agua, así como de los procesos naturales y antrópicos que influyen en ella (Cook et al., 2018; Liu et al., 2018).

Estudios previos han reportado la presencia de metales y metaloides en los sedimentos de la presa El Realito en concentraciones superiores a los valores basales establecidos por el Servicio Geológico Mexicano (Marmolejo, 2023), lo cual representan posibles riesgos a la salud y al ambiente. La cuenca de captación de esta presa abarca municipios como Villa de Reyes, Santa María del Río y Tierra Nueva, que en conjunto albergan una población estimada en más de 100,000 habitantes, cuyas actividades domésticas, agrícolas e industriales generan una carga importante de aguas residuales, muchas de las cuales no reciben tratamiento adecuado antes de ser descargadas al sistema hidrológico.

Adicionalmente, en la cuenca existen numerosos yacimientos minerales metálicos y no metálicos, cuya actividad actual o pasada podría estar contribuyendo significativamente a la contaminación del cauce del río Santa María, afluente directo de la presa. Ante este panorama, se vuelve fundamental ampliar el conocimiento sobre los procesos geoquímicos y las fuentes de aporte de elementos potencialmente tóxicos a través del estudio de los escurrimientos y sedimentos que llegan a la presa El Realito.

Por tanto, el presente trabajo busca integrar un análisis detallado de la dinámica geoquímica de elementos como el arsénico y el fluoruro, su liberación, movilidad y especiación química, con el fin de comprender su comportamiento en el sistema y evaluar su impacto potencial en la calidad del agua destinada al uso y consumo humano. Este conocimiento es esencial para orientar futuras estrategias de gestión ambiental, mitigación de riesgos a la salud pública y conservación de los recursos hídricos en la región.

Hipótesis

La presencia de metales y metaloides en los sedimentos y afluentes que se almacenan en la presa El Realito comprometen la calidad del agua para uso y consumo humano.

Objetivos

General

Evaluar la calidad del agua y caracterizar los sedimentos la presa El Realito, así como de sus afluentes para determinar, geoquímicamente, el grado de contaminación del agua para que pueda ser considerada apta para consumo humano.

Específicos

- Diseñar una estrategia para realizar el muestreo de sedimentos y los afluentes a considerar en la cuenca de la Presa El Realito.
- Evaluar parámetros fisicoquímicos del agua empleando técnicas electrométricas y espectrométricas para inferir la calidad de los cuerpos de agua estudiados.
- Determinar las concentraciones de contaminantes en sedimentos utilizando fluorescencia de rayos X (FRX).
- Caracterizar el contenido de elementos químicos y las fases minerales portadoras de los mismos presentes en los sedimentos de los afluentes empleando técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscópica electrónica de barrido (MEB).
- Caracterizar la solubilidad de metales y metaloides presentes en los sedimentos empleando el método ASTM D 3987-85.
- Establecer la correlación geoquímica-ambiental usando los parámetros fisicoquímicos del agua, las concentraciones elementales, las fases minerales y la solubilidad de metales y metaloides presentes en los sedimentos para aplicar herramientas de modelación de especies para identificar potencial riesgos en el agua de la presa.

Tabla 5. Microcuencas en la Presa El Realito.

Nombre	Área (km²)	Longitud del cauce principal (km)
Arroyo El Camarón	46.76	12.03
Arroyo La Cañada	2.45	3.06
Río Altamira	609.29	57.92
Arroyo San José	105.66	19.47
Arroyo El Tigre	85.79	15.83
Río Villela	669.87	59.64
Arroyo Las Enramadas	159.06	34.75
Río Jofre	487.47	86.76
Arroyo Paso Hondo	50.66	15.49
Arroyo Los Llanitos	93.95	24.46
Arroyo El Meco	413.34	49.62
Arroyo El Chiquito	166.06	31.61
Arroyo La Hilada	1288.44	86.80

En cada una de las microcuencas se analizaron características como el área, la longitud del cauce principal, cuerpos de agua y la cantidad de sitios mineros metálicos y no metálicos que se encuentran. Como ejemplo, se resume que, en la microcuenca del Río Jofre se estimó un área de 487.47 km² con una longitud de cauce principal de 86.76 km, y dentro de la cual se encuentra la presa La Muñeca, ubicándose además 11 sitios mineros de Sn, uno de Hg y uno de fluorita (Figura 21).

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

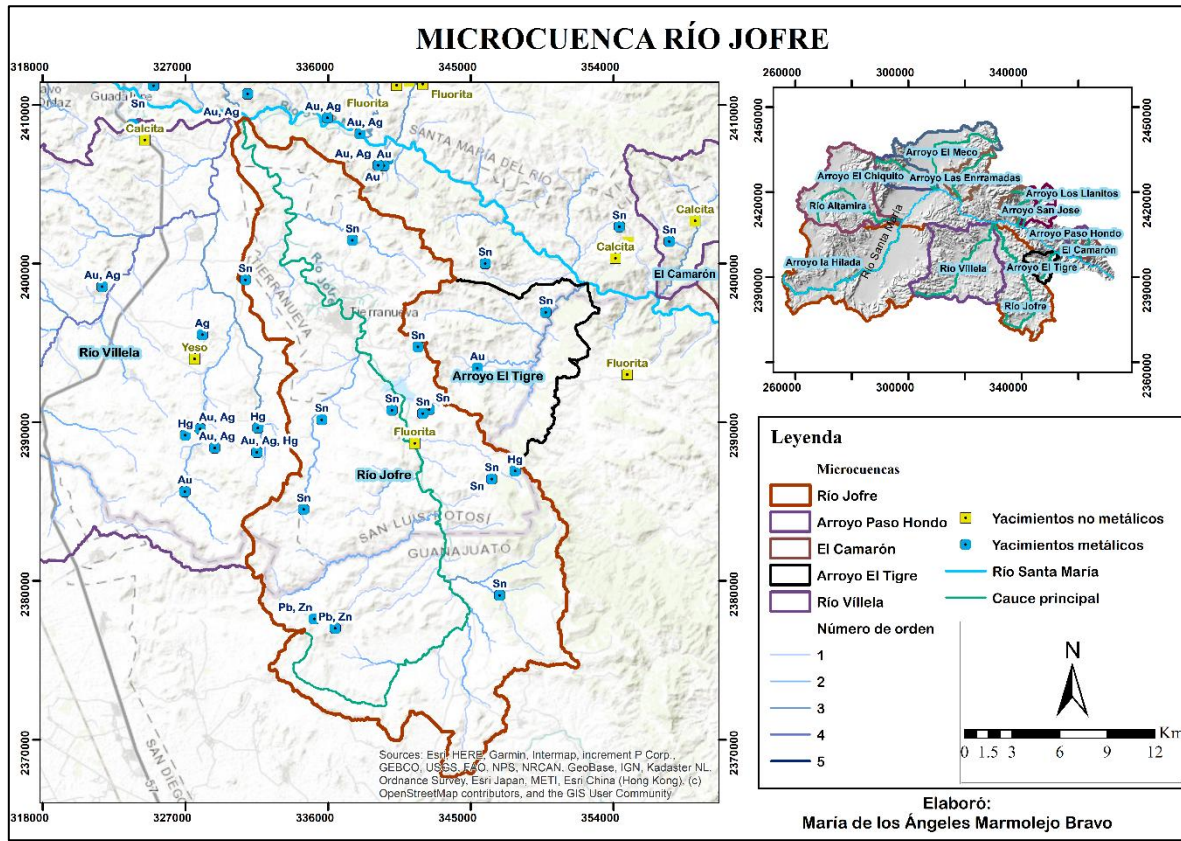


Figura 21. Microcuenca del Río Jofre.

La campaña de muestreo se realizó entre los meses de diciembre del 2023 a mayo del 2024, durante la época seca de la región. Se muestrearon un total de 62 puntos, sólo en 5 puntos se recolectaron muestras de agua, en 21 puntos muestras de agua y sedimento y en 36 puntos solo se pudo recolectar sedimento (Figura 22). La selección de los sitios de muestreo se realizó en las intercepciones de los afluentes principales de cada microcuenca con el río Santa María y las principales presas dentro de la cuenca. En algunas microcuencas como Río Vilella, Río Jofre y Arroyo San José se recolectaron, además, muestras aguas arriba y un punto medio de la microcuenca.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

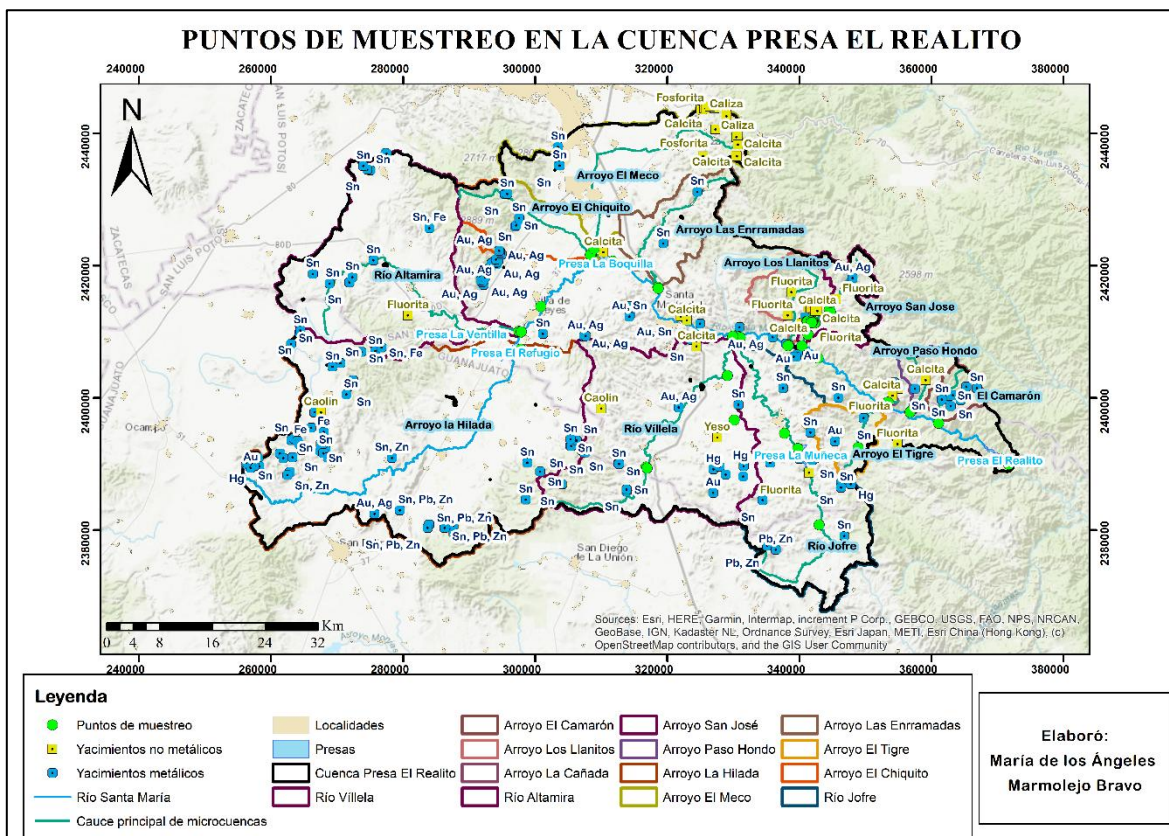


Figura 22. Puntos de muestreo en la cuenca presa El Realito.

3.2 Precipitación y coeficiente de escorrentía en la cuenca presa El Realito

La precipitación es el aporte de agua procedente de la atmosfera en forma sólida o líquida que se deposita sobre la superficie terrestre a manera de lluvia, nieve, granizo, llovizna, y otras formas similares de caída de agua. La precipitación se mide solo una vez al día y un valor inferior a 0.1 mm se registra como inapreciable. La suma total de las precipitaciones diarias de un mes constituye a la precipitación total mensual, y la suma de las precipitaciones totales mensuales de un año constituyen la precipitación total anual de ese año (INEGI, 2005).

Utilizando los datos meteorológicos de las precipitaciones totales mensuales de 18 estaciones meteorológicas del Sistema Meteorológico Nacional que se encuentran dentro y

alrededor de la cuenca presa El Realito en el período de 1978-2018, y con ello se estimó la precipitación promedio en cada estación meteorológica (Tabla 6).

Tabla 6. Precipitaciones medias anuales de las estaciones meteorológicas.

Estación	Nombre	Precipitación (mm/año)
11030	Jaral de Berrios	430.34
11065	San Felipe (DGE)	569.79
11131	Las trojes	467.77
11161	El vergel	434.53
11167	San Juan Pan de Arriba	459.82
24024	El Peaje	431.82
24034	La Salitrera	551.89
24075	Santa María del Río (DGE)	381.76
24078	Santiago	488.91
24093	Tierra Nueva	360.82
24106	Zaragoza	328.98
24163	Bledos	395.16
24179	Xoconoxtle	398.52
24051	Paso de San Antonio	1146.06
24111	San Luis Potosí (SMN)	170.80
11160	San Isidro	570.75
11068	San Luis de la Paz	492.04
24050	Paredes	818.36

La precipitación media anual (P) en la cuenca presa El Realito se estimó con el método de isoyetas (Anexo 1), el cual consiste en trazar líneas que unen puntos de igual altura de precipitación llamadas isoyetas, estas líneas se asemejan a como se trazan las curvas de nivel. La precipitación promedio se calcula multiplicando la sumatoria del área entre cada dos isoyetas (A_i) y la precipitación promedio entre dos isoyetas (P_i) y dividiendo el área total de la cuenca (A_t) (Ec. 1) (Estrada Cruz & Pereyra Díaz, 1995).

$$\text{Precipitación (P)} = \frac{(\sum(P_i)(A_i))}{\sum A_i} \quad (\text{Ec. 1})$$

El escurrimiento puede ser superficial y subterráneo; el superficial es producido por el volumen de la lluvia que no intervino en los procesos de evaporación, infiltración o

almacenaje superficial y que escurre por gravedad sobre la superficie del suelo, mientras que el subterráneo el escurrimiento sigue su curso bajo la superficie del suelo, que por lo general descarga a las corrientes fluviales (INEGI, 1981).

El coeficiente de escorrentía (Ce) permite estimar la fracción del volumen total de precipitación que puede ser efectivamente aprovechada en una determinada área de captación (CONAGUA, 2016). Este coeficiente depende de las características y condiciones del suelo, es decir, de la densidad de la cubierta vegetal o de las características de la cobertura artificial. La estimación del coeficiente de escorrentía se realizó a partir de la metodología del Modelo para Pronóstico Escurrimiento y del programa ArcMap (Versión 10.5) (Esri, 2016) en el cual se realiza una interpolación entre el área de la cuenca y las capas de edafología y uso de suelo. Para ello, se utilizan las tablas de clasificación del tipo de suelo de acuerdo con su permeabilidad; muy alta, buena, media y baja, y su relación con el grupo hidrológico A, B, C y D; y la tabla del número de curva según la cobertura del suelo de las cuales se obtiene una intercepción en el mapa de uso y tipo de suelo y se asigna el valor de N como se muestra en la Tabla 8. Las sumatorias de los valores de N y AN se estima $N_{ponderada}$ como se muestra en la (Ec. 2 y Anexo 2).

$$N_{ponderada} = \frac{(\sum(A)(N))}{\text{Área de la cuenca}} \quad (\text{Ec. 2})$$

El coeficiente de escorrentía se determina a partir de la precipitación efectiva y la precipitación estimada por el método de isoyetas (Ec.4). La precipitación efectiva es la porción de agua de lluvia que podría ser utilizada por las plantas y se estima de la siguiente ecuación (Ec. 3) (ONU-FAO, 2000).

$$\text{Precipitación efectiva (Pe)} = \frac{\left(P - \frac{508}{N_{Ponderada}} + 5.08\right)^2}{P + \frac{2032}{N_{Ponderada}} - 20.32} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\text{Coeficiente de escorrentia (Ce)} = \frac{Pe}{P} \quad (\text{Ec. 4})$$

3.3 Caracterización fisicoquímica del agua

La caracterización fisicoquímica se realizó con un potenciómetro multiparamétrico portátil (Hanna® HI98194) (Figura 2) para medir pH, potencial óxido-reducción (ORP) temperatura (T), oxígeno disuelto (OD), conductividad eléctrica (CE), y sólidos disueltos totales (SDT) en campo.



Figura 23. Potenciómetro multiparamétrico portátil.

En campo, se recolectaron muestras de agua de 1 L filtradas (0.45 micras) para la cuantificación de aniones para determinar la alcalinidad, sulfatos, nitratos, cloruros, fluoruros y As (V). Para la determinación de cationes se filtraron (0.45 micras) y acidificaron con HNO_3 se tomaron 50 mL por muestra.

3.3.1 Cuantificación de aniones

La determinación de aniones se llevó a cabo empleando los métodos descritos en los métodos estándar convencionales de la literatura (Baird et al., 2017). Para los aniones se determinó la alcalinidad (CaCO_3) por titulación potenciométrica con el método ALKALINITY 2320, los nitratos fueron determinados con el método NITRATE 4500- NO_3^- , los sulfatos con el método SULFATE 4500- SO_4^{2-} usando un espectrofotómetro UV-Vis Thermo Scientific Genesys 10S. Fluoruros con el método del ion selectivo (4500- F^-)*(Figura 24).

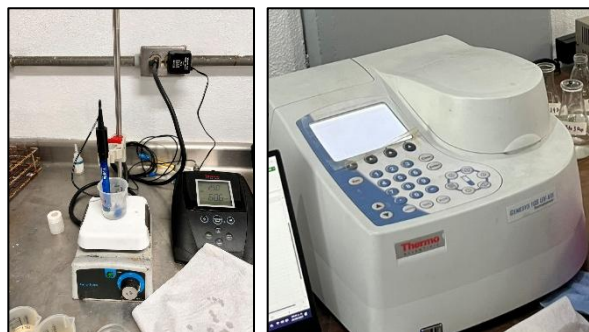


Figura 24. Electrodo de fluoruro (izquierda) y espectrofotómetro (derecha).

Determinación de arsénico (V)

Para la determinación de As(V) se preparó una curva de calibración para concentraciones de 20, 50, 75, 100, 125 y 150 $\mu\text{g/L}$ a partir de una solución madre 1 mM de arseniato de sodio dibásico heptahidratado a un volumen de 5 mL. Para la solución de color se añade 0.2 g de ácido ascórbico, 2 mL de agua desionizada, 2 mL de molibdato de amonio al 3%, 1 mL de tartrato antimonio potásico al 0.6% y 5 mL ácido sulfúrico al 13.9%. A un volumen de 5 mL de muestras de agua y estándares de la curva de calibración, se procede a añadir 10 μL de fosfato 1mM, 50 μL de ácido clorhídrico 6 N, 500 μL de ácido clorhídrico al 2% y 500 μL de la solución de color, se agita y se deja reposar 10 minutos a temperatura ambiente, la aparición de una coloración azul indica la presencia de arseniato (Figura 25). La absorbancia se midió por espectrometría a 880 nm.



Figura 25. Formación de coloración azul en la determinación de arsénico (V).

3.3.2 Cuantificación de cationes

El análisis de cationes se realizó por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES iCAP™ 7000 Series Thermo Scientific™) (Figura 26). Los límites de detección del equipo para Mn, Fe, Al, Ba, Cu, Hg y Pb fueron 0.048, 0.052, 0.069, 0.036, 0.038, 0.098 y 0.048 mg/L respectivamente.



Figura 26. Equipo de espectrometría ICP-OES.

3.4 Caracterización de los sedimentos

El sedimento húmedo recolectado se dejó secar a temperatura ambiente hasta secar. Las muestras se homogenizaron por cuarteo (Figura 27a). Dos cuartos se colocaron en una columna de 6 tamices de acero inoxidable con los siguientes tamaños de apertura de 2, 0.6, 0.25, .125, 0.063 y 0.038 mm (Tabla 7). La columna se colocó en un agitador eléctrico (Figura 27b) por 15 minutos, separando las fracciones granulométricas y registrando su peso. Las diferentes fracciones, granulométricas se colocaron en bolsas de polietileno (Figura 27c) para su posterior análisis por fluorescencia de rayos X (FRX).

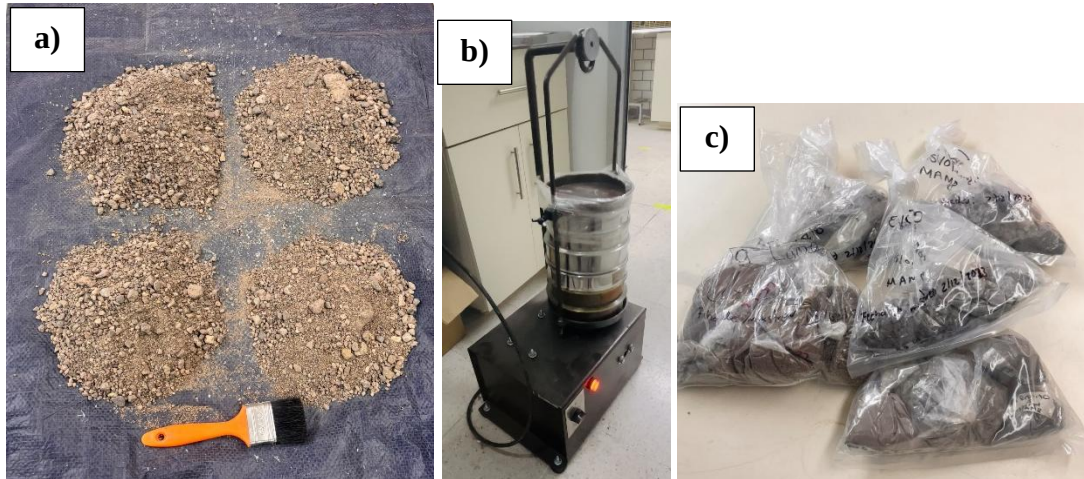


Figura 27. a) Muestra homogenizada por cuarteo, b) Equipo ROTAP para análisis granulométrico, c) Fracciones granulométricas resguardadas en bolsas de polietileno.

Tabla 7. Tamices utilizados para el análisis de granulometría.

Malla	Tamaño de abertura (mm)	Tamaño de partícula (mm)	Clave
10	2	$f > 2$	A
30	0.6	$2 > f > .600$	B
60	0.25	$0.600 > f > 0.25$	C
120	0.125	$0.25 > f > 0.125$	D
230	0.063	$0.1250 > f > 0.063$	E
400	0.038	$0.063 > f > 0.038$	F
400 >		$f < 0.038$	G

3.4.1 Fluorescencia de rayos X (FRX)

El análisis de las muestras mediante la técnica de Fluorescencia de rayos X, se realizó por triplicado con un Analizador Portátil Delta Professional (Mca. Olympus) (Figura 28). El equipo se operó en los modos “Geoquímico” y “Suelos” y se determinó la concentración de 41 elementos químicos. Para el análisis de FRX se consideraron solamente las fracciones D, E, F y G de los sedimentos; debido a que estas son las de interés ya que son las que tienen mayor probabilidad de migrar por el arrastre hídrico (Smith & Huyck, 1999). La exactitud

del equipo se validó con los materiales de referencia NIST 2710a y NIST 2711a Montana Soil I.



Figura 28. Equipo de Fluorescencia de rayos X.

3.4.2 Difracción de rayos X (DRX)

La técnica de DRX se utilizó para identificar las fases minerales que se encuentran en los sedimentos. Se usó un difractómetro de rayos X marca BRUKER modelo D8 Advance (Figura 29). Para este método se utilizó 1 g de las fracciones con tamaño de partícula < 0.038 mm.



Figura 29. Equipo de difracción de rayos X.

3.4.3 Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La caracterización mineralógica de los sedimentos se realizó por la microscopia electrónica de barrido (MEB) con la microsonda de Espectrometría de rayos X por energía dispersa (EDS, por sus siglas en inglés) usando el equipo JEOL modelo JSM-6610LV (Figura 30). Para este método se utilizaron 0.5 g de las muestras de sedimento con un tamaño de partícula < 0.038 mm. El tratamiento de estas muestras consiste en una homogenización, para después colocarlas sobre pines de aluminio y recubrirlas con carbón ya que se esté ayuda a la conducción de electrones.

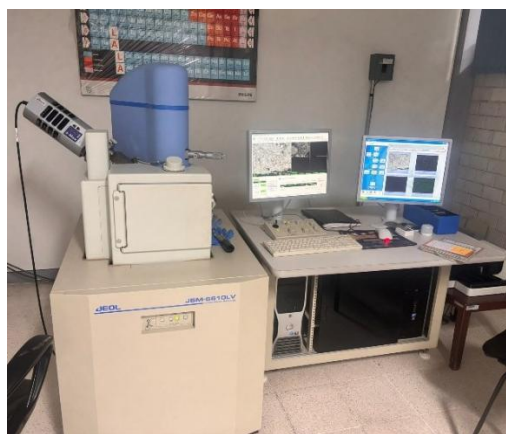


Figura 30. Equipo de microscopia electrónica de barrido.

3.4.4 Movilidad simulando agua meteórica

La toxicidad de los metales y metaloides depende de la concentración de la fracción extraíble bajo condiciones ambientales, esta fracción es móvil en el ambiente y se considera como la fracción soluble que puede impactar a la biota (DOF, 2004).

La NOM-141-SEMARNAT-2003 establece un método para lixiviar jales con agua en equilibrio con CO_2 atmosférico ($\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$) a $\text{pH} \approx 5.5$ para obtener una solución acuosa para analizar los compuestos lixiviados, bajo condiciones de la prueba ASTM D 3987-85.

Para este proyecto se determinó la movilidad en agua en equilibrio con CO_2 de las muestras la fracción con tamaño de partícula < 0.038 mm. La cual se colocó en tubos de fondo cónico, se utilizó 2 g de muestra de sedimento en 40 mL de agua en equilibrio con CO_2 , y se agitaron

utilizando un agitador rotativo (Figura 31) por 20 min a una velocidad de 20 rpm. Para después analizar agua para determinar la concentración de arsénico (V) y fluoruros. A partir de los resultados secuenciales del contacto sólido-líquido se estableció un índice de liberación normalizado con el ciclo en donde se encontraron las máximas concentraciones del elemento analizado (arsénico o flúor). El comportamiento observado sobre el cambio de pendiente entre los ciclos de lavado permite inferir las reacciones de intercambio iónico o de oxidación de fases minerales primaria, dependiendo del sustrato sólido analizado.

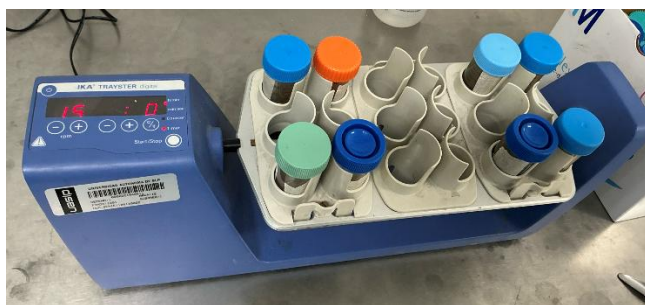


Figura 31. Agitador rotativo (IKA Trayster Digital).

3.4.5 Especiación geoquímica

Las concentraciones determinadas de los cationes y aniones, así como las condiciones de pH y Eh permitieron describir la especiación para el sitio de interés empleando la herramienta de Geochemist's WorkBench® utilizando parámetros fisicoquímicos del agua como: pH, Eh, CE, OD, CaCO_3 , NO_3^- , SO_4^{2-} , As(V) y F^- . Adicionalmente, se incluyeron concentraciones de elementos traza y mayoritarios como Na, Mg, Si, Mo, Fe, S, Ca, K y Cl.

3.5 Análisis estadístico

La prueba de normalidad estadística es un método que se utiliza para evaluar si los datos de una muestra se ajustan a una distribución normal. La distribución normal es el modelo matemático permite describir el comportamiento de una variable aleatoria que se distribuye de forma simétrica alrededor de su media. La importancia de conocer la normalidad de los datos influye en la validez y fiabilidad de los análisis estadísticos obtenidos (Sánchez-Solis et al., 2024).

Se realizó una prueba de normalidad a los resultados fisicoquímicos de agua, las concentraciones de metales y metaloides en agua y sedimentos con la intención de determinar si los datos son paramétricos o no paramétricos. Para agua se realizó la prueba de Shapiro-Wilk por un tamaño de muestra menor a 50. Para sedimentos se utilizó la prueba de Kolmogórov-Smirnov debido a tener un tamaño de muestra mayor a 50. Si el valor de probabilidad (p) resultante es ≥ 0.05 los datos son normales, es decir son paramétricos; si el valor de p es ≤ 0.05 los datos son no paramétricos.

Para los datos que presentaron normalidad se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para determinar la presencia de diferencias significativas y la diferencia de medias de los grupos de Tukey para encontrar si son significativamente diferentes entre sí. Los datos no paramétricos se realizó la prueba de Kruskal-Wallis.

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para agua y sedimentos, el cual es una técnica de estadística que se utiliza para reducir la dimensionalidad del conjunto de datos, facilitando así la visualización y el análisis de la información compleja, esto a través del conjunto de variables que están potencialmente correlacionadas llamadas componentes principales. Las componentes son combinaciones lineales de variables que se ordenan de tal forma que el primer componente presenta la mayor parte de la variabilidad del total de los datos, mientras que el segundo componente captura la segunda mayor cantidad de variabilidad, así sucesivamente (Gómez Arce et al., 2025).

4. FISICOQUÍMICA DEL AGUA Y MINERALOGÍA DE SEDIMENTOS

Durante el muestreo en campo se encontró agua en las presas El Realito, La Muñeca, La Boquilla, La Ventilla y El Refugio (Tablas 3 y 8). Además, se encontraron pozos superficiales contruidos manualmente sobre el cauce de ríos y arroyos secos (río Santa María y en la intercepción con algunos de sus afluentes) que se consideran subálveo. Asimismo, y a pesar de ser época seca se encontró agua sobre el cauce de algunos arroyos (álveo).

4.1 Resultados del análisis de agua

4.1.1. Parámetros fisicoquímicos en campo y aniones en agua

En la Tabla 8 se muestran los sitios en donde se midieron parámetros fisicoquímicos y se recolectaron muestras de agua, así como a la microcuenca a la que pertenecen.

Tabla 8. Claves de sitios de muestreo de agua y su distancia hacia la cortina de la presa El Realito. RSM (río Santa María).

Microcuenca	Tipo de agua	Nombre de la muestra	Distancia (km)	X	Y
Presa El Realito	Presa	ER-6	0.33	371731	2389937
Presa El Realito	Presa	ER-3	0.86	371365	2390328
Presa El Realito	Presa	ER-2	0.94	371308	2390420
Presa El Realito	Presa	ER-1	1.23	371166	2390606
Presa El Realito	Presa	ER-4	1.31	371109	2390664
Presa El Realito	Presa	ER-5	1.37	371068	2390697
Arroyo El Camarón	Álveo	El Camarón	16.51	361080	2396411
Arroyo Paso Hondo	Álveo	RSM-Paso Hondo	22.10	356800	2397825
Arroyo Paso Hondo	Álveo	Paso Hondo	22.43	356925	2398005
Arroyo La Cañada	Subálveo	LC-1.1	27.07	352939	2398709
Arroyo La Cañada	Subálveo	LC-1.3	27.22	353404	2399316
Arroyo El Tigre	Subálveo	El Tigre	27.22	352341	2398752
Presa El Realito	Subálveo	RSM-Charco Verde	42.10	342842	2405990
Arroyo San José	Subálveo	Rancho Viejo-2.4	46.74	341817	2411605
Presa El Realito	Subálveo	RSM-Los Llanitos	84.39	338327	2407903
Río Jofre	Subálveo	Jofre-2	94.85	330978	2409081
Presa El Realito	Subálveo	RSM-Jofre-2-A	95.02	330860	2409256
Río Villela	Subálveo	RSM-Villela	96.10	329956	2409290
Río Villela	Subálveo	Villela	96.43	329886	2409140
Río Villela	Álveo	El Fuerte	104.13	329108	2403350

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Microcuenca	Tipo de agua	Nombre de la muestra	Distancia (km)	X	Y
Arroyo El Chiquito- Arroyo El Meco	Presa	La Boquilla	116.26	311729	2420658
Arroyo El Chiquito	Subálveo	El Pardo	120.77	308477	2421584
Río Jofre	Subálveo	Tierra Nueva	123.17	337768	2394628
Río Jofre	Presa	La Muñeca	123.92	339774	2392333
Río Vilella	Subálveo	El Álamo	129.16	316954	2389350
Río Jofre	Álveo	Jofre-AA	139.19	343002	2380795
Arroyo La Hilada	Presa	El Refugio	144.19	297838	2407352
Río Altamira	Presa	La Ventilla	150.03	289303	2409551

De los resultados de los parámetros fisicoquímicos y aniones en agua se estimó el promedio, valor mínimo, máximo y con valor de la prueba de normalidad se determinó si son paramétricos o no paramétricos (Tabla 9).

Tabla 9. Estadística de los parámetros fisicoquímicos de agua en la cuenca presa El Realito y prueba de normalidad (valor de p) de Shapiro-Wilk's ($\alpha=0.05$; $n=28$).

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	p
pH	7.68	6.380	9.240	0.504
Eh (mV)	234.49	38.10	308.9	0.000
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	638.71	312.0	1098	0.012
OD (mg/L)	5.630	1.790	15.5	0.003
OD (%)	75.16	25.30	194	0.004
SDT (mg/L)	317.46	156.0	549	0.011
T ($^{\circ}\text{C}$)	22.93	16.06	34.39	0.011
Cl^- (mg/L)	27.80	9.50	50.7	0.965
SO_4^{2-} (mg/L)	54.318	4.20	174.6	0.000
CaCO_3 (mg/L)	297.53	167.28	554.88	0.018
N-NO_3^- (mg/L)	1.43	0.34	3.34	0.189
F^- (mg/L)	2.18	0.54	10.02	0.000
As (V) (mg/L)	0.268	0.041	1.055	0.000

En la Figura 32 se muestra los resultados del potencial redox, concentración y porcentaje de oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, temperatura y cloruros en agua de los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La presa La Ventilla es el sitio de muestreo ubicado a la mayor distancia en el recorrido del agua hacia la cortina de la presa El Realito, y se pueden observar tendencias de los parámetros fisicoquímicos conforme

avanza al escurrimiento hacia el embalse. El Eh y el OD presentan un ligero incremento al acercarse a la presa El Realito. Sin embargo, en el embalse se presenta un ambiente dinámico, una limitada presencia de oxígeno, favoreciendo procesos de reducción. Además, la proliferación lirio acuático (*E. crassipes*) afecta el flujo del agua y bloquea la luz solar lo que conlleva a una disminución de oxígeno disuelto en la presa (Rodríguez-Lara et al., 2022).

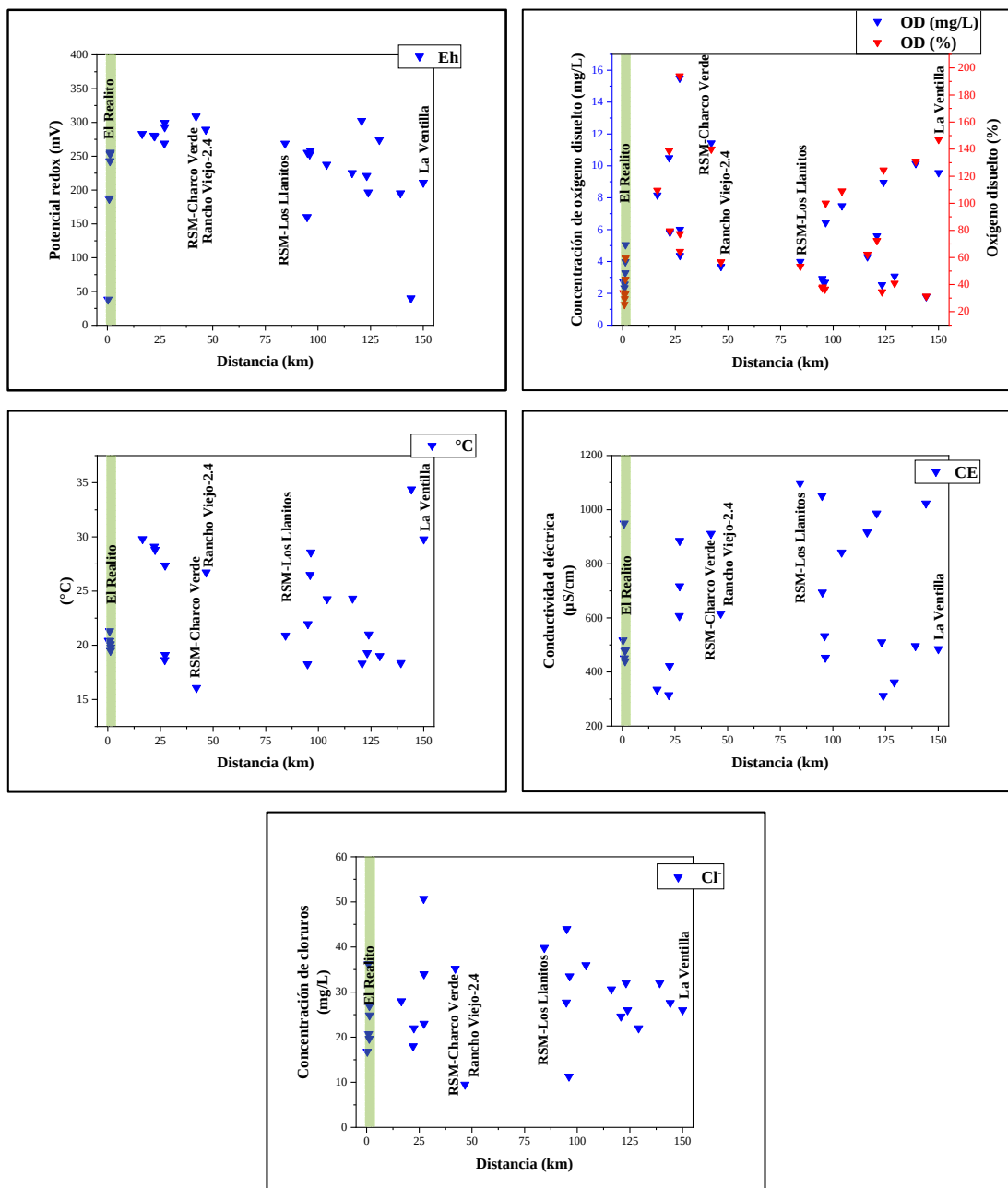


Figura 32. Resultados de los valores Eh, OD, CE, T y Cl⁻ en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito.

En la Figura 33 se presentan los resultados de pH, sólidos disueltos totales (SDT), sulfatos (SO_4^{2-}), alcalinidad total (como mg CaCO_3/L) y nitrógeno de nitratos (N-NO_3^-) en los sitios de muestreo, en función de la distancia a la cortina de la presa El Realito. El pH se mantiene dentro del límite permisible en la mayoría de los sitios; sin embargo, en al menos cuatro sitios incluyendo la presa La Ventilla se registran valores fuera de norma, lo que indica condiciones más alcalinas, en contraste con la presa El Realito que presenta valores de pH menores 7, cercano al límite de condiciones acidas. Por otro la alcalinidad presenta valores por encima del límite permisible en los puntos, incluyendo la presa El Realito. Los SDT, N-NO_3^- y los SO_4^{2-} se mantienen por debajo del límite establecido en la norma NOM-127-SSA1-2021 en todos los sitios.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

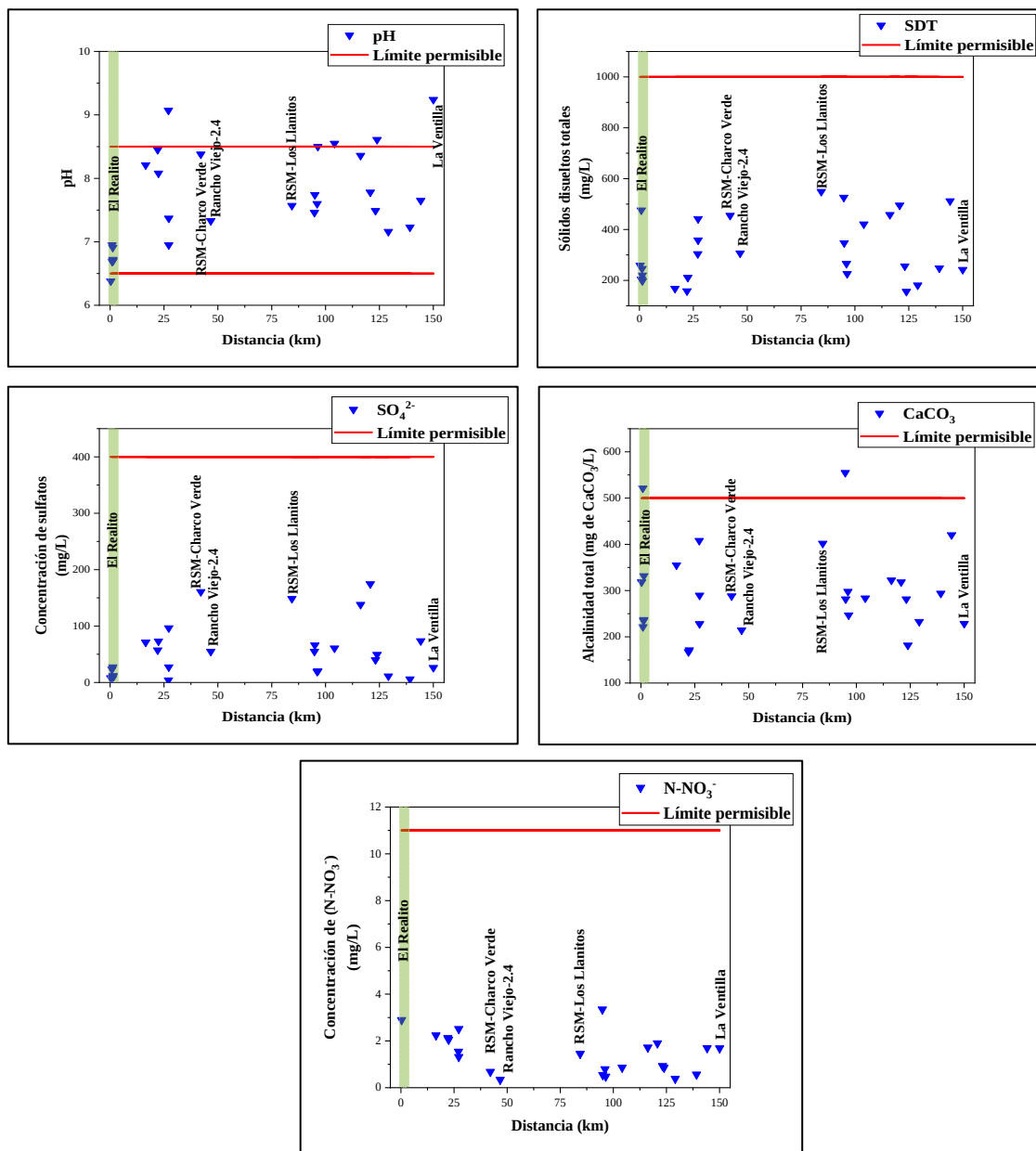


Figura 33. Resultados de los valores pH, SDT, SO_4^{2-} , alcalinidad medida (como $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$) y N-NO_3^- en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-2021.

En la Figura 34 se muestran las concentraciones de fluoruros, observándose que en la mayoría de los sitios superaran ampliamente el límite permisible de 1 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021. La concentración más alta se registró en la muestra de Rancho Viejo-2.4 ,

con un valor de 10.02 mg/L. En contraste, las concentraciones inferiores al límite permisible se encuentran algunos puntos en la presa El Realito. En sitios aguas arriba, los niveles oscilan entre 1 y 5 mg/L.

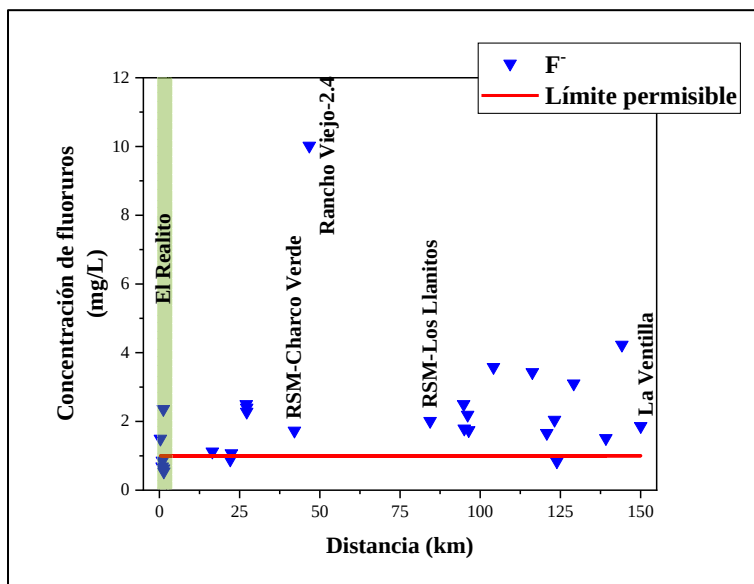


Figura 34. Resultados de los valores de fluoruros (F^-) en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-2021, correspondiente a 1 mg F^- /L.

En la Figura 35 se presentan las concentraciones de $As(V)$ en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. Los resultados muestran que en la mayoría de las muestras superan el límite máximo permisible de 0.01 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021. En comparación, los sitios aguas arriba, como la presa La Ventilla, muestran concentraciones que las registradas en la presa El Realito, lo que sugiere un incremento de arsénico en la trayectoria del escurrimiento hacia el embalse.

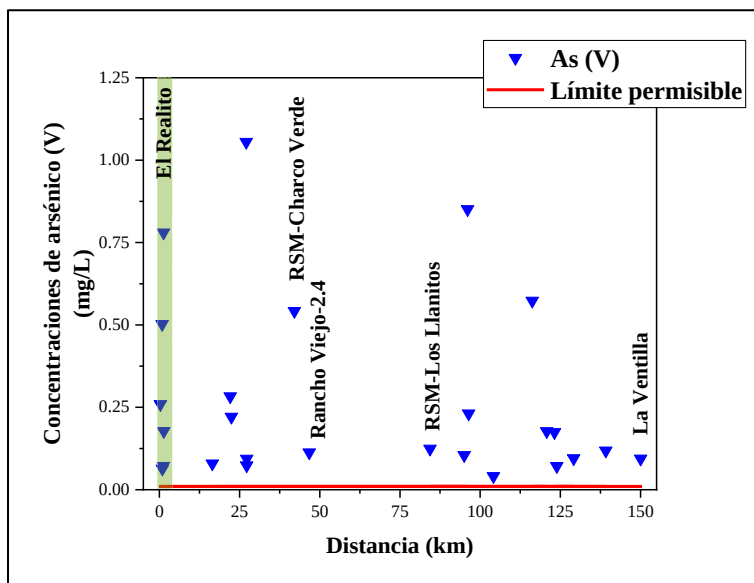


Figura 35. Resultados de los valores As (V) en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite máximo permisible establecido en la NOM-127-SSA1-2021, correspondiente a 0.010 mg As/L.

De acuerdo a un estudio realizado por la Cardona-Benavides et al. (2016), se evaluó la calidad del agua del sistema El Realito con el objetivo de verificar el cumplimiento de los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-1994. El muestreo incluyó el agua cruda proveniente de la presa El Realito, antes de su ingreso a la planta potabilizadora, así como muestras posteriores al tratamiento, con el fin de evaluar la eficiencia del proceso de potabilización.

En la Tabla 10 se muestran los valores promedio del agua correspondientes al agua cruda, agua tratada (ambas de 2016) y el agua de la presa El Realito obtenida en el presente estudio, los cuales se comparan con los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, actualmente vigente. Los valores reportados para la presa El Realito en este estudio corresponden al promedio de los 6 sitios de muestro distribuidos en el embalse.

Al comparar los valores de pH del presente estudio con los reportados en el 2016, se observa una ligera acidificación, acercándose al valor del agua tratada de ese año. Los sólidos disueltos totales, cloruros y nitratos presentan un aumento considerable, mientras que los sulfatos se mantienen relativamente estables. Los fluoruros superan ahora los límites permisibles. De manera destacada, las concentraciones de arsénico presentaron un

incremento significativo respecto al análisis anterior, superando ampliamente el límite permitido.

Tabla 10. Registros de los valores promedio de las concentraciones en agua de parámetros fisicoquímicos y aniones en solución en la presa y potabilizadora El Realito.

Parámetro	NOM-127-SSA1-2021	Agua de la Presa El Realito (presente estudio)	Agua cruda de la potabilizadora El Realito (2016)	Agua tratada de la potabilizadora El Realito (2016)
pH	6.5-8.5	6.73	7.48	6.57
SDT (mg/L)	1000	267.17	130.3	142.9
Cl ⁻ (mg/L)	-	24.19	11.98	15.42
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	400	14.4	9.67	23.5
CaCO ₃ (mg/L)	500	310.71	79.5	73.3
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	11	2.89	1.2	0.95
F ⁻ (mg/L)	1	1.09	0.703	0.29
As total (mg/L)	0.01	-	0.007	0.0003
As (V) (mg/L)	-	0.349	-	-

4.1.2 Análisis de cationes en agua

La NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022) establece límites permisibles para varios metales en el agua destinada para consumo humano, entre los cuales se encuentran Mn, Fe, Al, Ba, Cu, Hg y Pb, los cuales fueron analizados en la cuenca presa El Realito. Aun cuando se analizaron, los elementos como Cr, Ni y Cd se encontraron en concentraciones por debajo del límite de detención del equipo. En la Tabla 11 se muestran los valores de p de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk's, la cual evidenció que la mayoría de estos metales no siguen una distribución normal ($p < 0.05$), lo que sugiere una alta variabilidad espacial.

Tabla 11. Concentraciones de metales y metaloides en agua en la cuenca presa El Realito y prueba de normalidad (valor de p) de Shapiro-Wilk's ($\alpha=0.05$; $n=28$).

Variable (mg/L)	Promedio	Mínimo	Máximo	p
Mn	0.413	0.001	3.602	0.000
Fe	0.299	0.005	3.287	0.000
Al	0.104	0.011	0.789	0.000
Ba	0.130	0.008	0.411	0.027
Cu	0.021	0.000	0.056	0.145
Hg	0.059	0.006	0.235	0.000
Pb	0.071	0.018	0.117	0.370

En las Figuras 36 y 37 se presentan las concentraciones de Mn, Fe, Al, Ba, Cu, Pb y Hg obtenidas en los diferentes sitios de muestreo a lo largo de la cuenca de la presa El Realito, considerando su distancia con respecto a la cortina de la presa. Asimismo, se comparan con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021 (DOF, 2022) para agua destinada al consumo humano, así como con el límite de detección instrumental del ICP-OES.

Los resultados muestran que las concentraciones de Mn, Fe, Al y Pb superan en varios puntos los valores establecidos por la normativa mexicana, lo cual representa un riesgo potencial para la calidad del agua destinada al abastecimiento público. En contraste, los elementos Ba y Cu se mantuvieron en la mayoría de los casos por debajo del límite de detección, indicando una menor movilidad o baja disponibilidad geoquímica en el sistema.

En cuanto al mercurio (Hg), las concentraciones se situaron por debajo del límite de detección en la mayoría de los sitios; sin embargo, se identificaron valores que exceden el límite máximo permisible (0.001 mg/L) en algunos puntos críticos, incluyendo la presa El Realito. Este hallazgo es especialmente relevante debido a la alta toxicidad del Hg y a su tendencia a bioacumularse en organismos acuáticos, lo que podría derivar en riesgos ecotoxicológicos a mediano plazo (WHO, 2017).

La interpretación de estos resultados puede vincularse con la dinámica geoquímica del sistema. Estudios previos en la presa El Realito, Marmolejo et al. (2024), destacan que la actividad biológica dentro del embalse favorece la producción de ácidos grasos volátiles, lo

que genera una disminución del pH en el sistema. Este proceso contribuye a la disolución de fases carbonatadas presentes en los sedimentos, incrementando la liberación de elementos traza asociados. Un caso particular corresponde al plomo (Pb), que se encuentra mineralógicamente como carbonato de plomo (PbCO_3). Bajo condiciones reductoras y con una acidez relativa, la solubilidad del Pb se incrementa, lo que potencia su movilidad en la columna de agua y explica los valores elevados registrados en este estudio.

De esta manera, la combinación de condiciones reductoras, variaciones de pH y la presencia de materia orgánica en el sistema de la presa El Realito constituye un escenario propicio para la liberación y transporte de metales traza, lo cual coincide con los patrones observados en los análisis de agua y sedimentos.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

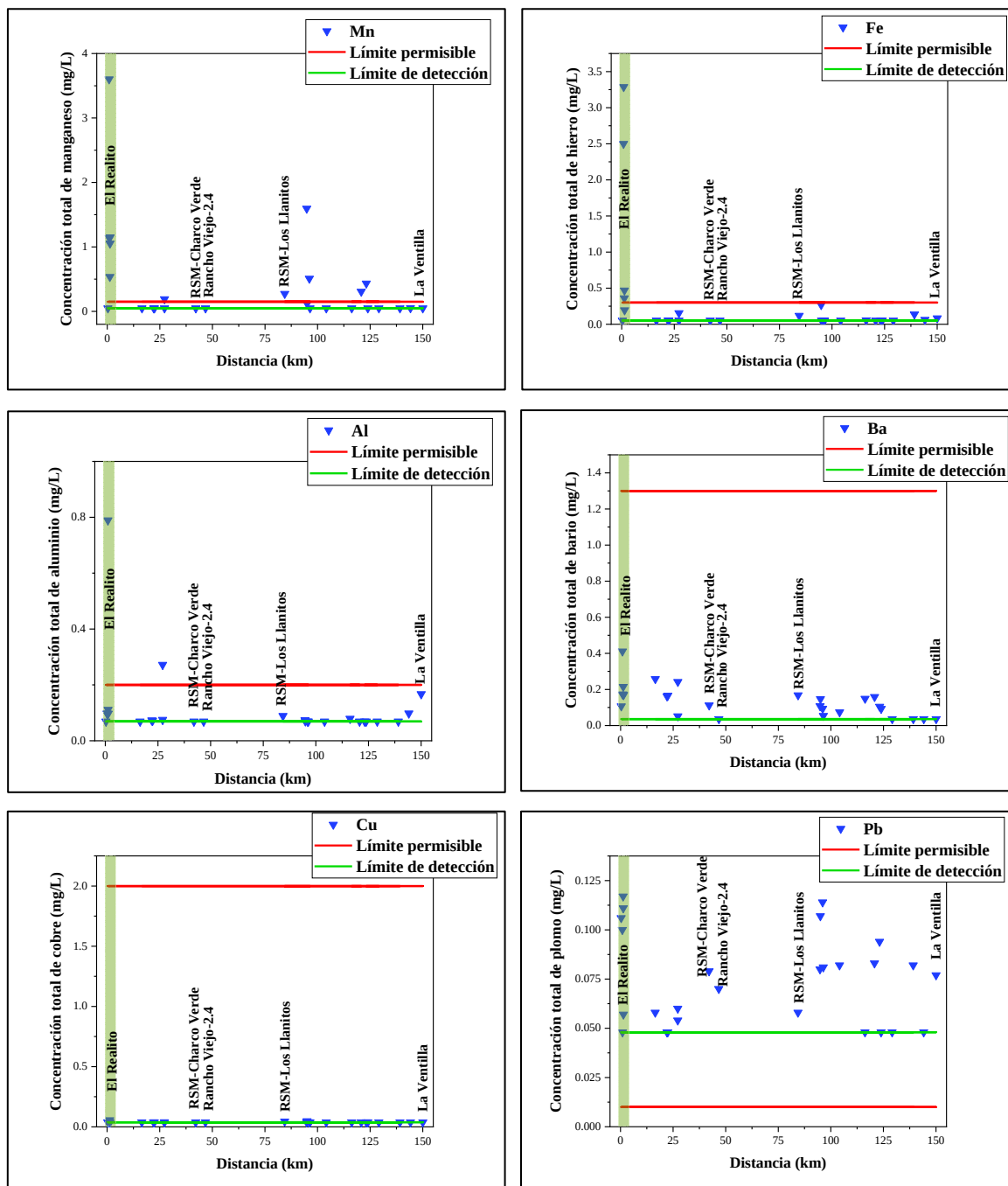


Figura 36. Concentraciones en agua de Mn, Fe, Al, Ba, Cu y Pb en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. Las concentraciones se reportan en mg/L. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite permisible de la NOM-127-SSA1-2021, y la línea verde representa el límite de detección del equipo.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

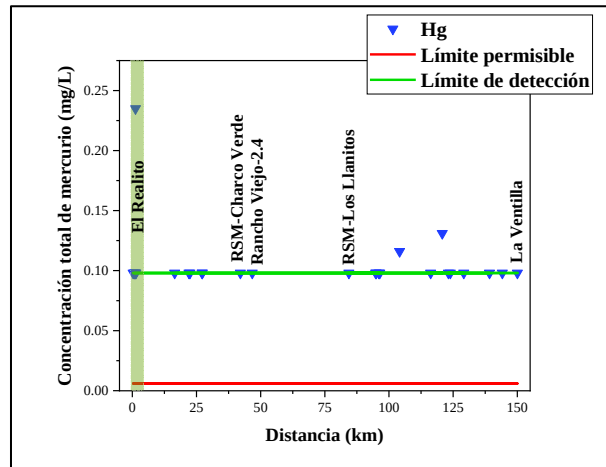


Figura 37. Concentraciones en agua de Hg en los sitios de muestreo respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. Las concentraciones se reportan en mg/L. La franja verde representa la presa El Realito; la línea roja representa el valor del límite permisible de la NOM-127-SSA1-2021 y la línea verde representa el límite de detección del equipo. 2021.

En la Tabla 12 se muestran las concentraciones promedio de metales en el agua cruda y tratada de la presa El Realito del informe final presentado por Cardona-Benavides et al. (2016) comparado con las del presente estudio. Los valores del 2016 muestran concentraciones menores en el agua cruda en Mn, Fe, Ba, Cu y Hg que el agua de la presa El Realito en el presente estudio.

Tabla 12. Registros de los valores promedio de las concentraciones en agua de metales en la presa y potabilizadora El Realito (Cardona Benavides et al., 2016).

Parámetro (mg/L)	NOM-127-SSA1-2021	Agua de la Presa El Realito (presente estudio)	Agua cruda de la potabilizadora El Realito (2016)	Agua de la potabilizadora El Realito (2016)
Mn	0.15	1.246	0.179	0.012
Fe	0.3	1.14	0.115	<0.0010
Al	0.2	0.208	0.252	0.045
Ba	1.3	0.208	0.053	0.034
Cu	2	0.022	<0.010	<0.010
Hg	0.006	0.054	<0.010	<0.010
Pb	0.01	0.085	0.187	<0.010

En el 2016 la planta potabilizadora de El Realito logró reducir de manera efectiva las concentraciones de metales a niveles por debajo de los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-2021, los resultados del presente estudio evidencian que la calidad del agua cruda presenta actualmente mayores retos para su potabilización. Esto resalta la necesidad de fortalecer tanto las medidas de control de contaminación en la cuenca como los procesos de tratamiento en la planta para garantizar la seguridad del agua destinada al consumo humano.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) realizado sobre 25 muestras de agua con 15 variables (10 parámetros fisicoquímicos y 5 elementos químicos), las Figuras 38 y 39 muestran cómo se agrupan las muestras y sus asociaciones.

En la Figura 38, se observa que 5 de las 6 muestras de la presa El Realito están agrupadas en un mismo cuadrante. Esto sugiere que estas muestras tienen concentraciones más altas de elementos químicos en comparación con el resto de las muestras. La agrupación en este cuadrante refleja una posible diferencia en la calidad del agua en la presa, relacionada con los niveles elevados de ciertos contaminantes en comparación con otras zonas de muestreo.

Por otro lado, en la Figura 39, se destacan parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, cloruros, sulfatos y alcalinidad, los cuales están asociados entre sí y se correlacionan con el contenido de sales presentes en las muestras de agua.

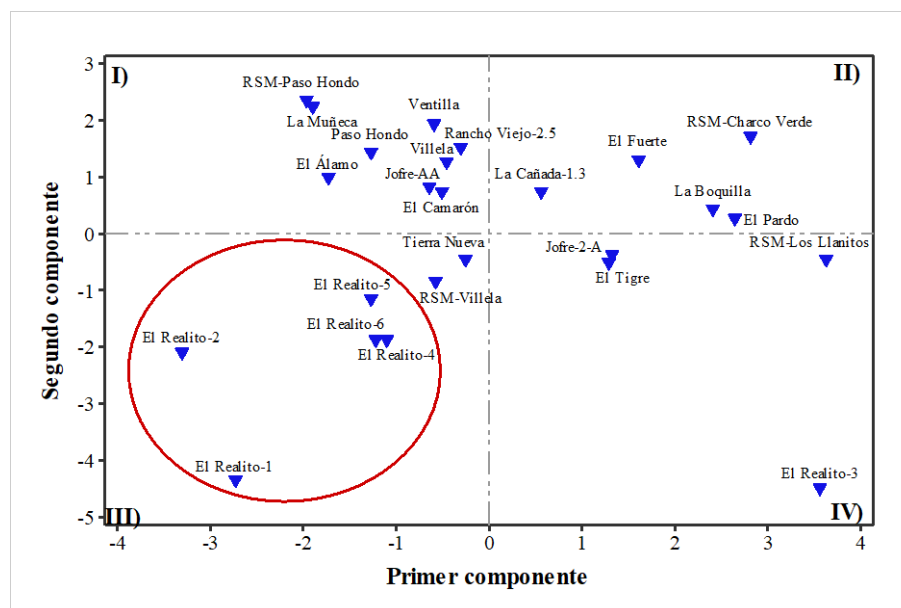


Figura 38. ACP de los sitios de muestreo de agua en la cuenca de la presa El Realito.

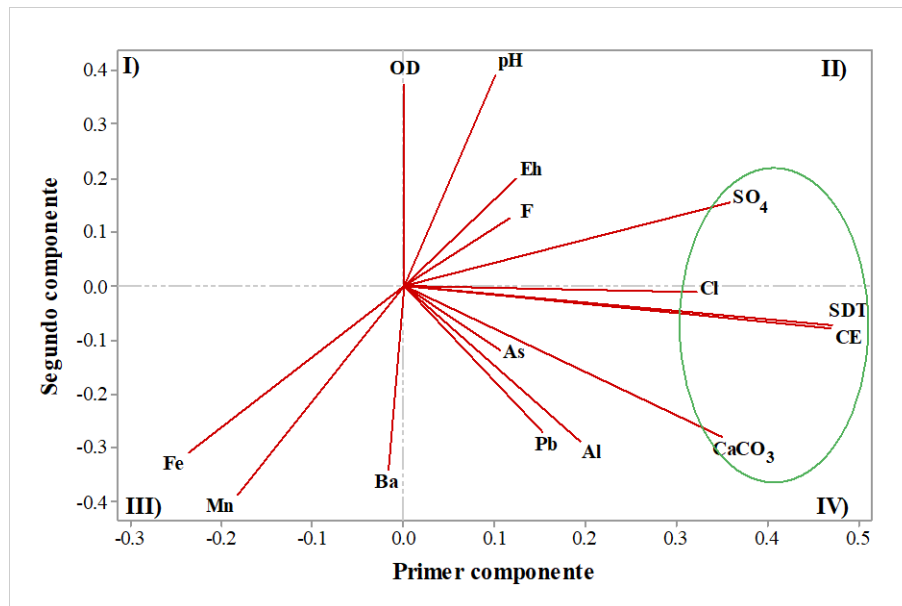


Figura 39. ACP que muestra la asociación de elementos en agua de la cuenca de la presa El Realito.

4.2 Resultados del análisis de sedimentos

4.2.1 Concentraciones de elementos en los sedimentos por FRX

En la Tabla 13 se muestran los 57 sitios de muestreo donde se recolectaron sedimento, así como la microcuenca a la que pertenecen.

Tabla 13. Claves de sitios de muestras de sedimentos y su distancia a la cortina de presa El Realito.

Microcuenca	Nombre de la muestra	Distancia (km)	X	Y
Presa El Realito	ER-6	0.33	371731	2389937.683
Presa El Realito	ER-3	0.86	371365	2390328
Presa El Realito	ER-2	0.94	371308	2390420.8
Presa El Realito	ER-1	1.23	371166	2390606.4
Presa El Realito	ER-4	1.31	371109	2390664.25
Presa El Realito	ER-5	1.37	371068	2390697.82
Presa El Realito	RSM-El Camarón	16.25	361098	2396160
Arroyo El Camarón	El Camarón	16.51	361080	2396411
Arroyo Paso Hondo	RSM-Paso Hondo	22.10	356800	2397825
Arroyo Paso Hondo	Paso Hondo	22.43	356925	2398005
Presa El Realito	RSM-La Cañada	26.89	352988	2398584.363
Presa El Realito	RSM-El Tigre	26.98	352697	2398699

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Microcuenca	Nombre de la muestra	Distancia (km)	X	Y
Arroyo La Cañada	LC-1.1	27.07	352939	2398709
Arroyo La Cañada	LC-1.2	27.08	352939	2398708
Arroyo La Cañada	LC-1.3	27.22	353404	2399316
Arroyo El Tigre	El Tigre-S	27.30	352286	2398688
Arroyo El Tigre	El Tigre-C	37.32	348928	2392447
Presa El Realito	RSM-Charco Verde	42.10	342842	2405990
Arroyo San José	RV-4	46.45	340414	2407862
Arroyo San José	RV-2.5	46.74	341778	2411550
Arroyo San José	RV-2.3	46.97	341960	2411649
Arroyo San José	RV-2.2	47.11	342079	2411625
Arroyo San José	RV-2.1	47.60	342372	2411334
Arroyo San José	RV-2	47.64	342408	2411330
Arroyo San José	RV-3	48.68	341329	2409556
Arroyo San José	PV-5	50.74	344563	2413352
Arroyo San José	RV-1.3	50.81	341264	2411572
Arroyo San José	RV-2.8	50.85	341846	2411358
Arroyo San José	RV-1.2	50.92	352939	2398708
Arroyo San José	PV-6	50.95	344755	2412835
Arroyo San José	RV-1.1	50.99	341108	2411499
Arroyo San José	RV-2.7	51.01	341952.8	2411443
Arroyo San José	RV-2.6	51.04	341966	2411470
Presa El Realito	RSM-Los Llanitos	84.39	338327	2407903
Arroyo Los Llanitos	Los Llanitos	84.48	338369	2407950
Presa El Realito	RSM-Jofre-2	94.74	331060	2409094
Río Jofre	Jofre-2	94.85	330978	2409081
Río Villela	RSM-Villela	96.10	329956	2409290
Río Villela	Villela	96.43	329886	2409140
Río Villela	El Fuerte	104.13	329108	2403350
Río Villela	El Tule	105.86	330138	2396623
Presa El Realito	RSM-Ojo Caliente	106.86	318648	2416547
Arroyo Las Enramadas	Ojo Caliente	107.09	318569	2416717
Arroyo El Chiquito-Arroyo El Meco	La Boquilla	116.26	311729	2420658
Arroyo El Meco	El Meco	120.11	308955	2422524
Arroyo El Chiquito	El Pardo	120.77	308477	2421584
Arroyo El Chiquito	El Pardo-2	120.91	308364	2421618
Río Jofre	Tierra Nueva	123.17	337768	2394628
Río Jofre	La Muñeca	123.92	339774	2392333
Río Villela	El Álamo-S	128.91	316802	2389522
Presa El Realito	Villa de Reyes	134.51	300860	2413795
Río Jofre	Jofre-AA	139.19	343002	2380795
Río Altamira	RSM-Altamira	140.11	297898	2409975
Arroyo La Hilada	RSM-F	140.40	297720	2409863

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Microcuenca	Nombre de la muestra	Distancia (km)	X	Y
Río Altamira	Altamira	140.52	297538	2410039
Arroyo La Hilada	El Refugio	144.19	297838	2407352
Río Altamira	La Ventilla	150.03	289303	2409551

Del análisis realizado por FRX de 41 elementos químicos analizados, no se detectaron concentraciones de P y Co. Además, en menos del 10% de los sitios muestreados se encontraron concentraciones de Cl, Se, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb y Hg, por lo que estos elementos no fueron considerados en el análisis final.

En la Tabla 14 se muestran las concentraciones de los elementos analizados, de los cuales solo se consideraron las fracciones con un tamaño de partícula menor a 0.063 y 0.038 mm (fracciones F y G). Entre los elementos analizados, se incluye Mg, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Ba y Pb. Los resultados muestran una alta variabilidad en las concentraciones de estos elementos, lo que se refleja en los valores de p obtenidos en la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov (K-S), que indican que los datos no siguen una distribución normal ($p < 0.05$).

Tabla 14. Resultados de concentraciones de metales y metaloides en sedimentos en la cuenca presa El Realito y prueba de normalidad (valor de p) de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0.05$).

Variable (mg/kg)	N	Promedio	Mínimo	Máximo	K-S p
Cr	52	40.43	20.40	157.50	$p < .01$
Ni	16	81.18	18.33	101	$p < .01$
As	56	23.87	7.18	97.2	$p < .01$
Ba	57	391.92	197	600.5	$p > .20$
Pb	57	42.68	20.33	287	$p < .01$
Mg	24	4,654.09	101	13,066.7	$p > .20$
Al	56	7,694.92	4,160	16,150	$p > .20$
Si	57	45,225.88	22,917	82,466.7	$p > .20$
S	13	971.46	101	14,296.5	$p > .20$
Ca	57	22,449.46	6,808	104,866.7	$p < .01$
Fe	57	54,688.56	19,856.33	221,116.7	$p < .01$

En la Figura 40 se presentan los resultados de las concentraciones en porcentaje de elementos mayores como Si, Ca, Fe, Mg, Al y S en los sitios de muestreo a lo largo de la distancia hacia la presa El Realito. Los gráficos muestran cómo las concentraciones de estos elementos varían según la ubicación, reflejando la distribución espacial y la concentración relativa de cada elemento en los diferentes puntos de muestreo.

El Si y el Al muestran concentraciones relativamente estables a medida que se alejan de la presa, mientras que el Mg y el S exhiben una variabilidad más notoria, especialmente en las zonas cercanas a la presa. En contraste, Ca y Fe muestran una tendencia de aumento conforme se avanza río abajo.

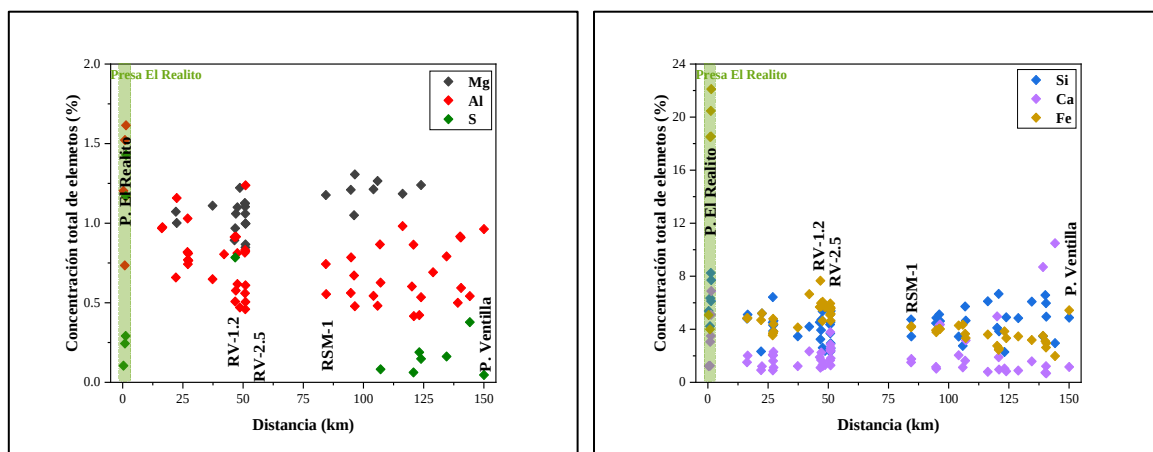


Figura 40. Resultados de la concentración de Si, Ca, Fe, Mg Al y S en los sitios de muestreo respecto a la distancia de la cortina de la presa El Realito.

La Figura 41 muestra las concentraciones de Cr, Ni, Ba y Pb en los sedimentos de los sitios de muestreo a lo largo de la cuenca de la presa El Realito. Los resultados indican que las concentraciones de estos elementos varían significativamente con respecto a la distancia de la cortina de la presa. En el caso de Ba, se observa que las concentraciones de aumentan conforme se acerca a la presa El Realito. Por otro lado, el Cr muestra las concentraciones más altas en la presa misma, donde su concentración aumenta notablemente. En el caso de Pb, se identifican concentraciones elevadas en sitios aguas arriba de la presa El Realito. Finalmente, las concentraciones de Ni solo fueron detectadas en algunos sitios, indicando su presencia más dispersa a lo largo de la cuenca.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

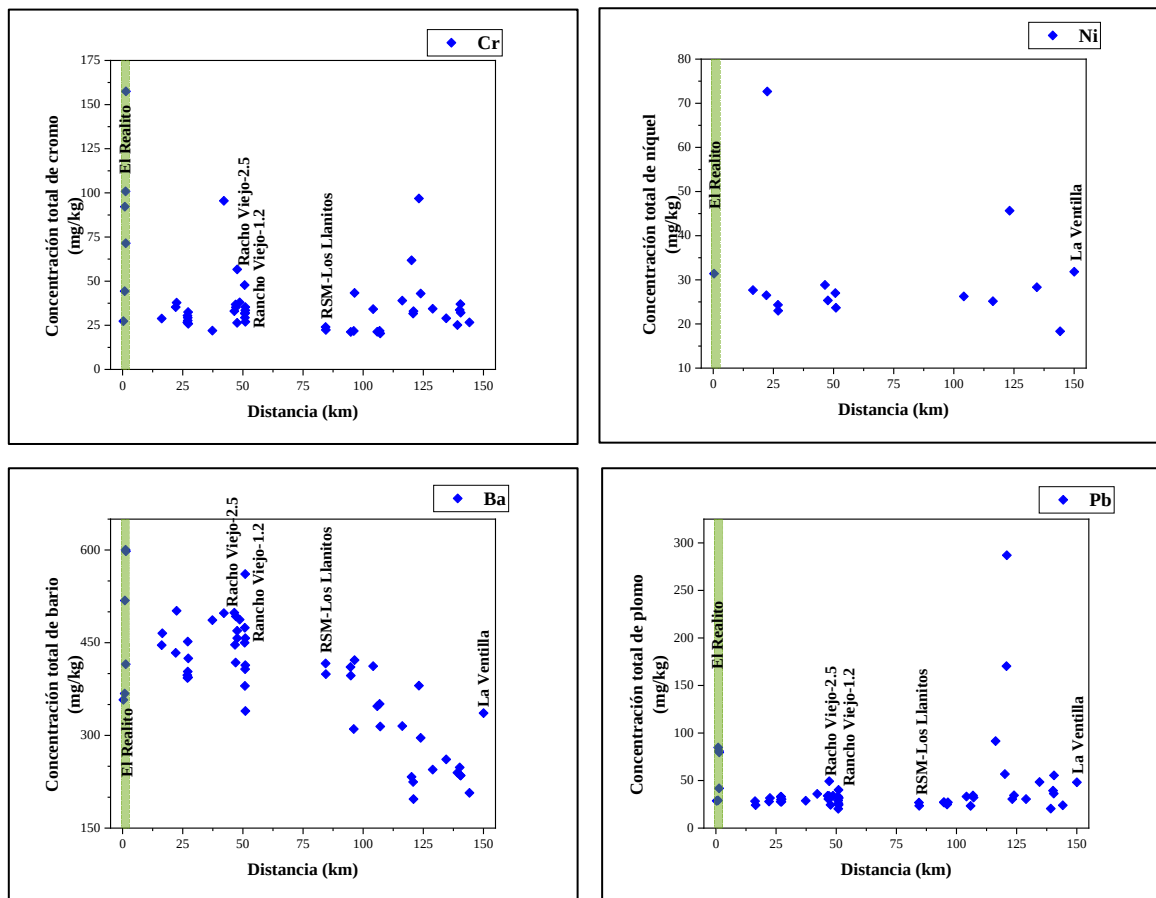


Figura 41. Resultados de la concentración de Cr, Ni, Ba y Pb en sedimentos respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito.

En México, no existe una normativa que establezca los límites permisibles de concentraciones de metales en los sedimentos. Sin embargo, la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 proporciona criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio (DOF, 2007). En el país de Canadá, cuentan con la Guía Provisional de Calidad del Sedimento (ISQG, por sus siglas en inglés, Interim Sediment Quality Guideline) y los Niveles de Efecto Probable (PEL, por sus siglas en inglés, Probable Effect Level), que proporcionan valores de referencia para determinar la probabilidad de efectos biológicos adversos a la exposición de elementos como As, Cr y Pb en los sedimentos de los sistemas acuáticos. El ISQG representa la concentración por el cual es poco probable que se produzcan efectos biológicos adversos, mientras que el

PEL define el valor por encima del cual los efectos adversos biológicos ocurren con frecuencia (Environment Canada, 2003). En la Tabla 15 se presentan las concentraciones de referencia de sedimentos de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, la ISQG y PEL.

Tabla 15. Límites permisibles para metales en sedimentos establecidos por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, ISQG y PEL. (Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999).

Norma	As (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Pb (mg/kg)
NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004	22	280 (cromo hexavalente)	1,600	400
ISQG	5.9	37.3	-	35
PEL	17	90	-	91.3

La norma mexicana (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) solo regula el cromo en su forma hexavalente (Cr VI) en los sedimentos con una concentración de referencia de 280 mg/kg. Este metal es biolixiviable y soluble en agua, lo que facilita su contaminación de los cuerpos de agua, los cuales se pueden volverse accesibles para los humanos (Mohanty et al., 2023). En cuanto a las ISQG y PEL, están regulan la concentración total de Cr en 37.3 y 90 mg/kg, respectivamente. Los resultados obtenidos en los sedimentos de la cuenca presa El Realito se encuentran por debajo del límite de la norma mexicana, sin embargo, en algunos sitios se detectaron concentraciones superiores a 90 mg/kg incluyendo la presa El Realito, que presentó una concentración de 157 mg/kg, lo que supera el valor del PEL y está relacionado con la probabilidad de efectos biológicos adversos.

Respecto al níquel y bario, la norma mexicana establece concentraciones de referencia 1,600 y 5,400 respectivamente. En la cuenca de la presa El Realito, el valor más alto detectado para níquel es de 101 mg/kg y para bario de 600.5 mg/kg. Sin embargo, estos elementos no están normados en la ISQG ni en el PEL.

En la Figura 42 se muestra la concentración de arsénico en los sitios de muestreo a lo largo de la presa El Realito. La línea roja representa la concentración de referencia total para uso agrícola, residencial y/o comercial que está establecida en 22 mg/kg según la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Los resultados obtenidos en los sedimentos de la cuenca muestran concentraciones de arsénico superiores a los límites establecidos por la NOM-147-

SEMARNAT/SSA1-2004, la ISQG (5.6 mg/kg) y el PEL (17 mg/kg), lo que indica que los niveles de arsénico en algunos sitios pueden ser motivo de preocupación, especialmente en áreas cercanas a la presa El Realito, donde se observan valores significativamente altos. Estos resultados sugieren que el arsénico en los sedimentos podría estar representando un riesgo potencial tanto para la salud humana como para los ecosistemas acuáticos.

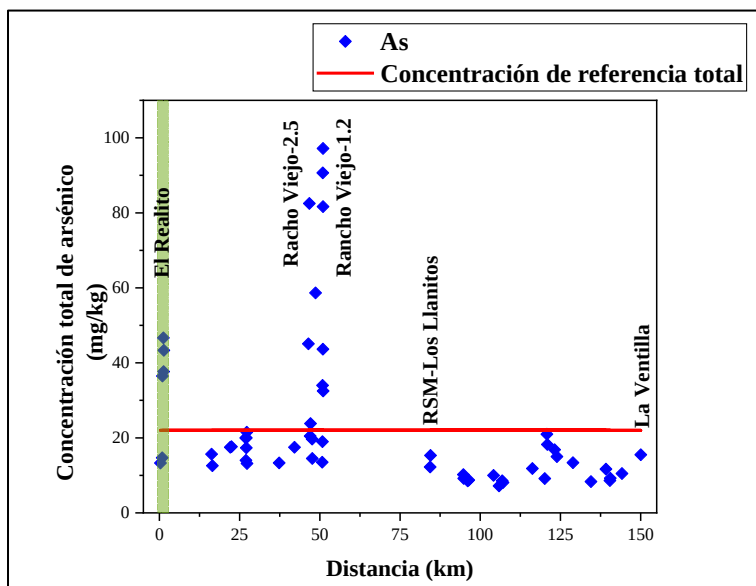
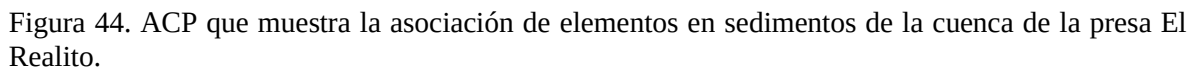
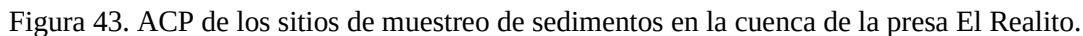


Figura 42. Resultados de la concentración de arsénico en sedimentos respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito. la línea roja es la concentración de referencia de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Las concentraciones detectadas de plomo en la cuenca presa El Realito son menores a 287 mg/kg, lo que está por debajo del límite de 400 mg/kg establecido por la norma mexicana. Sin embargo, estas concentraciones superan los valores establecidos por el ISQG y el PEL, lo que podría indicar un riesgo potencial para la calidad de la cuenca y la salud de los ecosistemas acuáticos.

En las Figuras 43 y 44 se muestran los análisis de componentes principales. El análisis se realizó con 52 muestras y 8 elementos químicos. En la Figura 43 se observa que las muestras del Realito se agrupan, y se asocia por las diferencias en las concentraciones de los metales y metaloides. Algunas de las muestras de rancho viejo se identifican en otro grupo y se relaciona por los altos contenidos de arsénico. Las muestras del El Pardo, Villa de Reyes,



4.2.2 Caracterización mineralógica por DRX

Se realizó de la fracción G (<0.038 mm) la caracterización mineralógica de 6 sitios de interés, de los cuales un corresponde a la Presa El Realito y los otros 5 se encuentra aguas arriba de la presa El Realito. De estos últimos, 2 sitios se encuentran ubicados en la microcuenca Arroyo San José (Rancho Viejo-1.2 y Rancho Viejo-2.5), y los otros 3 sitios se localizan a lo largo del río Santa María (RSM-Charco Verde, RSM-La Cañada y RSM-El Camarón), como se muestra en la Tabla 16 y Anexo 3.

En la presa El Realito se observa la presencia de feldespatos (sanidina, microclina, ortoclasa y albita), silicatos (cuarzo, tridimita y cristobalita), arcilla (montmorillonita) e hidróxidos (Hidrotalcita). Aguas arriba, específicamente en los sitios RV-1.2 y RV-2.5 se identifican cuarzo, sanidina y bentonita, destacando en RV-1.2 la presencia de fluorita y fluoroflogopita; mientras que en RV-2.5 se encuentran sulfuros (pirita), sulfatos (yeso) y feldespatos (anortita). En las muestras de RSM con Charco Verde, La Cañada y El Camarón se observan principalmente silicatos, feldespatos, arcillas, y carbonatos, con estos últimos presentes únicamente en las muestras de RSM con La Cañada y El Camarón.

Tabla 16. Fases cristalinas y su abundancia relativa en los sitios de interés.

Fórmula	Nombre	Rancho- Viejo 1.2	Rancho- Viejo 2.5	RSM- Charco Verde	RSM- La Cañada	RSM-El Camarón	Presa El Realito
SiO ₂	Cuarzo	18.8%	26%	24.6%	27.2%	31.6%	13.3%
(K _{0.831} Na _{0.169})(AlSi ₃ O ₈)	Sanidina	18.1%	11.5%	-	14.8%	20.1%	12.2%
KAlSi ₃ O ₈	Microclina	-	-	-	-	-	11.6%
K _{0.93} Na _{0.07} (AlSi ₃ O ₈)	Ortoclasa	-	-	-	-	-	10.3%
NaAlSi ₃ O ₈	Albita	-	15.4%	-	-	-	14.3%
(Ca,N _a) _{0.3} Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *H ₂ O	Montmorillonita, rodamiento de Ca	-	-	-	-	-	14.5%
SiO ₂	Tridimita	-	-	3.7%	-	-	7.4%
SiO ₂	Cristobalita	-	-	6.1%	-	-	12.1%
Mg(0.667Al _{0.333})(OH) ₂ (CO ₃) _{0.167} (H ₂ O) _{0.5}	Hidrotalcita	-	-	-	-	-	4.3%
K ₄ Al ₄ Si ₁₂ O ₃₂	Ortoclasa	-	-	-	13.9%	12.8%	-
Na _{0.0685} Ca _{0.347} Al _{1.46} Si _{2.54} O ₈	Albita, rodamiento de Ca	-	-	-	14.2%	19.4%	-
(Na,K)(Si ₃ Al)O ₈	Anortoclasa	-	-	-	11.1%	-	-
CaCO ₃	Calcita	-	-	-	9.5%	5.7%	-
Ca _{0.2} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *H ₂ O	Montmorillonita cálcica	-	-	3.5%	8.2%	9.5%	-
Fe ₂ O ₃	Hematita	-	-	-	1.1%	0.9%	-

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Fórmula	Nombre	Rancho- Viejo 1.2	Rancho- Viejo 2.5	RSM- Charco Verde	RSM- La Cañada	RSM-El Camarón	Presa El Realito
$(\text{Na,Ca})_{0.3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Bentonita	25.9%	9.3%	-	-	-	-
$(\text{Ca}_{2.133}\text{Na}_{1.867})(\text{Si}_{10.003}\text{Al}_{5.987})\text{O}_{32}$	Anortita, rodamiento de Na	-	23.3%	-	-	-	-
FeS_2	Pirita	-	12.3%	-	-	-	-
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Yeso	-	2.3%	-	-	-	-
CaF_2	Fluorita	21.7%	-	-	-	-	-
$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}\text{F}_2$	Fluoroflogopita	15.5%	-	-	-	-	-
$\text{K}_{0.95}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Microclina	-	-	22.1%	-	-	-
$(\text{Na,Ca})(\text{Si,Al})_4\text{O}_8$	Albita, rodamiento de Ca	-	-	14.7%	-	-	-
$\text{K}_{0.42}\text{Na}_{0.58}\text{Ca}_{0.03}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	Sanidina	-	-	25.3%	-	-	-

Según Plumlee (1999), los sedimentos fluviales ubicados aguas debajo de depósitos minerales meteorizados presentan una mezcla de minerales primarios, como cuarzo, feldespatos, arcillas y óxidos de hierro, y minerales secundarios, como arcillas, hidróxidos, carbonatos y sulfatos metálicos. Los minerales primarios provienen directamente del depósito y de las rocas subyacentes, mientras que los minerales secundarios se forman por meteorización y se concentran cerca de la superficie debido a la erosión o actividad minera.

En relación con los minerales primarios y secundarios mencionados por Plumlee (1999) los resultados obtenidos en la Tabla 16 muestran la abundancia relativa de fases cristalinas en los sedimentos de diferentes sitios de muestreo en la cuenca de la presa El Realito. Minerales como el cuarzo y los feldespatos (como sanidina y albita) son predominantes en los sedimentos de los sitios RV-1.2, RV-2.5, y RSM-Charco Verde. Además, los minerales como montmorillonita, hidrotalcita, y cristobalita, se observan en menor proporción en los sitios de muestreo, pero son relevantes en las fracciones más pequeñas de los sedimentos, como se puede ver en los valores de abundancia relativa en las columnas correspondientes. Estos minerales secundarios se forman como resultado de la meteorización y la exposición de los depósitos minerales. La distribución de estos minerales a lo largo de los sitios de muestreo confirma el comportamiento observado por Plumlee (1999) sobre la presencia y formación de minerales primarios y secundarios debido a la meteorización, la erosión y las actividades humanas, como la minería. Estos minerales pueden influir en la composición química de los sedimentos, afectando la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos cercanos.

4.2.3 Caracterización mineralógica por MEB

Los resultados de MEB de la muestra RV-1.2 muestran la presencia de aluminosilicatos y fluorita (Figura 45 y Tabla 17) y la presencia de elementos de tierras raras (La, Ce y Nd) como se muestra en la Figura 46 y Tabla 18, mientras que en la RV-2.5 se encontró pirita de estructura framboidal y aluminosilicatos como se muestra en la Figura 47 , y ambas muestras se presenta impurezas de arsénico (Tabla 19).

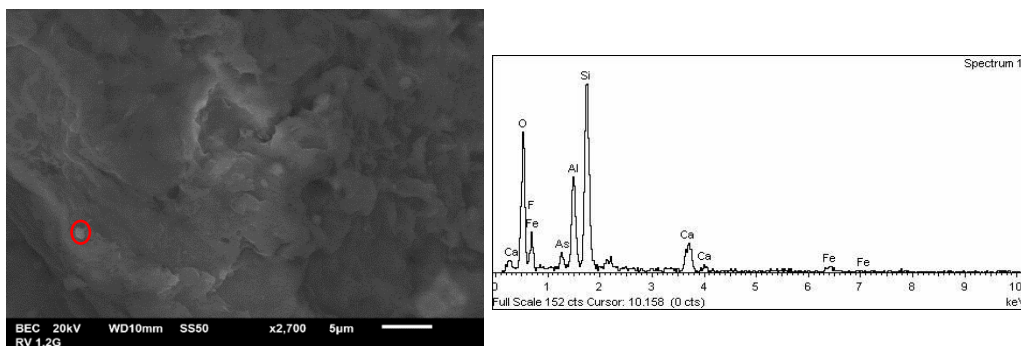


Figura 45. Micrografía de la muestra RV-1.2 y resultados de análisis EDS sobre el punto que ahí indica.

Tabla 17. Proporciones atómicas de elementos en la muestra RV-1.2.

Elemento	Peso %	Atómico %
O	33	43.05
F	30.17	33.18
Al	6.43	4.98
Si	15.68	11.67
Ca	11.40	5.94
Fe	2.37	0.89
As	0.94	0.26
Total	100	

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

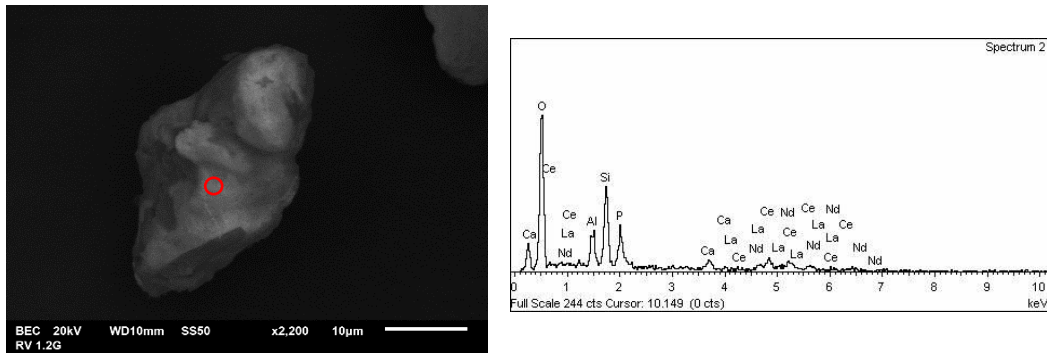


Figura 46. Micrografía de la muestra RV-2.1 y resultados de análisis EDS con presencia de tierras raras.

Tabla 18. Proporciones atómicas de elementos en la muestra RV-1.2 con contenido de tierras raras.

Elemento	Peso %	Atómico %
O	56.27	77.55
Al	5.5	4.50
Si	12.61	9.9
P	5.94	4.23
Ca	1.85	1.02
La	4.8	0.76
Ce	9.81	1.54
Nd	3.22	0.49
Total	100	

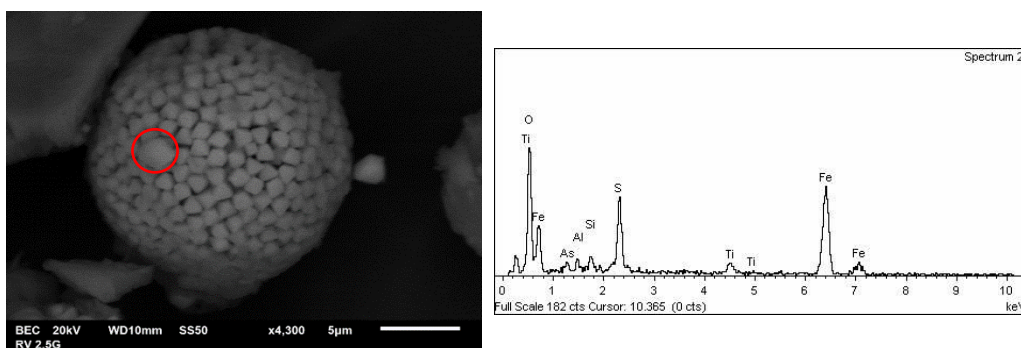


Figura 47. Micrografía de la muestra RV-2.5 y resultados de análisis EDS sobre el punto que ahí indica.

Tabla 19. Proporciones atómicas de elementos en la muestra RV-2.5.

Elemento	Peso %	Atómico %
O	41.43	67.7
Al	1.38	1.34
Si	1.97	1.84
S	9.27	7.56
Ti	2.35	1.28
Fe	42.5	19.90
As	1.11	0.39
Total	100	

Onishi y Sandell (1955) señala que el arsénico puede encontrarse en minerales como el cuarzo, el feldespato y otros aluminosilicatos, así como en minerales de hierro. También se menciona que el arsénico puede sustituir parcialmente al silicio, al aluminio o al hierro dentro de la estructura cristalina de estos minerales. Bundschuh (2008) señala que en minerales como la fluorita se presentan concentraciones menores a 2 mg/kg de arsénico

Plumlee (1999) menciona que sulfuros con texturas framboidales y coloformes se formaron en condiciones de alta sobresaturación, y debido a su superficie tienden a ser menos estables durante la meteorización de los sulfuros con caras cristalinas bien desarrolladas. La presencia de arsénico en la pirita (FeS_2) reduce considerablemente su resistencia a la oxidación. En un estudio que se realizó por Plumlee (1989) demostró que la pirita con un pequeño porcentaje de peso de arsénico se meteoriza rápidamente incluso sin agua líquida, simplemente por las reacciones del mineral con el vapor del agua en el aire.

5. GEOQUÍMICA DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

5.1 Distribución de metales y metaloides en agua y sedimentos

5.1.1 Agua

En la Tabla 20 se muestran los promedios de los parámetros fisicoquímicos comparando las condiciones de subálveo, presa y álveo. En el caso de álveo, se presentan los valores más altos en pH, oxígeno disuelto y temperatura. En el subálveo se presentan las concentraciones más altas del potencial redox, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, cloruros sulfatos alcalinidad, fluoruros y arsénico (V). En las presas se presentan las concentraciones más altas en nitratos que en álveo y subálveo.

Tabla 20. Valores promedio de los parámetros fisicoquímicos comparando con el tipo de agua.

Variable	Subálveo	Presa	Álveo
pH	7.723	7.421	8.104
Eh (mV)	265.6	183.7	255.2
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	724.8	605.1	482
OD (mg/L)	5.46	4.456	8.422
OD (%)	72.8	59	113.6
SDT (mg/L)	362.5	297.1	241.2
T ($^{\circ}\text{C}$)	21.59	23.10	26.06
Cl^{-} (mg/L)	29.79	25.53	27.19
SO_4^{2-} (mg/L)	67.6	37.4	53.7
CaCO_3 (mg/L)	311.0	301.7	254.2
N-NO_3^{-} (mg/L)	1.245	1.77	1.568
F^{-} (mg/L)	2.767	1.692	1.634
As (V) (mg/L)	0.3029	0.2882	0.1486

Los ANOVAS y los resultados de la prueba de Tukey (presentados en las Figuras 48, 49 y 50) indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tipos de agua (álveo, subálveo y presa).

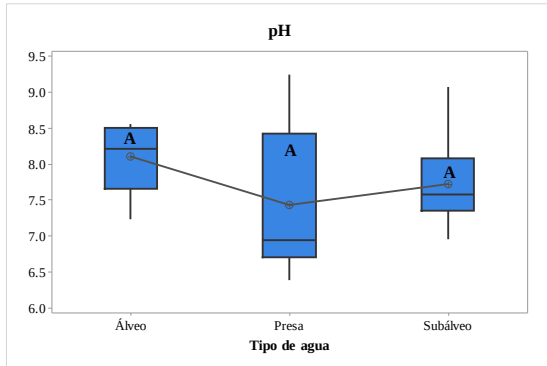


Figura 48. Resultados de la prueba de Tukey para pH en campo en muestras de agua comparando el tipo de agua. $n = 28$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.262$.

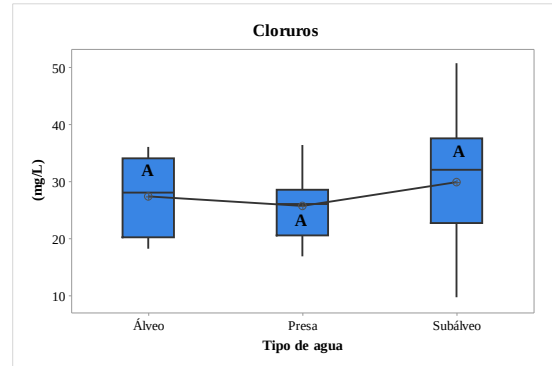


Figura 49. Resultados de la prueba de Tukey para cloruros en muestras de agua comparando el tipo de agua. $n = 28$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.558$.

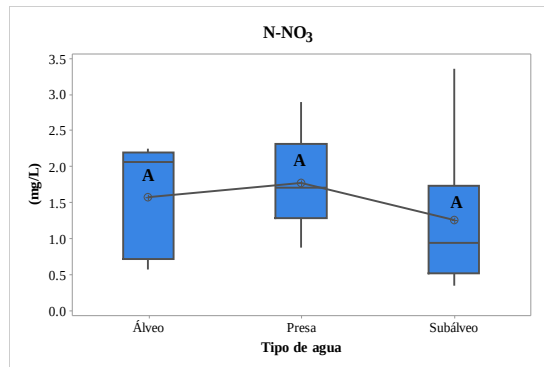


Figura 50. Resultados de la prueba de Tukey para nitrógeno de nitratos en muestras de agua comparando el tipo de agua. $n = 23$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.475$.

El resto de los parámetros fisicoquímicos al no presentar una distribución normal se realizó la prueba de Kruskal-Wallis comparando las variables con el tipo de agua como se muestra en Tabla 21. Se encontraron diferencias significativas en el potencial redox entre presas y subálveo, oxígeno disuelto en concentración y porcentaje en presa y álveo. En cambio, otros parámetros fisicoquímicos como la conductividad eléctrica, temperatura y concentraciones de fluoruros y arsénico (V) no muestran variaciones significativas, sugiriendo cierta homogeneidad en estos aspectos a lo largo del sistema.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 21. Resultados del valor de p al comparar las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos de tipo de agua en la cuenca presa El Realito con el método de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

Tipo de agua	Eh (N= 28)	CE (N= 28)	OD (N= 28)	OD% (N= 28)	SDT (N= 28)	°C (N= 28)	SO ₄ ²⁻ (N= 28)	CaCO ₃ (N= 28)	F ⁻ (N= 28)	As (v) (N= 26)
Presa, subálveo	0.005	0.490	1.000	0.703	0.399	0.599	0.558	1.000	1.000	1.000
Presa, álveo	0.160	0.891	0.039	0.028	1.000	1.000	0.830	1.000	0.850	1.000
Subálveo, álveo	1.000	0.083	0.157	0.239	0.101	0.180	1.000	1.000	0.179	1.000

La distribución espacial de metales y metaloides indica una mayor retención en presas debido a que se registraron las concentraciones promedio más altas en manganeso (0.761 mg/L), hierro (0.706 mg/L), aluminio (0.1651 mg/L), bario (0.1545 mg/L) y mercurio (0.080 mg/L). Por otro lado, el subálveo presentó las concentraciones más altas de cobre (0.0262 mg/L) y plomo (0.0767 mg/L). En contraste, en el álveo se encontraron los niveles más bajos de la mayoría de los elementos analizados, destacando valores especialmente bajos de Mn (0.0144 mg/L), Fe (0.0512 mg/L) y Al (0.0554 mg/L) (Tabla 22).

Tabla 22. Valores promedio de las concentraciones de metales y metaloides comparando con el tipo de agua.

Variable (mg/L)	Subálveo	Presa	Álveo
Mn	0.290	0.761	0.0144
Fe	0.0620	0.706	0.0512
Al	0.0724	0.1651	0.0554
Ba	0.1062	0.1545	0.1358
Cu	0.0262	0.0185	0.01325
Hg	0.0458	0.080	0.0647
Pb	0.0767	0.0698	0.057

Los resultados de la prueba de normalidad para los metales y metaloides indicaron que cobre (Cu) y plomo (Pb) presentaron una distribución normal, por lo que se aplicó la prueba de Tukey para comparar las concentraciones entre los distintos tipos de agua (álveo, subálveo y presa). Como se observa en las Figuras 51 y 52, no se encontraron diferencias significativas entre los grupos, lo que indica una distribución relativamente homogénea de estos metales en los distintos tipos de agua evaluados

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

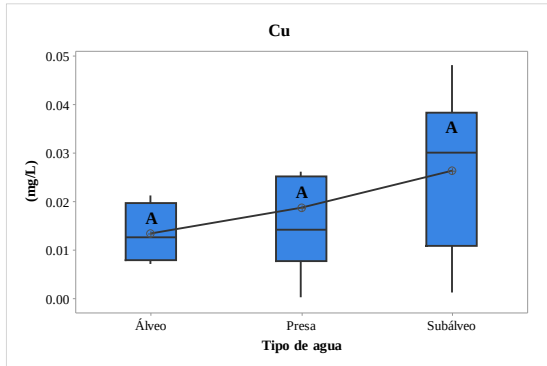


Figura 51. Resultados de la prueba de Tukey para cobre en muestras de agua comparando tipo de agua. $n = 23$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.322$.

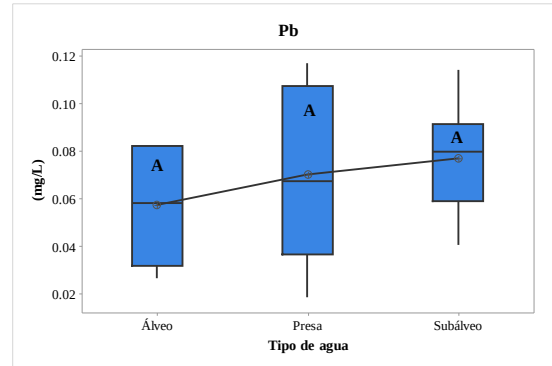


Figura 52. Resultados de la prueba de Tukey para plomo en muestras de agua comparando tipo de agua. $n = 23$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.453$.

Para los metales y metaloides cuya distribución no fue normal en Mn, Fe, Al, Ba y Hg por lo que se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para evaluar diferencias significativas entre los tipos de agua (álveo, subálveo y presa). Como se muestra en la Tabla 23, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) en ninguno de los elementos analizados.

Tabla 23. Resultados del valor de p al comparar las concentraciones de metales y metaloides en agua en la cuenca presa El Realito con el método de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.05$).

Tipo de agua	Mn (N= 27)	Fe (N= 27)	Al (N= 27)	Ba (N= 27)	As (N= 25)	Hg (N= 20)
Presa, subálveo	1.000	0.118	1.000	1.000	1.000	0.616
Presa, álveo	0.129	0.253	1.000	1.000	1.000	1.000
Subálveo, álveo	0.139	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

La Tabla 24 presenta diversas localidades remotas pertenecientes a los municipios de Tierra Nueva y Santa María del Río, caracterizadas por tener poblaciones menores a 55 habitantes en los relieves montañosos de la Sierra Madre Oriental. Estas comunidades, debido a su pequeño tamaño, ubicación geográfica, sin servicios públicos, alejadas de centros de población y caminos de acceso por terracerías, dependen en gran medida del agua del subálveo que utilizan para el uso y consumo humano, agricultura y ganadería, la cual extraen de forma artesanal mediante cubetas, mangueras y bombas en pozos construidos a mano en los lechos de los ríos como el Santa María, Jofre, Villela y otros arroyos intermitentes, todos

ellos afluentes de la presa El Realito (Figuras 53, 54 y 55). Este tipo de captación es común en zonas rurales, pero presenta limitaciones importantes en términos operativos y sanitarios, ya que no está mecanizada y requiere esfuerzo físico constante (FAO, 2013). Además, el uso de estos pozos tradicionales implica riesgos para la salud, ya que pueden estar expuestos a infiltraciones de aguas residuales o contaminantes del suelo, especialmente en regiones cercanas a zonas de actividad minera o con procesos de meteorización natural de minerales (Gibson, 1974). Esta condición pone en duda la calidad del agua que escurre por los arroyos o se filtra en el lecho de los ríos, especialmente cuando es utilizada para consumo humano, higiene personal o preparación de alimentos. Los resultados fisicoquímicos y de metales/metaloideos discutidos previamente (como arsénico, hierro, manganeso y fluoruros) refuerzan la necesidad de atender los riesgos asociados a la presencia de estos elementos en cuerpos de agua superficiales o subterráneos poco profundos, lo que representa un riesgo latente para estas comunidades rurales. Como lo mencionan Alfaro de la Torre et al. (2021) existente entre el medio urbano y el rural en lo que respecta a los servicios de abastecimiento de agua y el saneamiento. El establecimiento del Derecho Humano al Agua (DHA) y su reconocimiento representa un reto y a la vez una oportunidad para que los países analicen la situación y establezcan estrategias acordes a la problemática diversa y compleja de las comunidades rurales.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 24. Localidades remotas ubicadas en la Sierra Madre Oriental (este de la cuenca) en los municipios de Santa María del Río y Tierra Nueva.

Municipio	Localidad	Población	Municipio	Localidad	Población
Tierra Nueva	Cañada del Palmar	38	Tierra Nueva	La Huerta de San Felipe	4
	Barrio de Santiago	30		Rancho las Amapolas	4
	Cieneguilla de Lobos	28		La Presita (San Isidro)	3
	El Aguaje	23		Ortega	3
	Santa Rosa	19		La Tortuga	3
	El Mezquital	14		El Nogalito (El Rincón de la Canahuilla)	3
	Presa la Muñeca	13		El Aguacate	2
	La Estancita	10		Rancho Viejo	2
	San Rafael	9		San Francisco	2
	La Garcita	9		Milpitas	2
	Morteros (Río Morteros)	8	Santa María del Río	Rancho Viejo Tres	51
	Paso Hondo	8		Las Adjuntas	47
	El Ancón	7		El Refugio	43
	La Gloria	7		Santa Lucía	42
	La Luz	7		La Puerta	41
	El Paso de los Rangel	6		La Campanilla (El Fraile)	40
	La Tuna Mansa	6		Badillo	39
	Las Adjuntas	5		San Juan de Guadalupe (El Remolino)	39
	Santa Teresa	5		San Isidro de Bagres	33
	Las Vigas (Buena Vista)	5		El Refugio	32
	La Huerta de Cuello	4			

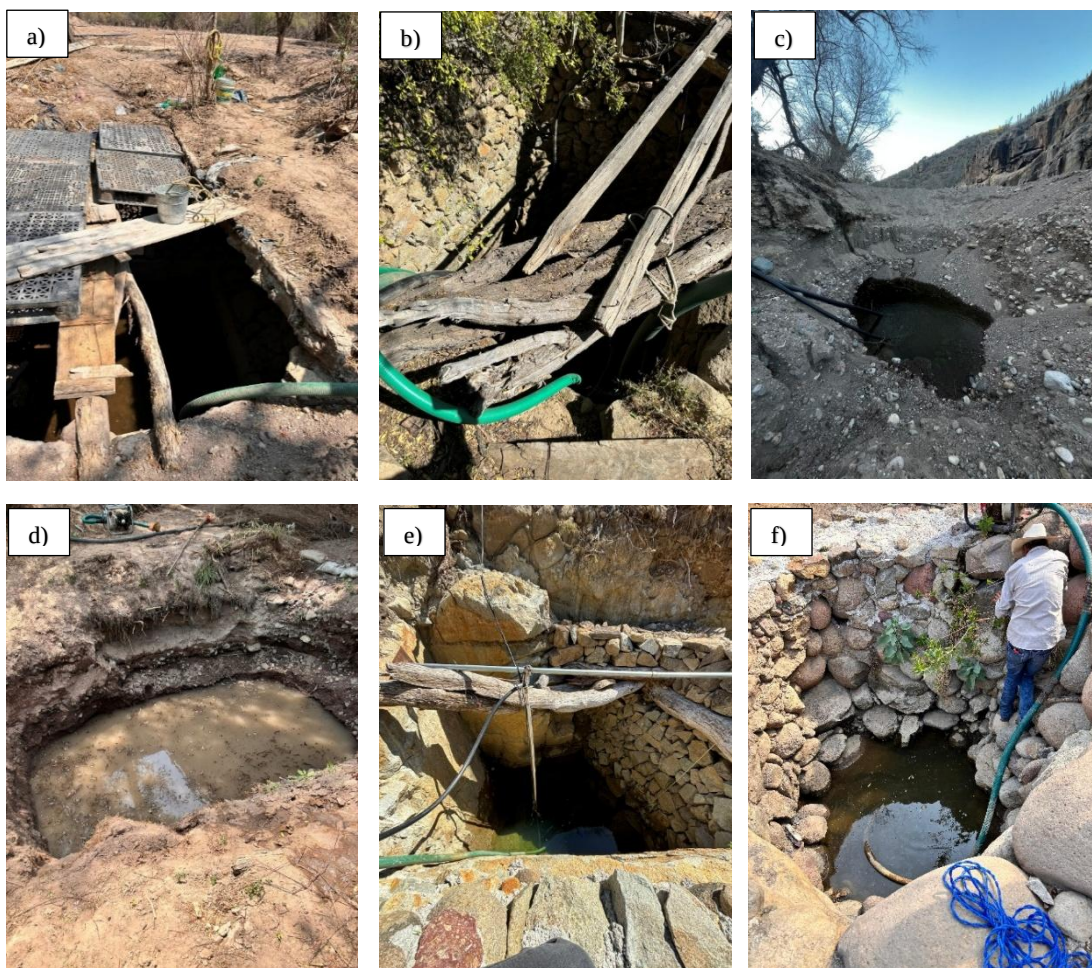


Figura 53. Subálveos en la cuenca presa El Realito. a, b y c) río Santa María; d) Tierra Nueva; e) Arroyo San José; f) Arroyo El Tigre.



Figura 54. Zonas de cultivos sobre el cauce del río Santa María regadas con agua de subálveo.

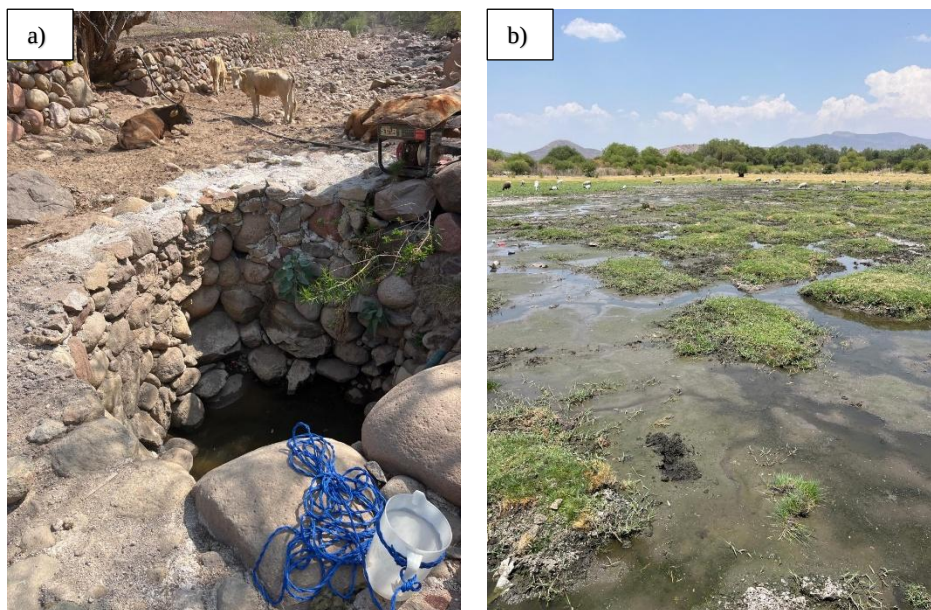


Figura 55. Uso del agua en la ganadería. a) subálveo en el Arroyo El Tigre; b) presa El Refugio.

5.1.2 Sedimentos

La Tabla 25 presenta las concentraciones promedio de metales y metaloides en sedimentos, comparadas según el tipo de agua (subálveo, presa y álveo). Se observa que las presas contienen las concentraciones más elevadas de elementos como Cr, Ba, Mg, Al, Si, S, Ca y

Fe. Esto es consistente con el papel de las presas como embalses que retienen y acumulan sedimentos transportados por el agua, favoreciendo la concentración de estos metales en el fondo. Por otro lado, el subálveo presenta las mayores concentraciones de Ni y Pb.

Tabla 25. Valores promedio de las concentraciones de metales y metaloides en sedimentos según el tipo de agua.

Variable (mg/kg)	Subálveo	Presa	Álveo
Cr	44.94	66.9	32.22
Ni	45.67	26.68	30.33
As	13.73	24.5	26.51
Ba	367.8	401.2	395.9
Pb	54.8	54.35	36.24
Mg	11,889	12,125	10,633
Al	6,407	11,518	7,411
Si	43,251	56,894	42,606
S	1,892.2	4,766	2,727
Ca	19,510	34,293	20,043
Fe	40,533	103,065	45,440

Los resultados de la prueba de normalidad indicaron que las concentraciones de Ba, Al, Si, Mg y S en sedimentos presentaron distribución normal, por lo que se aplicó la prueba de Tukey para comparar las concentraciones entre los diferentes tipos de agua (álveo, subálveo y presa). Como se observa en las Figuras 56 a la 60, no se encontraron diferencias significativas en las concentraciones de bario entre los tres tipos de agua ($p = 0.692$). En el caso del Al, se detectaron diferencias significativas ($p = 0.001$), con mayores concentraciones en sedimentos de presas en comparación con álveo y subálveo. Para el Si también se observaron diferencias significativas ($p = 0.009$), destacándose valores más altos en las presas, mientras que el Mg mostró una tendencia similar, aunque sin alcanzar significancia estadística ($p = 0.092$). Estos resultados sugieren que los sedimentos en las presas actúan como reservorios importantes de ciertos metales y metaloides, en particular Al, Si, y S, probablemente debido a la acumulación y retención de sedimentos en estos cuerpos de agua.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

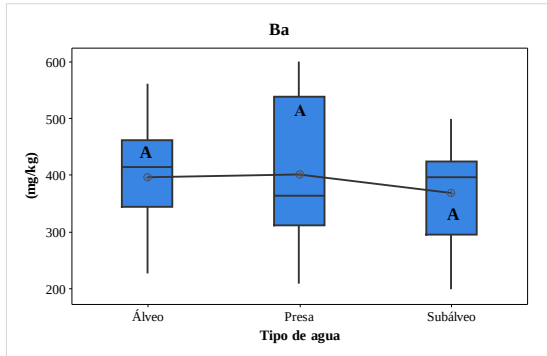


Figura 56. Resultados de la prueba de Tukey para bario en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 57$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.692$.

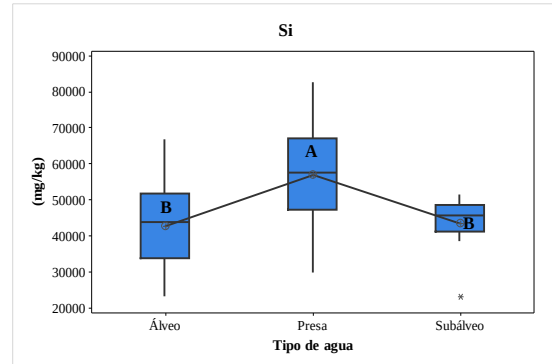


Figura 58. Resultados de la prueba de Tukey para sílice en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 57$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.009$.

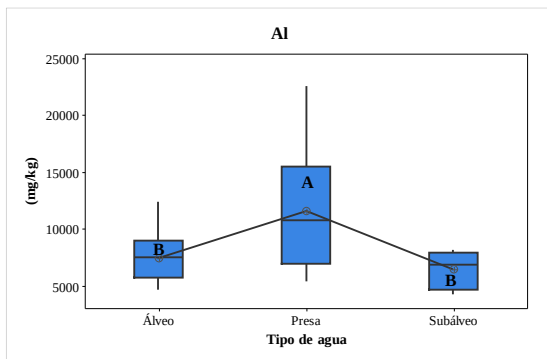


Figura 57. Resultados de la prueba de Tukey para aluminio en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 56$; $\alpha = 0.05$, $p = 0.001$.

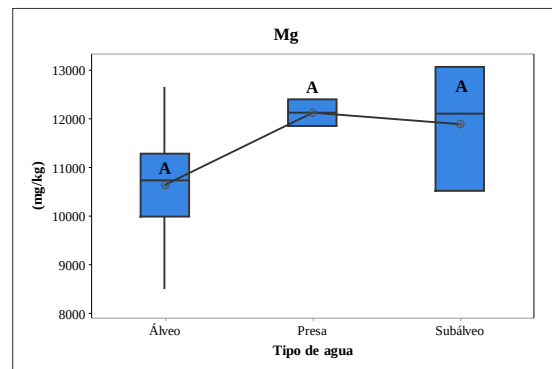


Figura 59. Resultados de la prueba de Tukey para magnesio en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 57$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.09$.

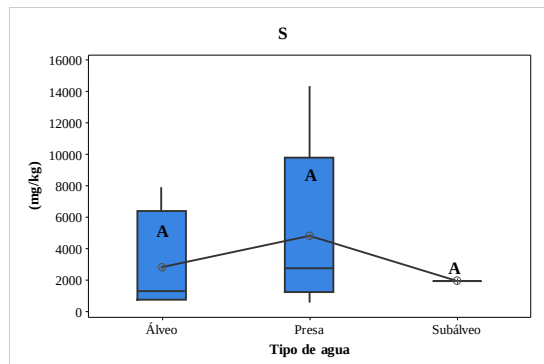


Figura 60. Resultados de la prueba de Tukey para azufre en sedimentos comparando el tipo de agua. $n = 57$; $\alpha = 0.05$ y $p = 0.009$.

Dado que los elementos como el Cr, Ni, As, Pb, S, Ca y Fe en sedimentos no presentaron una distribución normal, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar sus concentraciones entre los distintos tipos de agua (Tabla 26).

Los resultados indicaron que hubo diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de cromo ($p = 0.017$) entre presa y álveo. En el resto de los elementos analizados no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$), lo que sugiere una distribución más homogénea entre los distintos tipos de agua.

Tabla 26. Resultados del valor de p al comparar las concentraciones de metales y metaloides en sedimentos en la cuenca presa El Realito con el método de Kruscal-Wallis ($\alpha=0.05$).

Tipo de agua	Cr (N= 52)	Ni (N= 16)	As (N= 56)	Pb (N= 57)	Ca (N= 57)	Fe (N= 57)
Presa, subálveo	0.284	0.614	0.422	0.102	0.862	0.269
Presa, álveo	0.017	1.000	1.000	0.140	1.000	1.000
Subálveo, álveo	1.000	0.478	0.420	1.000	1.000	0.666

5.2 Prueba de movilidad de arsénico (V) y fluoruros

Con el objetivo de evaluar la movilidad geoquímica de elementos potencialmente tóxicos, específicamente arsénico (V) y fluoruros, se seleccionaron seis sitios de interés para el análisis. La presa El Realito es uno de estos sitios, mientras que los cinco restantes se localizan aguas arriba de la presa. De los cinco sitios ubicados aguas arriba, dos pertenecen a la microcuenca del Arroyo San José (RV-1.2 y RV-2.5) y tres se encuentran sobre el cauce del río Santa María (RSM-Charco Verde, RSM-La Cañada y RSM-El Camarón), como se observa en la Figura 61.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

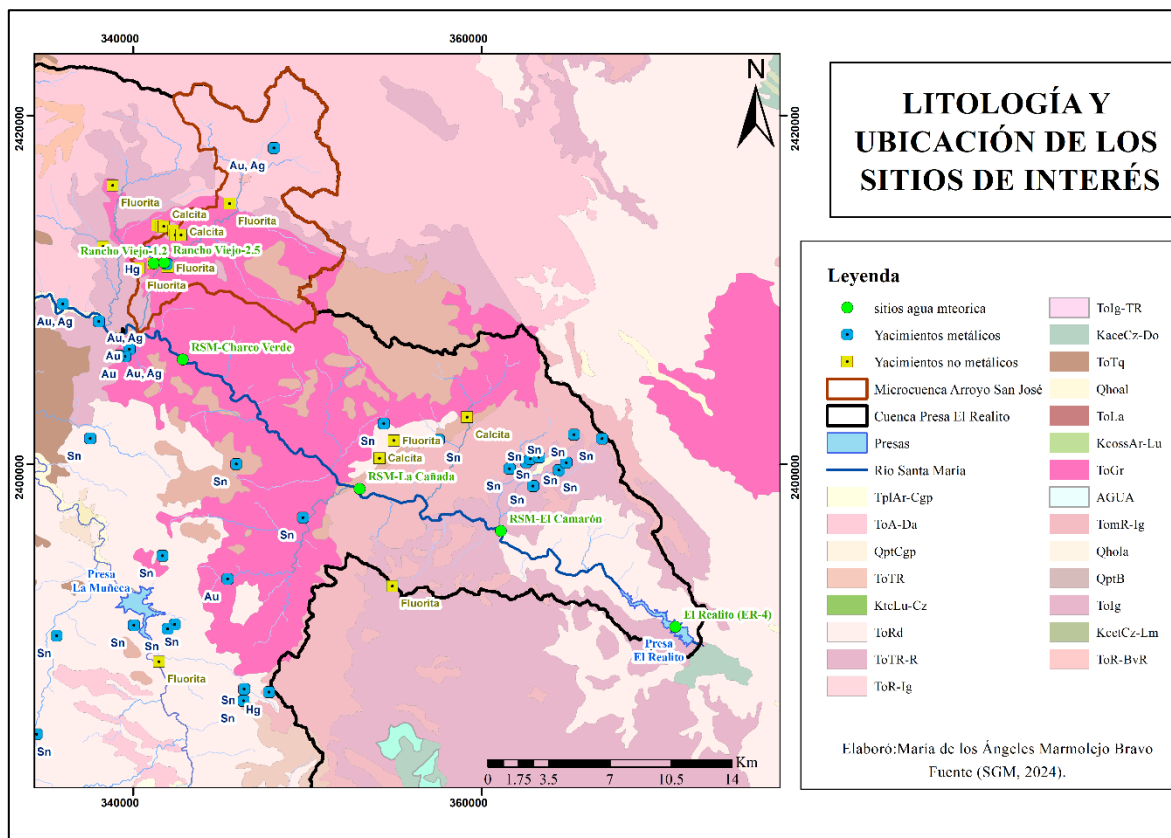


Figura 61. Litología y ubicación de los sitios de interés.

Los sitios de RV-1.2 (50.92 km) y RV-2.5 (46.74 km) presentaron las concentraciones más elevadas de arsénico, con 90.67 mg/kg y 82.50 mg/kg respectivamente (Figura 62 y Tabla 27). Estos niveles superan el valor de referencia ambiental establecido para sedimentos de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, lo que representa una fuente local de contaminación.

En la microcuenca Arroyo San José se encuentran yacimientos minerales: uno de Hg, dos de calcita y cuatro de fluorita (Figura 62) que podrían estar aportando altas concentraciones de arsénico. Elementos como aluminio, silicio, hierro y calcio muestran una tendencia a acumularse en los sedimentos de la presa El Realito (Tabla 27), lo cual indica que ésta funciona como un reservorio de materiales transportados desde aguas arriba de la cuenca.

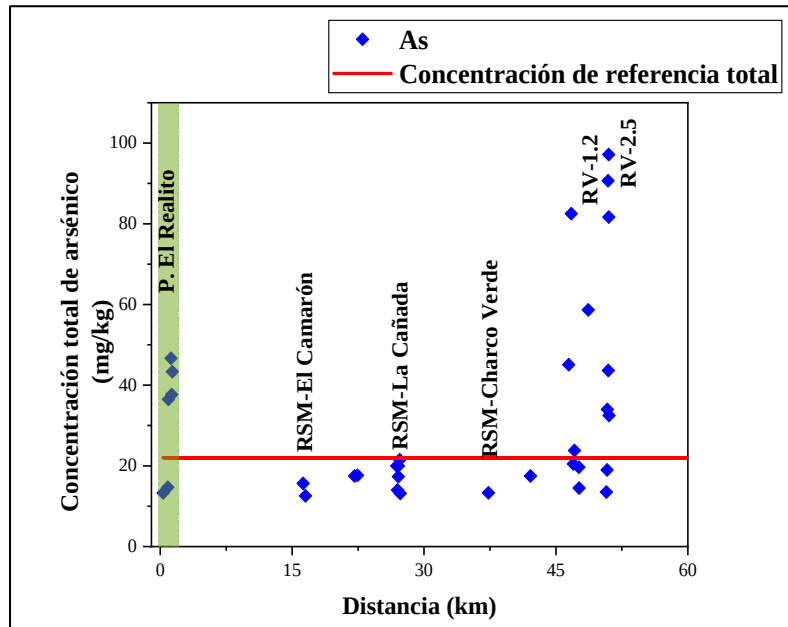


Figura 62. Concentraciones de arsénico en sedimentos de los sitios de interés respecto a la distancia a la cortina de la presa El Realito.

Tabla 27. Resultados de las concentraciones promedio de metales y metaloides en sedimentos en los sitios de interés. RSM (río Santa María).

Elemento	Unidades	Rancho Viejo 1.2	Rancho Viejo 2.5	RSM-Charco Verde	RSM-La Cañada	RSM-El Camarón	Presa El Realito
Distancia a la cortina	km	50.92	46.74	42.10	26.89	16.25	1.31
Al	%	0.46	0.51	0.81	0.82	0.97	1.17
Si	%	2.42	3.25	4.20	4.52	4.80	6.13
S	%	ND	0.78	ND	ND	ND	1.17
Ca	%	2.86	1.11	2.33	2.08	1.52	5.1
Fe	%	5.18	7.66	6.65	3.54	4.83	18.54
Cr	mg/kg	32	ND	95.50	26.67	28.83	71.5
Ni	mg/kg	ND	ND	ND	24.33	ND	ND
As	mg/kg	90.67	82.50	17.50	20	15.67	37.67
Ba	mg/kg	407.33	446.67	497.83	397.5	446	415.17
Pb	mg/kg	26	30.67	36	27.83	28.33	41.83
Hg	mg/kg	ND	15.6	ND	ND	ND	ND

De acuerdo con las cartas geológicas del SGM (Figura 63), la microcuenca Arroyo San José abarca la Zona Mineralizada de Palo Verde, en la cual se presenta producción de carbonato de calcio, la forma del depósito es irregular y se trata de un colgante de caliza recristalizada, de estructura masiva producto de metasomatismo de contacto el cual se encuentra encajonado en granodiorita, por ello, dentro de esta zona se localizan prospectos con mineralización de fluorita como Rancho Viejo 1, Las Mieleras 1, Las Mieleras 2 e Indostán; y también se encuentran prospectos de contenido de Au y Ag (Rancho Viejo). La mineralización de fluorita se relaciona con la intrusión o emplazamiento de domos complejos en los cuales se alojaron en zonas de debilidad asociado a fallas, que al estar en su fase de enfriamiento liberaron soluciones mineralizadoras ricas en flúor y al estar en contacto con rocas carbonatadas se precipitaron en rellenos de fisura, brechas, huecos cársticos, y en menor proporción reemplazando estratos calcáreos. La mineralización de fluorita es de baja temperatura, por lo que en rocas carbonatadas por lo que se pueden encontrar zonas con óxidos de hierro de intensidad moderada (SGM, 2011).

La litología que se encuentra en los sitios RV-1.2, RV-2.5 y Charco Verde es granito (ToGr) roca ígnea intrusiva; en RSM-La Cañada es andesita-dacita (ToA-Da), en RSM-El Camarón es riodacita (ToRd) y ER-4 se encuentra entre las formaciones riodacita e ignimbrita (ToIg) que pertenecen a formaciones de rocas extrusivas (Figura 61).

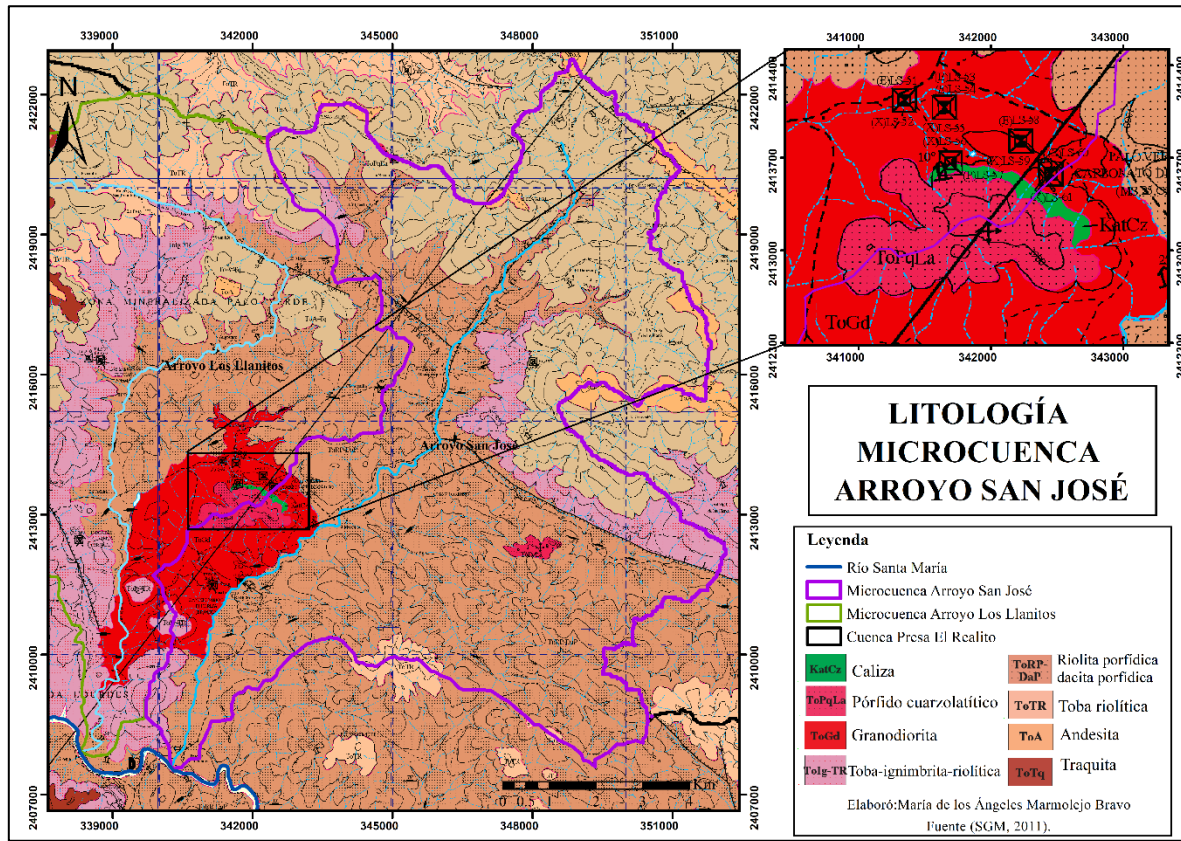


Figura 63. Litología y ubicación de los sitios de interés.

5.2.1 Arsénico (V)

Con base en los resultados de los ciclos de lavado con agua meteórica (Tablas 28 y 29), se observa que los valores de pH iniciales permanecen relativamente constantes (alrededor de 5.5), lo que corresponde a un pH ligeramente ácido característico del agua de lluvia. En contraste, los valores finales de pH en los diferentes sitios de interés muestran un aumento progresivo con cada ciclo, alcanzando valores ligeramente alcalinos (hasta 8.53 en RSM-La Cañada). Este comportamiento sugiere una reacción de neutralización entre el agua meteórica y los compuestos presentes en los sedimentos, posiblemente carbonatos o minerales con capacidad amortiguadora.

En cuanto a la conductividad eléctrica (CE), los valores iniciales son muy bajos (1-3 $\mu\text{S}/\text{cm}$), como es esperable para agua meteórica, mientras que los valores finales son notablemente más altos, especialmente en sitios como RV-2.5 (hasta 1146 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el primer ciclo) y El Realito-4 (895 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el primer ciclo), lo cual indica una alta liberación de iones solubles desde los sedimentos. A lo largo de los ciclos, la CE tiende a disminuir, lo que evidencia una reducción en la movilidad iónica, probablemente por agotamiento de las especies solubles. En general, estos resultados reflejan una significativa movilidad geoquímica de los elementos presentes en los sedimentos, con variaciones espaciales marcadas entre sitios, lo cual puede estar relacionado con la mineralogía, litología local y grado de contaminación.

Tabla 28. Valores obtenidos de pH y conductividad eléctrica iniciales en cada lavado con agua meteórica.

Ciclo	Vol. Acumulado (mL)	pH inicial	CE inicial ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1	40	5.57	1
2	80	5.55	2
3	120	5.56	2
4	160	5.55	2
5	200	5.53	3
6	240	5.58	2
7	280	5.53	2

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 29. Valores obtenidos de pH y conductividad eléctrica finales en cada lavado con agua meteórica.

Ciclo	Parámetro	Rancho Viejo-1.2	Rancho Viejo-2.5	RSM-Charco Verde	RSM-La Cañada	RSM-El Camarón	El Realito-4
1	pH	6.48	5.83	6.51	6.91	6.62	3.9
	CE (μS/cm)	81.5	1146	45	47	117	895
2	pH	6.50	6.47	5.90	6.75	6.95	4.56
	CE (μS/cm)	45	156	22.5	50	50	158.5
3	pH	6.90	6.95	6.26	6.63	7.31	4.92
	CE (μS/cm)	34	65.5	12	40	51	56
4	pH	6.99	6.96	6.26	7.93	7.35	6.01
	CE (μS/cm)	32	47	9	36	46	40
5	pH	7.08	7.35	6.63	8.53	8.01	5.97
	CE (μS/cm)	26.5	40	8	36	42	18
6	pH	7.48	7.52	6.55	7.52	7.99	6.85
	CE (μS/cm)	24.5	32.5	7	36	37.5	13.5
7	pH	6.66	7.06	6.91	-	7.18	6.3
	CE (μS/cm)	24.5	31.5	7	-	37.5	11.5

A partir de la simulación con agua meteórica (Figura 64), se observa una clara variabilidad en la movilidad del arsénico (V) y en la conductividad eléctrica (CE) entre los sitios estudiados. El sitio RSM-El Camarón destaca por presentar las concentraciones más altas de arsénico disuelto, superando los 1200 μg/L durante los primeros tres ciclos, lo que indica una alta movilidad geoquímica en ese sedimento. En contraste, los sitios RV-1.2 y El Realito-4 registraron las concentraciones más bajas, aunque con un comportamiento oscilante, manteniéndose por debajo de 25 μg/L, sin valores menores a 20 μg/L en ningún caso, lo cual sigue representando una concentración significativa.

La conductividad eléctrica sigue un patrón similar en la mayoría de los sitios: se inicia con valores altos en los primeros ciclos y disminuye gradualmente, lo que refleja una liberación inicial importante de iones solubles seguida de su agotamiento progresivo. Esta tendencia sugiere una relación directa entre la CE y la movilidad del arsénico (V), especialmente en sitios como RSM-La Cañada y Charco Verde, donde ambos parámetros decrecen simultáneamente. Los resultados confirman la existencia de diferencias en la liberación de

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

arsénico relacionadas con las características geoquímicas y litológicas del sitio, siendo más críticas en zonas con antecedentes de mineralización y alteración hidrotermal.

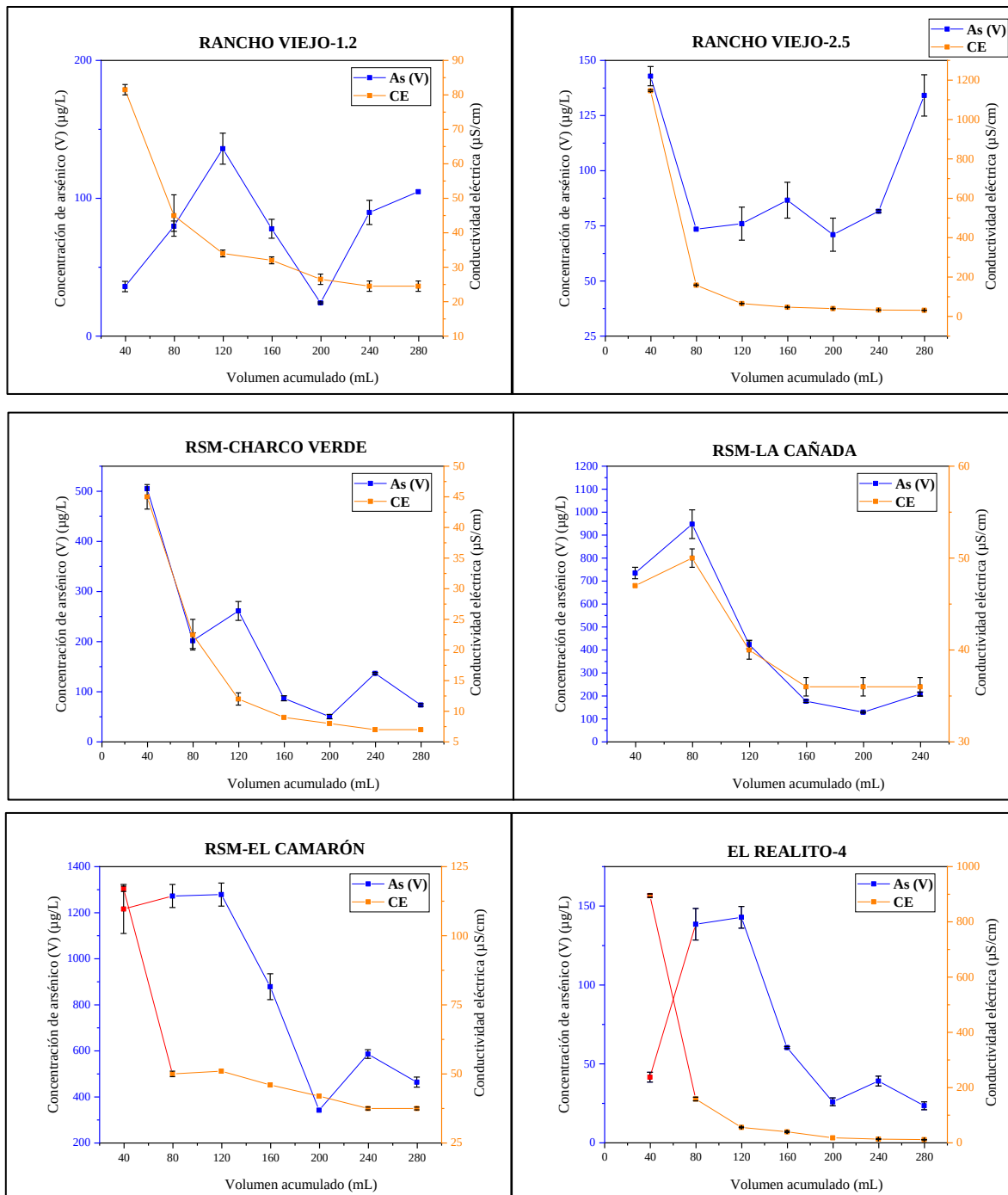


Figura 64. Resultados del agua meteórica y su relación con la concentración de arsénico (V) y conductividad eléctrica.

La movilidad del arsénico (V) en los sedimentos está fuertemente influenciada por las condiciones geoquímicas del entorno, particularmente por el pH, Eh y la composición mineralógica (Bundschuh et al., 2008). La fuerte adsorción de arseniatos a óxidos de hierro explica la baja movilidad observada en sitios como Rancho Viejo-1.2 y El Realito-4, donde posiblemente predomina una mayor disponibilidad de óxidos de Fe. Por otro lado, en sitios como RSM-El Camarón, donde se observaron concentraciones de arsénico (V) superiores a 1200 µg/L durante los primeros ciclos de lavado, esta adsorción podría verse limitada, posiblemente por una menor presencia de óxidos de Fe o Mn, o por condiciones geoquímicas desfavorables. A valores de pH altos, el arseniato presenta una afinidad comparable entre arcillas y óxidos de Fe, sin embargo, en las arcillas esta adsorción disminuye significativamente cuando el pH supera los 7 (Bundschuh et al., 2008). Además, la calcita puede actuar como una barrera efectiva para la movilización del arsénico en condiciones donde la adsorción por oxihidróxidos de Fe o Mn no es suficiente, al permitir la inmovilización mediante procesos de coprecipitación o sorción superficial. Finalmente, bajo condiciones oxidantes, el arsénico inorgánico se encuentra principalmente en forma de H_2AsO_4^- (a $\text{pH} < 6.9$) o HAsO_4^{2-} (a $\text{pH} > 6.9$), y su comportamiento en solución depende del equilibrio con las fases sólidas presentes en el sedimento (Bundschuh et al., 2008).

5.2.2 Fluoruros

Los resultados de la prueba de movilidad con agua meteórica revelaron que las concentraciones de fluoruros varían significativamente entre los sitios estudiados, mostrando una clara relación con la conductividad eléctrica medida en cada ciclo de lavado. El sitio RV-1.2 presentó las concentraciones más altas de fluoruros, alcanzando un máximo de 30.52 mg/L en el primer ciclo, seguida de una disminución hasta 6.29 mg/L en el ciclo 3, para posteriormente mostrar un ligero incremento, alcanzando 7.77 mg/L en el ciclo 7. En contraste, en los demás sitios las concentraciones oscilaron entre valores más bajos, con un mínimo de 0.28 mg/L en RSM-La Cañada durante el ciclo 5 y un máximo de 3.42 mg/L en RV-2.5 en el ciclo 3. La disminución progresiva de la conductividad eléctrica en todos los sitios acompañó la reducción en las concentraciones de fluoruros, indicando una posible lixiviación y movilidad controlada por la interacción con el agua meteórica, como se observa en la Figura 65. Estos resultados muestran que el aporte de fluoruros en la cuenca se

concentra principalmente en los sitios de Rancho Viejo en la microcuenca Arroyo San José, lo que resalta la importancia de su caracterización geoquímica, ya que su liberación al medio acuático puede estar potenciando los niveles de F^- registrados en el agua superficial de la presa El Realito.

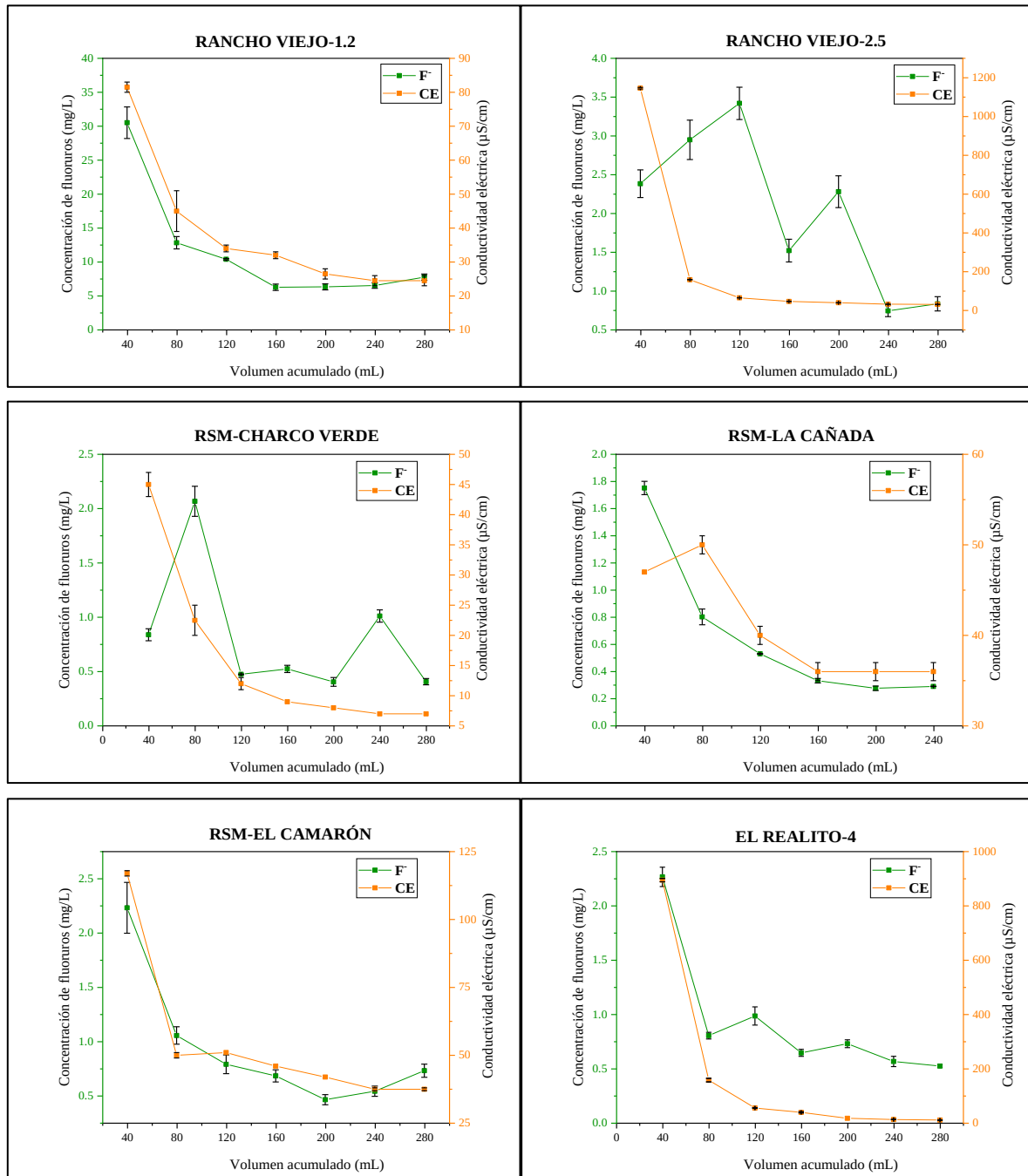


Figura 65. Resultados del agua meteórica y su relación con la concentración de fluoruros y conductividad eléctrica.

5.3 Análisis de sedimentos después del lavado (post-lavado)

El análisis post-lavado con agua meteórica reveló cambios significativos en las concentraciones promedio de metales y metaloides presentes en los sedimentos de los sitios evaluados (Tabla 30). Estos resultados evidencian la influencia de los procesos de lixiviación y redistribución asociados a la interacción agua-sedimento.

En el caso del azufre, se observaron variaciones contrastantes: en la muestra RV-1.2 no se detectó antes de los lavados, pero posterior a estos se presentó una concentración de 0.19%, asimismo, en la RV-2.5 aumentó, en contraste, en la presa El Realito disminuyó de 1.17% a 0.20%. Por otro lado, en las muestras de RSM-Charco Verde, La Cañada y El Camarón el azufre permaneció no detectable. Estas diferencias sugieren un comportamiento heterogéneo del azufre, probablemente asociado a la disolución de fases sulfatadas y a la movilidad condicionada por el potencial redox local.

Para elementos como calcio, hierro y arsénico, se evidenció un incremento en la concentración en los sitios RV-1.2, RV-2.5, RSM-La Cañada y RSM-El Camarón tras el lavado con agua meteórica, mientras que en RSM-Charco Verde y la presa El Realito se observó una disminución en la concentración de calcio y hierro. Este patrón diferencial podría estar vinculado a la liberación de elementos desde fases carbonatadas y oxihidróxidos metálicos en algunos sitios, frente a procesos de disolución y transporte en otros.

Destaca el aumento de arsénico en RV-1.2 y RV-2.5, que pasó de 90.67 a 113.17 mg/kg y de 82.50 a 150.67 mg/kg, respectivamente, indicando una posible liberación o redistribución de este metaloide durante el proceso de lavado. El mercurio, por su parte, solo se detectó en RV-2.5 y aumentó de 15.6 a 24.5 mg/kg después del lavado. Estos resultados sugieren que el lavado con agua meteórica puede influir en la movilidad y concentración de ciertos metales y metaloides en los sedimentos.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 30. Resultados de las concentraciones promedio de metales y metaloides en sedimentos después de los lavados con agua meteórica. RSM (río Santa María).

Elemento	Unidades	Rancho Viejo 1.2	Rancho Viejo 2.5	RSM- Charco Verde	RSM-La Cañada	RSM-El Camarón	Presa El Realito
Distancia a la cortina	km	50.92	46.74	42.10	26.89	16.25	1.31
Al	%	4.73	1.64	0.71	3.63	2.80	1.17
Si	%	4.37	5.30	8.11	5.60	5.87	6.06
S	%	0.19	1.23	ND	ND	ND	0.20
Ca	%	4.73	1.64	0.71	3.63	2.80	0.97
Fe	%	8.36	17.49	2.70	6.85	9.34	11.06
Cr	mg/kg	29.17	ND	27.50	31.83	38.40	41.50
Ni	mg/kg	ND	ND	ND	ND	ND	ND
As	mg/kg	113.17	150.67	7.58	25.33	22.67	34.00
Ba	mg/kg	426.50	558.33	484.50	395.00	18.30	410.67
Pb	mg/kg	31.00	43.00	25.33	35.67	39.00	34.00
Hg	mg/kg	ND	24.50	ND	ND	ND	ND

6. CORRELACIÓN GEOQUÍMICA AMBIENTAL DE LA PRESA EL REALITO

En esta sección se aborda las relaciones agua-sedimento en los sitios desde el afluente del Arroyo San José, siguiendo por el río Santa María (cauce principal) hasta la presa El Realito.

6.1 Correlación fisicoquímica y mineralógica

Las características mineralógicas se presentan en la Tabla 31 y Anexo 4, donde se muestran las fases cristalinas y su abundancia relativa después de los análisis con agua meteórica. Al comparar estos resultados con los análisis previos a los lavados, se observa que algunas fases cristalinas aumentaron o disminuyeron su abundancia relativa, mientras que desaparecieron unas fases, aparecieron nuevas. Por ejemplo, en la muestra de la presa El Realito se detectó por primera vez la presencia del mineral caolinita. En la muestra de RSM-Charco Verde, la montmorillonita cálcica, presente antes del lavado, dejó de detectarse tras el tratamiento, mientras que apareció calcita con una abundancia del 1%. En la muestra de Rancho Viejo-2.5 (RV-2.5), la concentración de pirita aumentó de un 12.3% a un 14.6% después del lavado, y el mineral yeso, que estaba presente inicialmente, ya no se detectó al finalizar los lavados con agua meteórica. Estos cambios reflejan la dinámica mineralógica que ocurre durante la interacción agua-sedimento y cómo el lavado con agua meteórica puede influir en la composición mineral de los sedimentos.

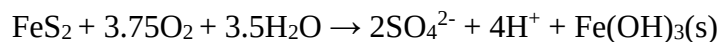
EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 31. Fases cristalinas y su abundancia relativa en los sitios de interés después del agua meteórica.

Formula	Nombre	Rancho Viejo 1.2	Rancho Viejo 2.5	RSM- Charco Verde	RSM- La Cañada	RSM-El Camarón	Presa El Realito
SiO ₂	Cuarzo	14.5%	23.8%	35.2%	27.6%	31.4%	10.8%
(K0.831Na0.169)(AlSi ₃ O ₈)	Sanidina	19.5%	18.7%	-	19%	24%	14.4%
KAlSi ₃ O ₈	Microclina	-	-	-	-	-	12.4%
K0.93Na0.07)(AlSi ₃ O ₈)	Ortoclase	-	-	-	-	-	10.2%
NaAlSi ₃ O ₈	Albita	-	15.8%	-	-	-	14.3%
(Ca,Na)0.3Al ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *H ₂ O	Montmorillonita, rodamiento de Ca	-	-	-	-	-	14.7%
SiO ₂	Tridimita	-	-	3.8%	-	-	8%
SiO ₂	Cristobalita	-	-	3.2%	-	-	12%
Mg(0.667Al0.333)(OH) ₂ (CO ₃)0.167(H ₂ O)0.5	Hidrotalcita	-	-	-	-	-	4.3%
Al₂(Si₂O₅(OH)₄)	Caolinita						3.3%
K ₄ Al ₄ Si ₁₂ O ₃₂	Ortoclase	-	-	-	13.3%	14.9%	-
Na0.0685Ca0.347Al1.46Si2.54O ₈	Albita, rodamiento de Ca	-	-	-	14.3%	15.2%	-
(Na,K)(Si ₃ Al)O ₈	Anortoclase	-	-	-	11.1%	-	-
CaCO ₃	Calcita	-	-	1%	6.4%	4.3%	-
Ca0.2(Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *H ₂ O	Montmorillonita cálcica	-	-	-	7.2%	9.3%	-
Fe ₂ O ₃	Hematita	-	-	-	1.2%	1%	-
(Na,Ca)0.3(Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ *nH ₂ O	Bentonita	34.3%	12.2%	-	-	-	-
(Ca2.133Na1.867)(Si10.003Al5.987)O ₃₂	Anortita, rodamiento de Na	-	15%	-	-	-	-
FeS ₂	Pirita	-	14.6%	-	-	-	-
CaSO ₄ *2H ₂ O	Yeso	-	-	-	-	-	-
CaF ₂	Fluorita	11.9%	-	-	-	-	-
KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ F ₂	Fluoroflogopita	19.8%	-	-	-	-	-
K0.95(AlSi ₃ O ₈)	Microclina	-	-	15.1%	-	-	-
(Na,Ca)(Si,Al) ₄ O ₈	Albita, rodamiento de Ca	-	-	12.2%	-	-	-
K0.42Na0.58Ca0.03(AlSi ₃ O ₈)	Sanidina	-	-	29.4%	-	-	-

La pirita (FeS₂) es uno de los minerales sulfurados más comunes en sistemas hidrotermales y se detectó en la muestra RV-2.5, ubicada dentro del área de la Zona Mineralizada de Palo Verde. Montes-Ávila (2019), menciona que es una fase primaria que se forma por reemplazo progresivo de sulfuros en cuerpos mineralizados generados a temperaturas inferiores a 375 °C. Debido a su naturaleza altamente oxidante, la pirita actúa como uno de los principales

generadores de acidez en ambientes geológicos expuestos a la meteorización. Bajo condiciones oxidantes, puede llevarse a cabo la siguiente reacción:

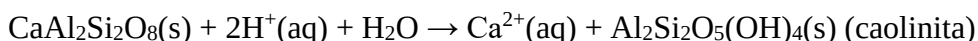


Esta reacción libera protones (H^+) y sulfatos, contribuyendo a la acidificación del entorno, sin embargo, el pH debe ser amortiguado por reacciones de neutralización con calcita, hidróxidos metálicos y/o disolución de feldespatos.

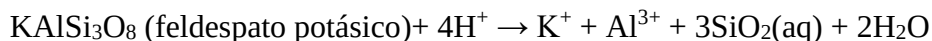
Reacciones de neutralización :



En el caso de calcita, el consumo de protones ocurre de manera rápida.



En contraste, los feldespatos neutralizan más lentamente, pero liberan aluminio al medio acuoso. Por ejemplo, la anortita puede disolverse mediante un proceso de disolución con formación de fases secundarias (Plumlee, 1999; Yuan et al., 2019).



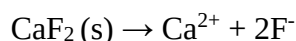
También puede liberar Al^{3+} directamente, como en el caso del feldespato potásico (ortoclasa y la microclina) (Yuan et al., 2019).

Estos procesos de disolución justifican la presencia de concentraciones elevadas de aluminio en agua, como ocurre en la presa El Realito, donde se registraron valores de 0.8 mg/L de Al, superando ampliamente el límite máximo permisible de 0.2 mg/L establecido por la NOM-127-SSA1-2021.

Los minerales secundarios resultantes de la meteorización, como la caolinita y la montmorillonita, se forman en superficies expuestas a erosión o minería, y pueden influir de manera positiva o negativa en la movilidad de contaminantes (Bundschuh et al., 2008). Montes-Ávila (2019) encontró la presencia de caolinita en residuos mineros del Cerro de San Pedro, identificándola como un mineral común en rocas volcánicas, mientras que McSween (2003) la describe como un mineral secundario producto del intemperismo de la gibbosita.

Los minerales arcillosos, como la montmorillonita y la caolinita, desempeñan un papel crucial en la movilidad del arsénico debido a su capacidad de adsorción superficial. Se ha reportado que en condiciones de pH entre 4 y 8, la adsorción de arseniato (As V) se favorece particularmente en los bordes de las arcillas (Bundschuh et al., 2008). Además, la adsorción de arsénico también puede ocurrir en la superficie de minerales carbonatados como la calcita, mediante mecanismos como la co-precipitación (Bundschuh et al., 2008).

Asimismo, se identificó la presencia de fluorita (CaF_2) como mineral de ganga en la muestra RV-2.1 de sedimento. A diferencia de otros minerales como la calcita, la fluorita no actúa como un consumidor efectivo de acidez, ya que su disolución simplemente libera iones calcio (Ca^{2+}) e iones fluoruro (F^-) al medio, sin neutralizar protones (Plumlee, 1999):



Esto es relevante porque la presencia simultánea de piritita y fluorita puede generar un entorno geoquímico ácido, donde el ácido producido por la oxidación de piritita no se ve amortiguado por la fluorita. En cambio, esta última puede contribuir a la liberación de fluoruros al agua superficial y subterránea, especialmente en condiciones de pH bajo. Este comportamiento explica en parte las elevadas concentraciones de fluoruros detectadas en agua dentro del área de estudio, que podrían estar asociadas tanto a la disolución de fluorita como a procesos de lixiviación impulsados por la acidez generada por sulfuros.

6.1.2 Correlación lineal de arsénico (V) con la conductividad eléctrica

En la Tabla 32 y Figura 66, se muestra la correlación lineal entre la concentración de arsénico (V) y la conductividad eléctrica. Los sitios con mayor correlación fueron RSM-Charco Verde ($R^2 = 0.927$) y RSM-La Cañada ($R^2 = 0.919$), indicando una relación fuerte y positiva. Por el contrario, RV-1.2 presentó la menor correlación ($R^2 = 0.137$), con una pendiente negativa.

En los casos de RSM-El Camarón y El Realito-4, se realizó un ajuste a la correlación lineal excluyendo el primer ciclo de lavado, ya que este mostró un comportamiento atípico respecto al resto de los datos (Anexos 5 y 6). Tras el ajuste, las correlaciones mejoraron, reflejando una relación más coherente entre el arsénico (V) y la conductividad eléctrica.

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tabla 32. Correlación lineal de arsénico (V) con la conductividad eléctrica. Ecuación ($y = a + b \cdot x$);
a = intercepción con el eje y; b = pendiente.

Muestra	R ²	R Pearson	a	b
Rancho Viejo-1.2	0.137	-0.370	90.10343 ± 58.67517	-28.25256 ± 31.70499
Rancho Viejo-2.5	0.408	0.639	-3867.52628 ± 2204.80001	2082.56202 ± 1122.0619
RSM-Charco Verde	0.927	0.963	-72.70957 ± 0.85376	40.25766 ± 0.35671
RSM-La Cañada	0.919	0.959	-1.8003 ± 6.36972	16.88734 ± 2.50281
RSM-El Camarón	0.695	0.833	-15.97634 ± 19.94424	21.0137 ± 6.96792
El Realito-4	0.607	0.779	-170.63981 ± 90.03529	126.37427 ± 50.83822

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

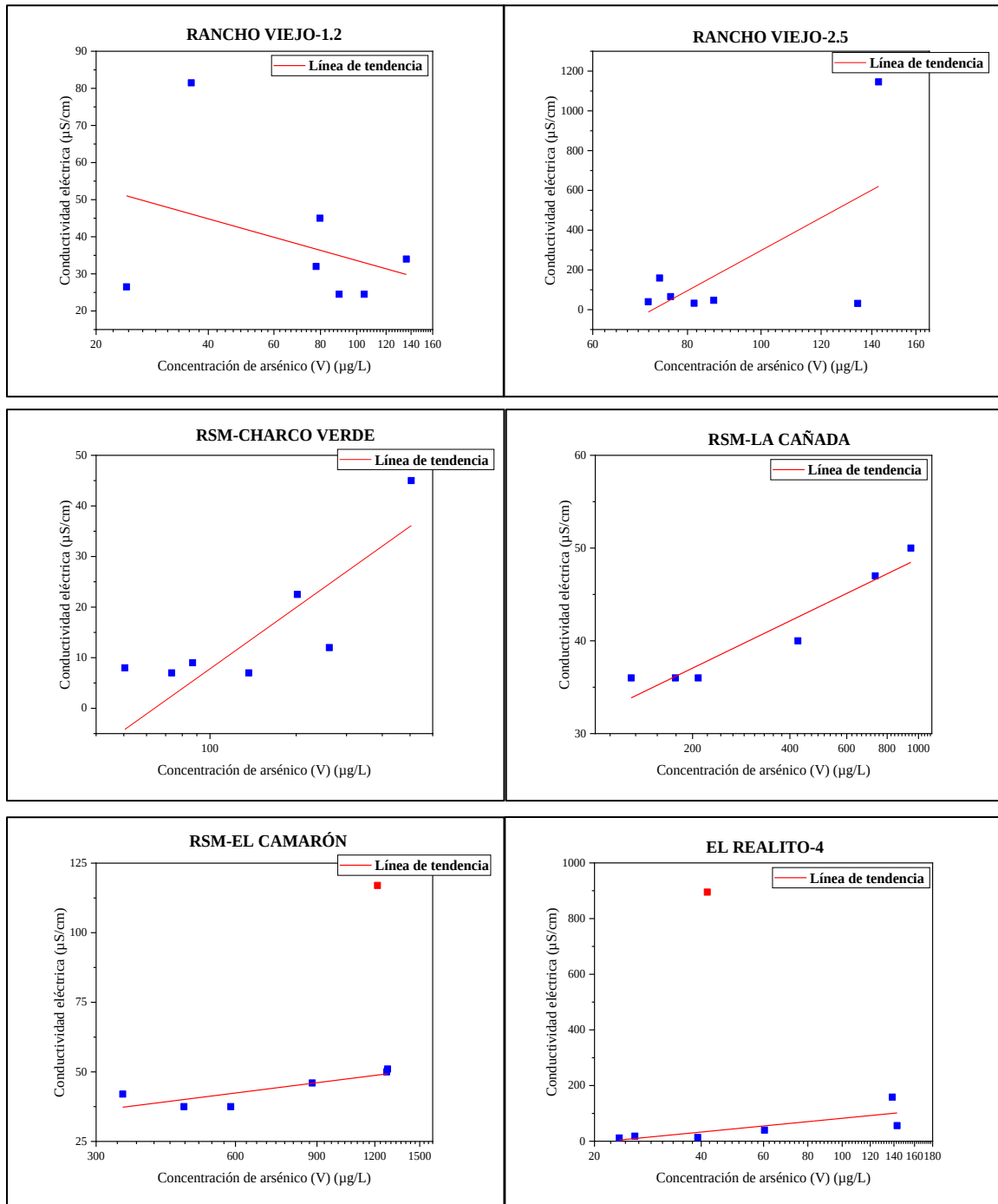


Figura 66. Correlación lineal de arsénico (V) con la conductividad eléctrica.

6.1.3 Correlación lineal de fluoruros con la conductividad eléctrica

En cuanto a los fluoruros, se observaron correlaciones lineales positivas con la conductividad eléctrica (CE) en la mayoría de los sitios analizados, como se muestra en la Tabla 33 y la Figura 67. Las correlaciones más fuertes ($R^2 \geq 0.7$) se registraron en RV-1.2 ($R^2 = 0.924$), El Realito-4 ($R^2 = 0.862$) y RSM-El Camarón ($R^2 = 0.822$), lo cual indica una fuerte relación entre la presencia de fluoruros y el incremento en la conductividad del lixiviado. En estos casos, se puede inferir que los fluoruros se movilizan fácilmente con el agua meteórica, contribuyendo significativamente a la conductividad eléctrica del sistema.

Por otro lado, las correlaciones más débiles se registraron en RV-2.5 ($R^2 = 0.382$) y RSM-Charco Verde ($R^2 = 0.592$), en donde se observó una variabilidad importante en las primeras fracciones del lavado. Por ello, en ambos sitios se realizó un ajuste a la correlación lineal excluyendo el primer lavado, ya que este presentó un comportamiento atípico respecto al resto de los datos (Anexos 7 y 8). Estos ajustes permitieron mejorar la visualización de la tendencia en las siguientes fracciones, evidenciando que los picos iniciales de concentración pueden estar asociados a una liberación rápida y puntual de fluoruros acumulados en la superficie de las partículas o atrapados en fases fácilmente solubles.

Tabla 33. Correlación lineal de fluoruros con la conductividad eléctrica. Ecuación ($y = a + b \cdot x$); a = intercepción con el eje y; b = pendiente.

Muestra	R ²	R Pearson	a	b
Rancho Viejo-1.2	0.924	0.961	-39.42944 ± 10.20796	78.65675 ± 10.06144
Rancho Viejo-2.5	0.382	0.618	38.48298 ± 23.29739	107.94621 ± 68.717
RSM-Charco Verde	0.592	0.770	13.80458 ± 2.11278	16.24947 ± 6.74217
RSM-La Cañada	0.756	0.870	45.71743 ± 1.97022	17.25072 ± 4.89768
RSM-El Camarón	0.822	0.907	64.54011 ± 5.33665	113.72461 ± 23.6275
El Realito-4	0.862	0.928	288.74802 ± 54.07659	1397.6953 ± 249.99902

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

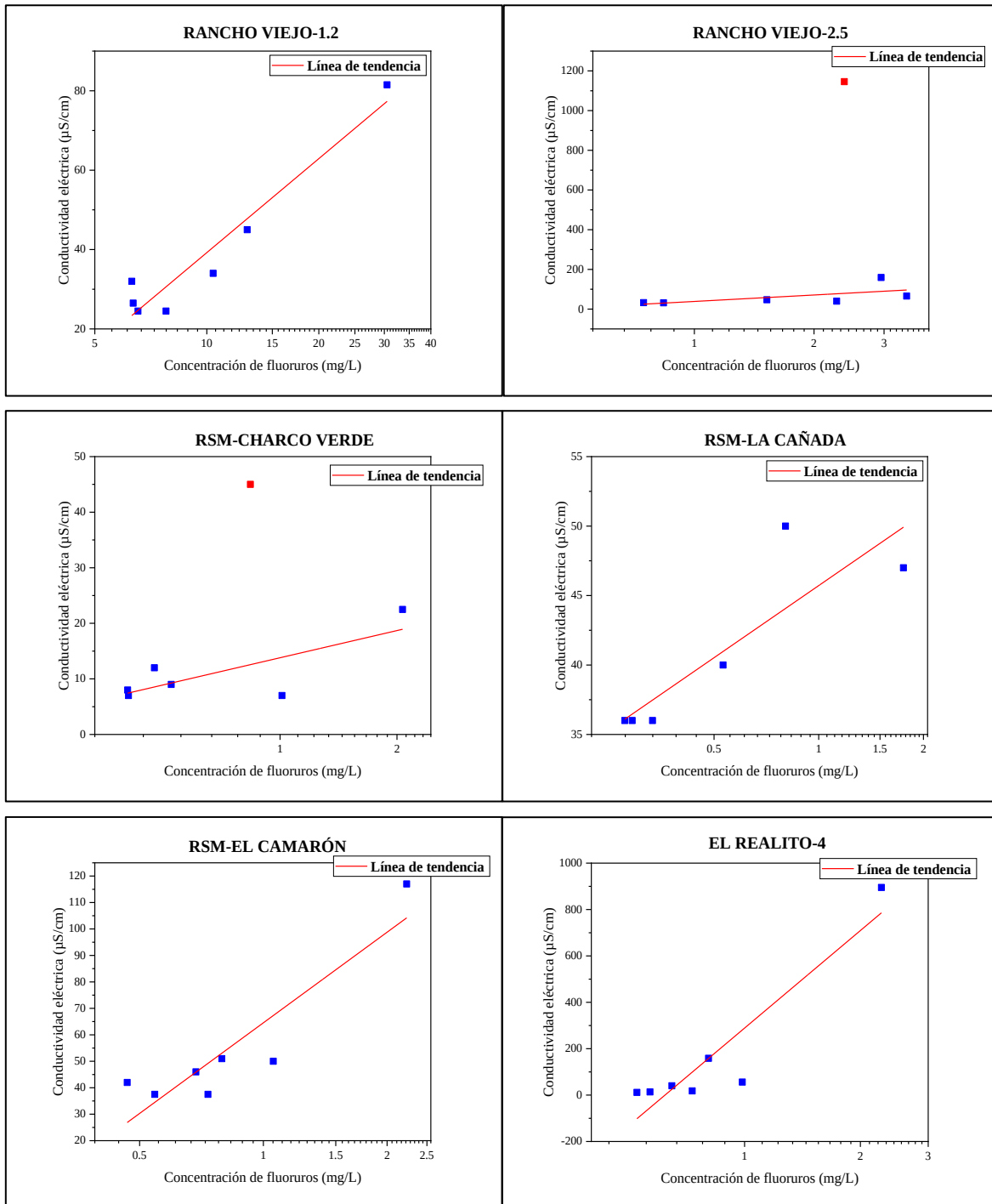


Figura 67. Correlación lineal de fluoruros con la conductividad eléctrica.

6.2 Dinámica Geoquímica de Arsénico y Fluoruro:

6.2.1 Índice de liberación de arsénico

El índice de liberación es una medida que permite evaluar la proporción de un elemento que pasa a la fase soluble durante los lavados con agua meteórica. Un valor cercano a 1 indica una alta solubilidad, lo que implica mayor disponibilidad del elemento para migrar en el ambiente. En este caso, se analizó el comportamiento del arsénico (V) a través de varios ciclos de lavado (volumen acumulado), como se muestra en la Figura 68.

Los resultados indican comportamientos diferenciados entre los sitios de muestreo. En RV-1.2 y ER-4, se observó un pico máximo de solubilidad en el ciclo 3 (120 mL), con un índice de liberación igual a 1. Posteriormente, este valor disminuye, alcanzando su punto más bajo en el ciclo 6, lo que sugiere una disminución en la disponibilidad del arsénico posiblemente por procesos de adsorción o precipitación. A partir del ciclo 6, se nota una tendencia creciente en la liberación, aunque sin alcanzar nuevamente el valor inicial.

Por otro lado, en los sitios RV-2.5 y RSM-Charco Verde, el mayor índice de liberación se presentó desde el primer ciclo, lo que sugiere una liberación rápida e inmediata de arsénico asociado probablemente a fases fácilmente solubles o superficialmente adsorbidas. En contraste, en RSM-La Cañada y RSM-El Camarón, el valor máximo de solubilidad se presentó en el segundo ciclo, seguido de una disminución, y posteriormente un comportamiento oscilante, con aumentos y descensos en ciclos posteriores.

Este comportamiento puede estar relacionado con la oxidación progresiva de minerales sulfurados, como la pirita, que libera arsénico al oxidarse. Simultáneamente, la formación de óxidos de hierro insolubles puede actuar como una trampa para el arsénico, ya sea por adsorción superficial o co-precipitación, disminuyendo su solubilidad en fases posteriores. Estos procesos geoquímicos explican la variabilidad observada en los índices de liberación entre ciclos, así como entre diferentes sitios, donde influyen las características mineralógicas, el contenido de hierro y la disponibilidad de minerales arcillosos como la caolinita y la montmorillonita (Plumlee, 1999).

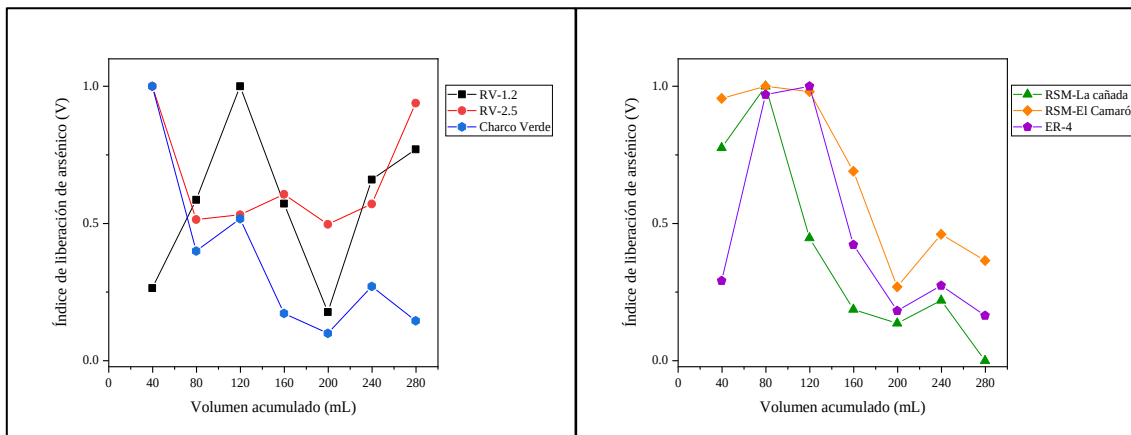


Figura 68. Índice de liberación de arsénico (V).

6.2.2 Índice de liberación de fluoruros

El índice de liberación representa la fracción de fluoruro que se libera a la fase soluble durante los lavados con agua meteórica. Un valor de 1 indica una alta disponibilidad en solución, es decir, que el fluoruro es altamente soluble en ese ciclo de lavado. En la Figura 69 se muestra el comportamiento de liberación de fluoruros para los distintos sitios evaluados.

Durante el primer ciclo de lavado, los sitios RV-1.2, RSM-La Cañada, RSM-El Camarón y ER-4 presentan los valores más altos de solubilidad, con un índice cercano o igual a 1. Esto sugiere una liberación inmediata y significativa de fluoruros desde fases minerales fácilmente solubles, asociado a reacciones de intercambio iónico o disolución de sales solubles, en función de la K_{ps} asociada. En contraste, para RSM-Charco Verde, el valor máximo se alcanza en el segundo ciclo, mientras que en RV-2.5 ocurre hasta el tercer ciclo, lo que indica una liberación progresiva con requerimiento de tiempo de contacto mas largos asociados a a fases de minerales de fluoruros asociados a fases primarias que requieren para su disolución de reacciones de tranferencia de electrones por oxidación.

Este comportamiento puede estar relacionado con la presencia de fluorita (CaF_2) en las muestras, especialmente en el sitio RV-1.2, donde fue detectada mineralógicamente. Según Huízar Álvarez et al. (2016), la fluorita es un mineral que al entrar en contacto con agua

meteorica puede disolverse liberando iones de calcio y fluoruro al medio, contribuyendo así a la carga iónica y aumentando la conductividad eléctrica del agua. Esta disolución puede ser más intensa en las primeras etapas del lavado, lo cual concuerda con los picos de liberación observados. El retraso de la respuesta observada en la muestra de Charco verde parece estar relacionada principalmente al tamaño de grano y a la limitación en el proceso de saturación de los poros de este material.

Posteriormente, en casi todos los sitios se observa una tendencia descendente del índice de liberación a lo largo de los siguientes ciclos, lo cual sugiere que la mayoría del fluoruro disponible es liberado en las primeras etapas del contacto con el agua, y que en ciclos posteriores su disponibilidad se reduce, ya sea por agotamiento de las fases solubles o por reabsorción en fases minerales secundarias.

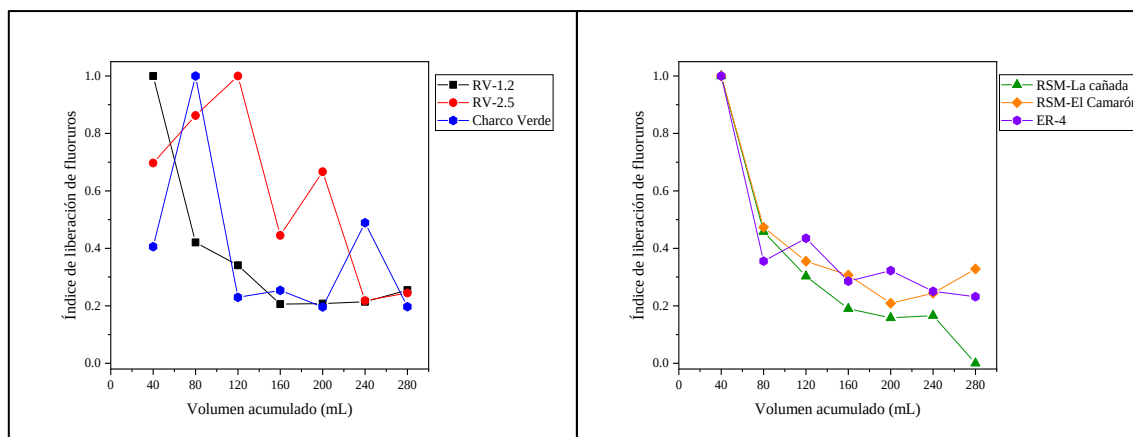


Figura 69. Índice de liberación de fluoruros.

6.2.3 Aportación de arsenico y fluoruros a la cuenca presa El Realito

La clasificación de precipitación en la cuenca de la presa El Realito permitió estimar una precipitación media anual de 403.72 mm/año (Figura 70 y Anexo 1). A partir de este valor, se obtuvo una precipitación efectiva de 296.96 mm/año, lo que corresponde a un coeficiente de escorrentía de 0.74. Este valor indica que el 74 % del volumen total de precipitación se transforma en escurrimiento superficial, mientras que solo un 26 % se infiltra o evapora. Sin embargo, un Ce tan elevado refleja condiciones de baja infiltración y alta escorrentía, lo cual

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

tiene un impacto directo en la dinámica de arrastre de sedimentos y en la liberación de metales en agua y sedimentos (Chow et al., 1988; CONAGUA, 2016).

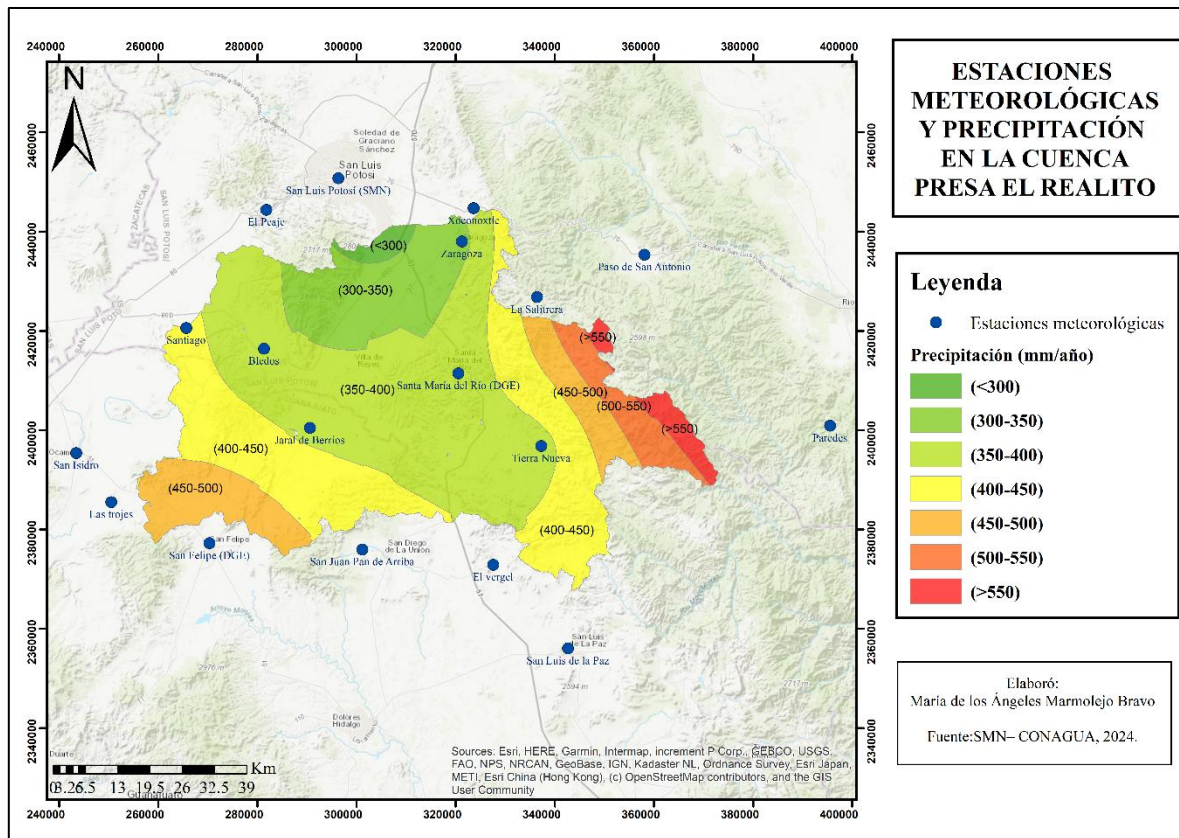


Figura 70. Estaciones meteorológicas y precipitación estimada por el método de isoyetas en la cuenca presa El Realito. (Servicio Meteorológico Nacional (SMN)-Conagua, 2024).

En este contexto hidrológico, se evaluó la aportación anual de arsénico (As V) en los diferentes sitios de muestreo (Tabla 34). El cálculo se realizó multiplicando la concentración promedio de arsénico disuelto (mg/L) por el volumen anual de precipitación (L/año). Los resultados muestran una marcada variabilidad espacial en los aportes de arsénico.

En la Tabla 34 se muestra la estimación del aporte anual de arsénico (As V) en los diferentes sitios de muestreo, con base en la concentración total de arsénico disuelto obtenida a partir de los análisis con agua meteórica, y considerando la precipitación media anual registrada en cada sitio. La estimación del aporte de arsénico (mg As/año) se calculó multiplicando la concentración promedio de arsénico (mg/L) por el volumen de precipitación anual (L/año).

El sitio RSM-El Camarón, localizado dentro del cauce principal del río Santa María, presentó la mayor contribución de arsénico, con un valor de 3,154.2 mg As/año, asociado a su alta concentración de As (6.01 mg/L) y una precipitación media de 525 L/año. Esto sugiere una importante liberación de arsénico en este sitio, posiblemente vinculada a procesos de oxidación de sulfuros metálicos y a la presencia de minerales secundarios como arcillas.

En contraste, el sitio RV-1.2, correspondiente al afluente del Arroyo San José, presentó el menor aporte estimado, con 260.3 mg As/año, derivado de su baja concentración (0.55 mg/L) y menor volumen de precipitación (475 L/año). La presa El Realito (El Realito-4), punto final del sistema, registra una concentración relativamente baja (0.47 mg/L) y un aporte anual de 236 mg As/año, lo cual indica que a pesar de la entrada de arsénico desde diversos puntos de la microcuenca, parte de este elemento podría estar siendo inmovilizado o retenido en fases minerales o por procesos de adsorción en el sedimento, posiblemente influenciado por la presencia de minerales como calcita, caolinita o montmorillonita.

En términos generales, los datos evidencian que los puntos del río Santa María (especialmente RSM-El Camarón y RSM-La Cañada) son los principales aportadores de arsénico al sistema, mientras que el afluente de Arroyo San José donde se encuentran los puntos de Rancho Viejo tienen una contribución significativamente menor.

Tabla 34. Contribución de arsénico de los sitios Rancho Viejo, río Santa María y presa El Realito.

Afluente/presa	Muestra	Precipitación media anual (L/año)	Concentración total de As (V) (mg/L)	Aporte de arsénico (mg As/año)
Arroyo San José	Rancho Viejo-1.2	475	0.55	260.3
	Rancho Viejo-2.5	475	0.67	315.4
	RSM-Charco Verde	475	1.32	625.1
Río Santa María	RSM-La Cañada	475	2.62	1245
	RSM-El Camarón	525	6.01	3,154.2
Presa	El Realito-4	500	0.47	236

La Tabla 35 presenta la estimación del aporte anual de fluoruros (F^-) en diferentes sitios desde la microcuenca Arroyo San José hacia la presa El Realito. Esta estimación se obtuvo multiplicando la concentración total de fluoruros (mg/L), derivada de los análisis en lavados

con agua meteórica, por la precipitación media anual correspondiente a cada punto de muestreo (L/año).

El sitio RV-1.2 es el que presenta el mayor aporte de fluoruros, con 38,327.8 mg F⁻/año, como resultado de su alta concentración (80.69 mg/L), probablemente asociada a la presencia de fluorita en la muestra. Este valor es significativamente superior al resto de los sitios analizados, lo que sugiere que este punto representa una fuente importante de liberación de fluoruro a la cuenca. En contraste, el menor aporte se registró en RSM-La Cañada, con 1,895.25 mg F⁻/año, derivado de su baja concentración de fluoruros (3.99 mg/L), pese a presentar una precipitación media similar a otros sitios (475 L/año).

En el río Santa María, tanto RSM-El Camarón como RSM-Charco Verde presentaron aportes moderados (3,417.75 mg y 2,721.88 mg F⁻/año, respectivamente), mientras que en la presa El Realito se estimó un valor de 3,265 mg F⁻/año, similar al de los sitios aguas arriba, lo cual indica que parte de los fluoruros liberados se mantienen en solución y pueden alcanzar cuerpos de almacenamiento como la presa. Estos resultados permiten identificar zonas prioritarias de emisión de fluoruros dentro de la cuenca, siendo RV-1.2 un punto crítico por su elevada capacidad de liberación, posiblemente ligada a la disolución directa de fluorita en presencia de agua.

Tabla 35. Contribución de fluoruros de los sitios Rancho Viejo, río Santa María y presa El Realito.

Afluente/presa	Muestra	Precipitación media anual (L/año)	Concentración total de F ⁻ (mg/L)	Aporte de fluoruro (mg F/año)
Arroyo San José	Rancho Viejo-1.2	475	80.69	38,327.8
	Rancho Viejo-2.5	475	14.14	6,716.5
	RSM-Charco Verde	475	5.73	2,721.8
Río Santa María	RSM-La Cañada	475	3.99	1,895.25
	RSM-El Camarón	525	6.51	3,417.75
Presa	El Realito-4	500	6.53	3,265

6.3 Especiación geoquímica

La especiación geoquímica se refiere a la distribución de un elemento en sus diferentes formas químicas dentro de un sistema geológico, ya sea en agua, suelo o sedimento. Este

análisis se realiza considerando procesos de disolución, equilibrio químico, precipitación y reacciones redox, con el fin de entender cómo interactúan los elementos presentes en un entorno determinado (Montes-Avila, 2019). Para ello, se empleó el software Geochemist's WorkBench®, especializado en modelado geoquímico.

Como se ha documentado en secciones anteriores, la microcuenca Arroyo San José representa una fuente significativa de arsénico y fluoruros hacia la cuenca de la presa El Realito, atribuida a la presencia de diversos minerales en la zona. Por lo cual, se llevó a cabo la especiación geoquímica de los sitios aguas arriba, como Rancho Viejo (RV-2.4), así como valores promedio de la propia presa El Realito. En la Tabla 36 se muestran los parámetros y se incluyeron porque su presencia fue detectada en concentraciones representativas en los sitios de estudio, y su incorporación es de interés para la construcción de los diagramas Eh–pH, al aportar información sobre los equilibrios químicos y la estabilidad de fases minerales que influyen directamente en la movilidad del arsénico y fluoruros en la cuenca.

Tabla 36. Valores de los parámetros fisicoquímicos y de las concentraciones de elementos traza y mayoritarios en agua de RV-2.4 y de la presa El Realito.

Parámetro/concentración	Microcuenca Arroyo San José (RV-2.4)	Presa El Realito (promedio)
pH	7.33	6.73
Eh (mV)	289.40	194.05
CE	616.00	552.50
OD (mg/L)	3.68	3.33
CaCO ₃ (mg/L)	214.20	310.71
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	0.34	2.89
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	54.90	14.40
Cl (mg/L)	9.50	24.19
As (V) (mg/L)	0.113	0.31
F ⁻ (mg/L)	10.02	1.09
Na (mg/L)	77.09	37.39
Mg (mg/L)	7.42	7.92
Si (mg/L)	24.41	18.46
Mo (mg/L)	0.04	0.05
Fe (mg/L)	0.01	1.14
S (mg/L)	19.03	1.64
Ca (mg/L)	40.18	62.71
K (mg/L)	7.42	7.92

6.3.1 Microcuenca Arroyo San José

En la Figura 71 se muestra el diagrama de estabilidad de Eh vs pH para el sitio RV-2.4 para el sistema AsO₄, a condiciones estándar de presión (1.013 bar) y temperatura (25°C). Las condiciones modeladas incluyen los términos de los potenciales de las concentraciones de los iones en solución o fase mineral, p[ion]: AsO₄ = 11.51, F⁻ = 4.403, SO₄ = 4.459, NO₃ = 37.31, HCO₃ = 2.421, K = -3.768, Cl = 3.619, Na = 2.522, Ca = -3.333, Mg = 3.768, SiO₂ = -3.404, fluorita = 9.276, pirita = 167.9. En el diagrama, se observa que las condiciones del sitio RV-2.4 favorecen la presencia del hidrógeno arseniato (HAsO₄²⁻) como la especie dominante en solución. Esta especie se encuentra próxima a los límites de estabilidad de scorodita (FeAsO₄·2H₂O), un mineral secundario común bajo condiciones oxidantes. También se identifican las zonas de estabilidad del dihidrogenoarsenato (H₂AsO₄⁻), lo cual sugiere un ambiente intermedio en cuanto a acidez y condiciones redox, compatible con

aguas ligeramente ácidas a neutras y con moderado potencial de oxidación. Este análisis permite inferir el comportamiento y la movilidad del arsénico en el sistema, así como su potencial de interacción con otras fases minerales.

Bajo condiciones oxidantes predomina el estado As(V) sobre As(III), encontrándose principalmente como H_2AsO_4^- a pH menores de 6.9 y como HASO_4^{2-} a pH más altos. Estas especies, tienden a ser retenidas en suelos y sedimentos mediante procesos de adsorción, particularmente en óxidos e hidróxidos de Fe y Mn (Bundschuh et al., 2008).

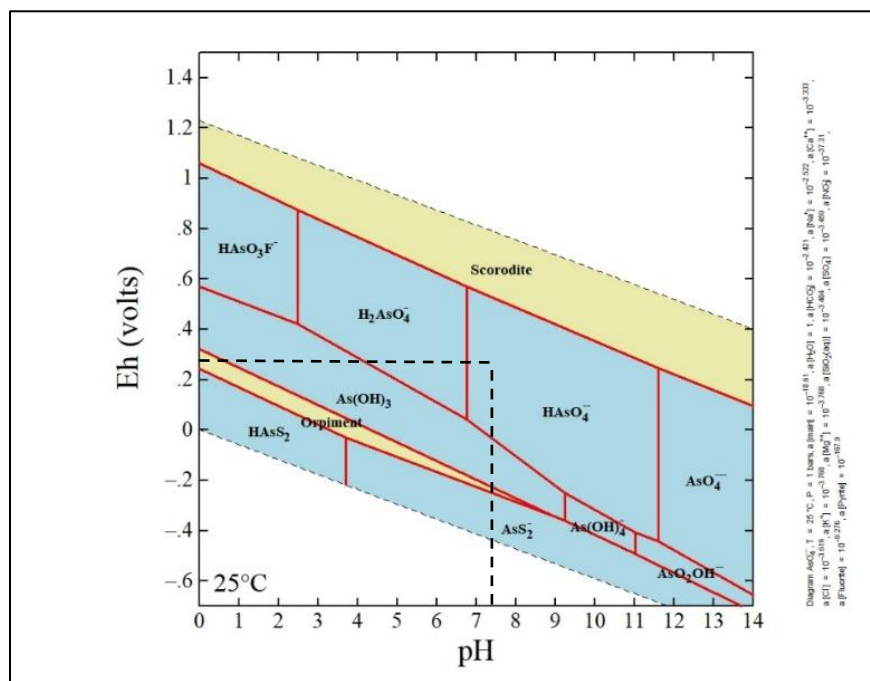


Figura 71. Diagrama de arsénico de Rancho Viejo-2.4 de Eh vs pH.

En el diagrama se observa que el flúor en solución se encuentra principalmente en equilibrio con fluorita (CaF_2), lo cual sugiere que esta fase mineral regula la solubilidad del flúor en el sistema. La fluorita, bajo condiciones ligeramente oxidantes y pH neutro a ligeramente alcalino (como las condiciones detectadas en el sitio), es la fase mineral más estable y predominante. Además, se aprecia que las condiciones geoquímicas del sitio RV-2.4 (agua de subálveo) se ubican dentro del campo de estabilidad de la fluorita, indicando que su presencia en sedimentos o matrices sólidas es probablemente responsable de la liberación de iones fluoruro (F^-) al entrar en contacto con el agua. Esto concuerda con los resultados

experimentales obtenidos con la muestra RV-2.5 (sedimento con agua meteórica) donde se observó la liberación de fluoruros (Figura 72).

Este tipo de especiación permite entender que el comportamiento del flúor está fuertemente influenciado por la disponibilidad de calcio en solución, ya que su precipitación como fluorita actúa como un mecanismo de control geoquímico. Por lo tanto, en sistemas donde el calcio disminuye por procesos de intercambio iónico o disolución, es posible que aumente la movilidad del flúor, elevando su concentración en el agua superficial o subterránea (Selinus et al., 2013).

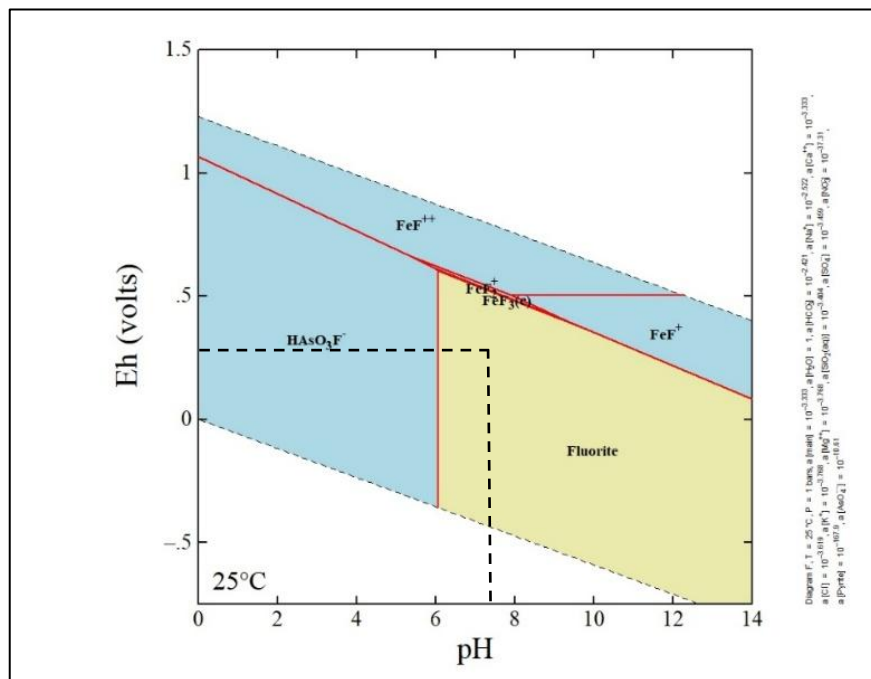


Figura 72. Diagrama de flúor en Rancho Viejo-2.4 de Eh vs pH.

6.3.2 Presa El Realito

En la Figura 73 se muestra el diagrama Eh-pH correspondiente al sistema AsO₄ en la presa El Realito a condiciones estándar de presión (1.013 bar) y temperatura (25°C), elaborado con el software Geochemist's WorkBench®. Las condiciones de entrada para el modelado incluyeron los potenciales de las concentraciones de los iones en solución o fase mineral, p[ion]: AsO₄ = 11.51, F⁻ = 4.403, SO₄ = 4.068, NO₃ = 45.78, HCO₃ = 2.257, K = 3.393, Cl

= 3.02, Na = 2.838, Ca = 3.005, Mg = 3.667, SiO₂ = 3.517. Según el diagrama, bajo las condiciones fisicoquímicas presentes en la presa El Realito, el arsénico se encuentra principalmente como ácido arsenioso (H₃AsO₃), el cual es característico de ambientes reductores y de pH bajo. Esta especie se encuentra en equilibrio en el límite con dihidrógeno arseniato (H₂AsO₄⁻), lo cual sugiere una transición química entre condiciones reductoras y ligeramente oxidantes. Este comportamiento coincide con los valores bajos de Eh y ligeramente ácidos de pH detectados en el agua de la presa El Realito, lo cual favorece la presencia de especies de arsénico en su forma trivalente (As(III)), que además es más móvil y tóxica que su contraparte pentavalente (As(V)).

Las condiciones redox en la especiación del arsénico, influyen directamente en su solubilidad, movilidad y riesgo ambiental. La presencia predominante de H₃AsO₃ en esta zona puede estar asociada a la descomposición de minerales arsenicales bajo condiciones reductoras, así como a procesos de disolución del arsénico previamente fijado en óxidos de hierro o fases minerales asociadas.

Según Bundschuh et al. (2008), la desorción y disolución de arsénico inducidas por condiciones reductoras constituye un mecanismo clave en su movilización. En este proceso, el As(V), que se encuentra fuertemente adsorbido bajo condiciones oxidantes, se transforma en As(III), el cual presenta una adsorción más débil sobre óxidos y oxihidróxidos de Fe y Mn, lo que incrementa su movilidad en la fase acuosa. Este comportamiento resulta particularmente relevante en la presa El Realito, donde los valores bajos de Eh y pH ligeramente ácidos favorecen la predominancia de As(III), explicando en parte la mayor movilidad y toxicidad del arsénico observada en este sistema.

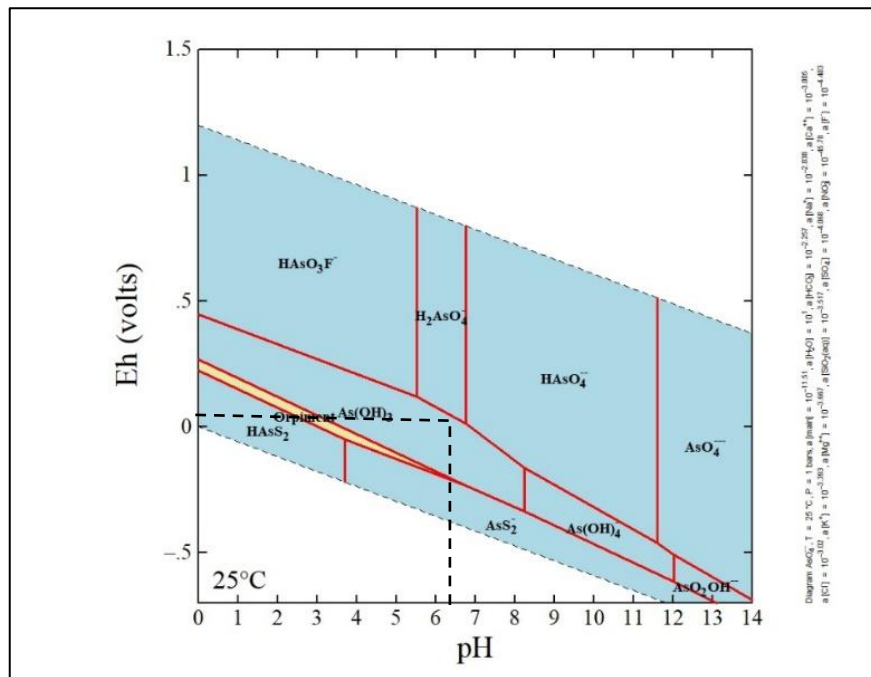


Figura 73. Diagrama para el sistema AsO₄ en la presa El Realito de Eh vs pH.

De acuerdo con el diagrama de la Figura 74, el flúor en solución en la presa El Realito se encuentra predominantemente como el ión fluoruro (F⁻), que es la forma más común, estable y móvil del flúor en aguas naturales. Esta especie se presenta en ambientes oxidantes y de pH neutro a ligeramente alcalino, condiciones compatibles con las mediciones obtenidas en la presa. Cabe señalar que los valores de Eh y pH de la muestra se ubican cerca del límite de estabilidad con la especie HAsO₃F⁻ (hidroxoarseniato fluorado), lo cual sugiere posibles interacciones o asociaciones entre arsénico y flúor en ciertos contextos geoquímicos. Esta proximidad también indica un sistema geoquímico con complejidad en la movilidad conjunta de aniones, especialmente en presencia de minerales secundarios de arsénico o compuestos fluorados.

La presencia de flúor como F⁻ libre resalta su alta solubilidad, especialmente cuando se encuentra asociado con minerales como la fluorita (CaF₂), como se ha discutido anteriormente. Este comportamiento podría explicar los valores medidos en la fase soluble durante los experimentos de lavado y el posterior cálculo del aporte de fluoruro a la cuenca.

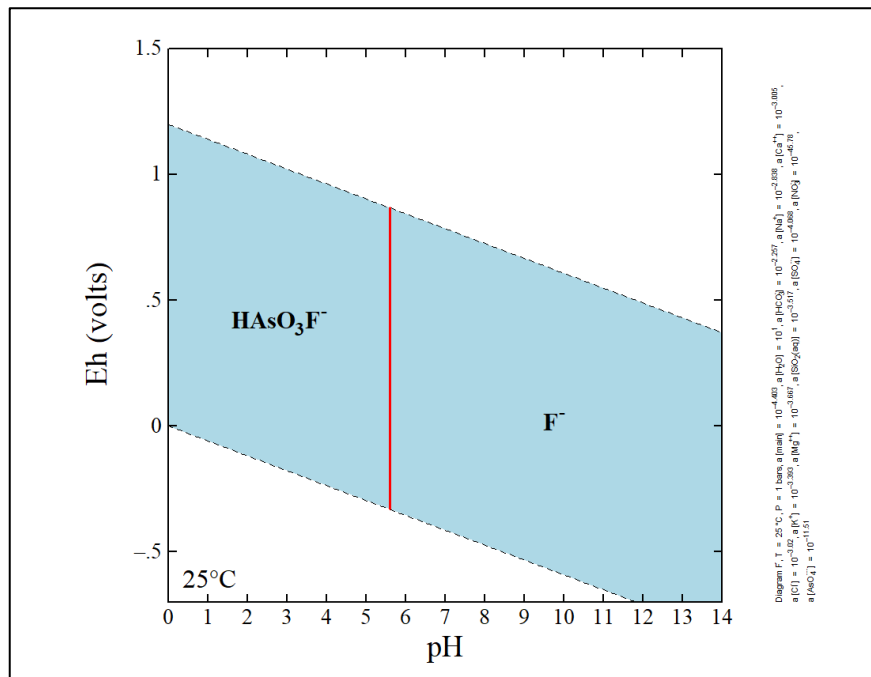


Figura 74. Diagrama de Eh vs pH para el sistema F^- en la presa El Realito.

CONCLUSIONES

La estrategia de diseño de muestreo permitió delimitar 13 microcuencas dentro de la cuenca de la presa El Realito, así como sus cauces principales. En esta región se identificaron 162 sitios mineros metálicos, relacionados con la extracción de Sn, Ag, Pb, Zn, Cu, Au, Fe y Hg, así como 41 sitios mineros no metálicos, asociados a yacimientos de caolín, fluorita, calcita, fosforita y yeso. Todos estos puntos representan un potencial riesgo de aportación de contaminantes hacia cuerpos de agua superficiales, como el río Santa María y, eventualmente, hacia la presa El Realito.

El análisis de agua en diversos puntos de la cuenca evidenció que varios sitios presentan valores que exceden los límites permisibles establecidos en la normatividad mexicana para agua destinada al uso y consumo humano, incluso en comunidades rurales en la Sierra Madre Oriental donde la única fuente de abastecimiento son pozos artesanales en el subálveo. Se detectaron valores elevados de pH, alcalinidad total, fluoruros, Mn, Fe, Pb, Hg y As (V).

En sedimentos, se determinaron concentraciones de arsénico total por encima de los límites establecidos para suelo agrícola, residencial y comercial, mientras que los elementos Ba, Cr, Ni y Pb se encontraron por debajo de dichos límites. Por su parte, los elementos Be, Cd, Ag, Se, Tl y V estuvieron por debajo del límite de detección mediante FRX.

La caracterización mineralógica reveló la presencia de minerales como pirita, fluorita, calcita, cuarzo y distintos tipos de arcillas (aluminosilicatos y silicatos). A través del análisis de EDS se confirmó la presencia de arsénico, hierro y flúor en las superficies de estas fases minerales, lo que refuerza su papel como fuente potencial de liberación de estos elementos hacia el medio acuático bajo condiciones ambientales.

Los experimentos de simulación de lixiviación con agua meteórica mostraron índices de liberación elevados de As(V) y F⁻, particularmente en los primeros ciclos de lavado, indicando una alta solubilidad inicial de estos elementos.

A partir de la integración de estos datos y considerando la precipitación media anual, se estimó un aporte potencial de hasta 3,154.2 mg de As por año proveniente del sitio RSM-El Camarón, mientras que, para fluoruros, el mayor aporte se calculó en 38,327.8 mg F⁻/año

desde el sitio RV-1.2. Estos datos evidencian una carga significativa de contaminantes hacia la presa.

Finalmente, el modelado de especiación geoquímica mediante diagramas Eh-pH permitió identificar que el arsénico se encuentra principalmente en forma de HAsO_4^{2-} y H_3AsO_3 bajo condiciones ligeramente ácidas a neutras y redox moderadas, mientras que el flúor predomina como F^- libre, en equilibrio con fluorita, destacando su alta solubilidad y movilidad en las condiciones ambientales actuales. Estos resultados indican que las condiciones fisicoquímicas del sistema favorecen la liberación y transporte de arsénico y flúor en el entorno hidrogeoquímico de la cuenca.

RECOMENDACIONES

Se recomienda establecer procedimientos de neutralización y preservación de muestras en campo que aseguren la estabilidad de las especies de arsénico antes del análisis. En este estudio se determinó arsénico (V), pero en el diagrama de especiación geoquímica se identifica como arsénico (III) bajo condiciones reductoras en la presa El Realito. Estos procedimientos permitirán un control más preciso y reducirá sesgos asociados a procesos de oxidación posteriores al muestreo.

Se sugiere evaluar la factibilidad de operación y en su caso, rehabilitar las PTARs de las comunidades de Villa de Reyes, Santa María del Río, El Fuerte y Tierra Nueva, para que las descargas del agua residual tratada sobre el cauce de ríos y arroyos cumpla con los parámetros establecidos en la normatividad con tecnologías de tratamiento sostenibles.

Tratar el agua residual que se descarga en las localidades de Villa de Zaragoza y Ojo Caliente y fluye sobre los afluentes que conectan con el río Santa María buscando, buscando soluciones que sean económicamente sostenibles.

Implementar sistemas de potabilización, como tecnologías de adsorción, para reducir los riesgos por altas concentraciones de arsénico y fluoruros a la salud en comunidades remotas cuyo único acceso al agua para uso y consumo humano es de subálveo, álveo y en el mejor de los casos, de las presas.

Evaluar la factibilidad de implementar medidas de remediación ambiental de los residuos y depósitos asociados a yacimientos minerales que representan un riesgo constante de liberación de metales y metaloides hacia el medio acuático.

REFERENCIAS

- Alfaro de la Torre, M. C., Tejeda González, J. C., García Romero, E., Salto Quintana, F., & González Balderas, R. de M. (2021). Situación del abastecimiento de agua a las poblaciones rurales en México: estudio de caso en San Luis Potosí [Situation of water supply to rural populations in Mexico: case study in San Luis Potosí]. *Aqua-LAC*, 13(2), 9. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-2-09>
- Aqualia. (2024). San Luís Potosí – Sistema de acueducto El Realito y planta potabilizadora. Recuperado de <https://www.aqualia.com.mx/san-luis-potosi>
- Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. (Eds.). (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Bundschuh, J., Pérez Carrera, A., & Litter, M. (Eds.). (2008). *Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana*. CYTED.
- Burillo, J. C., Cardona, A., Castro-Larragoitia, J., & Montes, I. (2017). Caracterización y modelación hidrogeoquímica de lixiviados mineros de San Luis Potosí, S.L.P. México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 69(3), 637–654. <https://doi.org/10.18268/bsgm2017v69n3a7>
- Bychinsky, V., Charykova, M., & Omara, R. (2021). Modelado geoquímico de suelos y sedimentos tecnogénicos con aguas naturales usando SELECTOR (mina Chaabet-el-Hamra, Argelia). *Geochemistry*, 81(4), 125799. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2021.125799>
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico* (3ra reimpresión). San Luis Potosí, México: Editorial Universitaria Potosina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería. ISBN: 968-6194-44-4
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999). *Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Arsenic*. In *Canadian environmental quality guidelines*, 1999. Canadian Council of Ministers of the Environment.

Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999). Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Chromium. In Canadian environmental quality guidelines, 1999. Canadian Council of Ministers of the Environment.

Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999). Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life: Lead. In Canadian environmental quality guidelines, 1999. Canadian Council of Ministers of the Environment.

Cardona, A., Banning, A., Carrillo-Rivera, J. J., Aguillón-Robles, A., Rúde, T. R., & Aceves de Alba, J. (2018). Natural controls validation for handling elevated fluoride concentrations in extraction activated Tóthian groundwater flow systems: San Luis Potosí, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 77(4), 121. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7273-1>

Cardona Benavides, A., García Arreola, M. E., Castro Larrañaga, J., Herrera Rendón, E., Loredó Tovías, M., Alonso Torres, S., López Hernández, A. M. G., & Pérez Rodríguez, R. (2016). Evaluación de la calidad del agua suministrada por medio del Acueducto El Realito (Reporte final). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Área Ciencias de la Tierra; Comisión Estatal del Agua; INTERAPAS.

CEA. (2016). Estudio técnico para la reserva de agua superficiales de la cuenca del río Pánuco para el estado de San Luis Potosí.

CENAPRED. (2025, julio 13). *¿Sabes cuál es la función de las presas?* Gobierno de México.

Chávez Valdez, Manuel, Rivera Herrejón, Gladys, Romero Contreras, Tonatiuh, & Vizcarra Bordi, Ivonne. (2013). El pozo: usos, seguridad y tradición en la subcuenca del río San Javier. *Estudios sociales (Hermosillo, Son.)*, 21(41), 261-286.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). (2023). Portal de Geoinformación. Conjunto de datos vectorial Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2011). Estadísticas del Agua en México. Edición 2011.

CONAGUA. (2016). Lineamientos técnicos: Sistema de captación de agua de lluvia con fines de abasto de agua potable a nivel vivienda (Versión 1.0). Programa Nacional para Captación de Agua de Lluvia y Ecotecnias en Zonas Rurales (PROCAPTAR).

CONAGUA. (2023). Estadísticas del agua en México 2023. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/conagua/>

CONAGUA. (2023). Información estadística climatológica. Recuperado el 12 febrero 2024, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

CONAGUA. (2023). La presa El Realito, que abastece de agua a la zona metropolitana de San Luis Potosí, no presenta fallas estructurales que pongan en riesgo su estabilidad. Comunicado de Prensa.

CONAGUA. (2024). Geovisor de Monitoreo de Redes Piezométricas. Recuperado de <https://sigagis.conagua.gob.mx/rp20/>

Contreras Servín, C. (2019). La biodiversidad en San Luis Potosí: Estudio de estado (Vol. 1).

Diario Oficial de la Federación (DOF). (1992). Ley de Aguas Nacionales. Congreso de los Estados Unidos Mexicanos. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_080523.pdf

DOF (Diario Oficial de la Federación). (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003, que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y postoperación de presas de jales.

DOF. (2007). NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel,

plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4978376&fecha=02/03/2007

DOF. (2009). NMX-AA-149/1-SCFI-2008: Agua potable, drenaje y saneamiento - Eficiencia - Metodología para evaluar la eficiencia de los prestadores de servicio de agua potable, drenaje y saneamiento. Parte 1: Directrices para la gestión de los prestadores de servicio de agua residual y para la evaluación de los servicios de agua residual.

DOF. (2017). ACUERDO por el que se da a conocer el valor recuperable, así como las características generales de la obra pública federal de infraestructura hidráulica denominada Sistema Presa El Realito.

DOF. (2018). Acuerdo por el que se dan a conocer los resultados del estudio técnico de las aguas nacionales superficiales en las cuencas hidrológicas de la subregión hidrológica Río Pánuco de la Región Hidrológica número 26 Pánuco. Diario Oficial de la Federación. <https://www.dof.gob.mx>

DOF. (2020). Programa Nacional Hídrico 2020–2024. Programa especial derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019–2024. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5602534&fecha=30/12/2020

DOF. (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022#gsc.tab=0

DOF. (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0

DOF. (2023). Ley de Aguas Nacionales. Última reforma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de mayo de 2023. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_080523.pdf

Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, W. E., & Greenberg, A. E. (Eds.). (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater (21st ed.). American Public Health Association.

EPA. (1999). Folleto informativo de tratamiento de aguas residuales: Desinfección. United States Environmental Protection Agency.

Escot-Espinoza, V. M., Ramos-Arroyo, Y. R., Lázaro, I., Montes-Avila, I., Carrizalez-Yañez, L., & Briones-Gallardo, R. (2021). Presence of arsenic in potential sources of drinking water supply located in a mineralized and mined area of the Sierra Madre Oriental in Mexico. *Toxics*, 9(11), 307. <https://doi.org/10.3390/toxics9110307>

Espinosa, D. L. (2000). Una propuesta para el mejoramiento de los servicios de agua potable,

Esri. (2016). ArcMap (Versión 10.5) [Software]. Esri. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-desktop/overview>

Estrada Cruz, E., & Pereyra Díaz, D. (1995). *Precipitación máxima probable en el estado de Veracruz*. Universidad Veracruzana.

García, E. (1964). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gibson, U., & Rexford, S. (1914). Manual de los pozos pequeños: Localización, diseño, construcción, uso y conservación. LIMUSA Noriega.

Gobierno del Estado de San Luis Potosí. (2021). Diagnóstico 3.5: Acceso al agua en San Luis Potosí. En Plan Estatal de Desarrollo 2021–2027. Recuperado de <https://ped.slp.gob.mx/diagnostico3.5.html>

Google Earth. (2025). Google Earth (Versión 9.3.5) [Software]. Google. <https://www.google.com/earth/>

Gómez Arce, R. M., Mattos Núñez, V. H., Ríos García, M. del P., Chotón Calvo, M. del R., De la Cruz Estrada, L. A., & Blas Pérez, J. S. (2025). Estadística bayesiana, análisis de

componentes principales y factorial aplicado a la investigación científica (1.^a ed.). Editorial Mar Caribe. <https://doi.org/10.70288/emc.9789915698120>

Hammarstrom, J. M., & Smith, K. S. (2002). Geochemical and mineralogical characterization of solids and their effects on waters in metal-mining environments. En R. R. Seal II & N. K. Foley (Eds.), *Progress on geoenvironmental models for selected mineral deposits* (USGS Open-File Report 02-195, pp. 8–54). U.S. Geological Survey.

Hernández, F. Y. & Betancourt, A. M. (2015). Agua y abastecimiento: gestión de cuerpos de agua en la ciudad de San Luis Potosí (México), 1831-1887. *Revista de Historia Regional y Local*.

Huizar Álvarez, R., Carrillo Rivera, J. J., & Juárez, F. (2016). Fluoruro en el agua subterránea: Niveles, origen y control natural en la región de Tenextepango, Morelos, México / Fluoride in groundwater: Levels, origin and natural control at the Tenextepango region, Morelos, Mexico. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, (90), 40–58. <https://doi.org/10.14350/rig.47374>

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (1980). *Síntesis Geográfica de Guanajuato*.

INEGI. (1981). *Guías para la Interpretación de Cartografía. Hidrología*.

INEGI. (1985). *Síntesis de Información geográfica del estado de San Luis Potosí*.

INEGI. (2002). *Síntesis de Información geográfica del estado de San Luis Potosí*.

INEGI. (2005). *Guía para la interpretación de cartografía: climatológica*.

INEGI. (2014). *Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000: serie III. México: INEGI*.

INEGI. (2017). *Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000: serie VI / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México*:

INEGI. (2021). *Diccionario de datos de climas*.

INEGI. (2023). *Aspectos geográficos de San Luis Potosí: Compendio 2022*.

INEGI. (2025). Usos del agua. En Cuéntame. Recuperado de https://cuentame.inegi.org.mx/explora/geografia/usos_del_agua/

INTERAPAS. (2015). Agua para el presente y futuro de Sam Luis Potosí: presa y acueducto El Realito.

INTERAPAS. (2022). Agua potable. San Luis Potosí, México.

INTERAPAS. (2023). Informe anual 2023.

Javier, F., Tradacete, C., Ángel Sánchez De Llanos, J., Luis González Burdiel, J., Del, Ó., Benito, R., Navarro, J. G., Moral, G., & Gutiérrez Iglesias, D. (2015). *Capítulo 2 Hidrología del Pánuco Abril de 2015 Capítulo 2. Hidrología del Río Pánuco*.

Köppen, W. (1936). *Das geographische System der Klimate*. In W. Köppen & R. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie* (Vol. 1, Part C). Berlin: Gebrüder Borntraeger.

Marmolejo, B.M.A. (2023). Caracterización química de sedimentos, agua y lirio acuático en las presas que abastecen a la capital potosina. Tesis de licenciatura. Facultad de ingeniería-UASLP.

Marmolejo B. M. A., Aldama A. C., Briones G. R., & Avalos E. P. C. (2024). Bioconcentración y traslocación de Pb en lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) planta invasora en presas de San Luis Potosí y Guanajuato. *Avances en Ingeniería Química*, 3(1), 45–60. Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química A.C. ISSN: 2683-2925. <https://amidiq.com/avances-en-ingenieria-quimica/>

Mohanty, S., Benya, A., Hota, S., Kumar, M. S., & Singh, S. (2023). Ecotoxicidad del cromo hexavalente y su impacto adverso en el medio ambiente y la salud humana en el valle de Sukinda, India: una revisión sobre la contaminación y las estrategias de prevención. *Química ambiental y ecotoxicología*, 5, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.01.002>

Montes Ávila, I. (2019). Comportamiento geoquímico-ambiental de elementos potencialmente tóxicos derivados de un residuo minero-metalúrgico antiguo y su relación con el agua subterránea [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de San Luis Potosí]. Facultad de Ingeniería, Centro de Investigación y Estudios de Posgrad

Onishi, H., & Sandell, E. B. (1955). Geoquímica del arsénico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 7(1–2), 1–33. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90042-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90042-9)

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2010). El derecho humano al agua y al saneamiento [Resolución A/RES/64/292]. Nueva York, NY: Asamblea General de las Naciones Unidas. Recuperado de https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/ONU%202010.%20El%20derecho%20humano%20al%20agua%20y%20al%20saneamiento.pdf

ONU-FAO. (2000). Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia: Experiencias en América Latina (Serie: Zonas Áridas y Semiáridas No. 13). Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

O’Sullivan, P. E., & Reynolds, C. S. (Eds.). (2003). *The lakes handbook*. Blackwell Science
Plumlee, G. S. (1989). Processes controlling epithermal mineral distribution in the Creede mining district (Tesis doctoral inédita). Harvard University.

Plumlee, G. S. (1999). The environmental geology of mineral deposits. En G. S. Plumlee & M. J. Logsdon (Eds.), *Reviews in Economic Geology* (Vol. 6, pp. 71–116). Society of Economic Geologists.

Plumlee, G. S., & Logsdon, M. J. (1999). An earth-system science toolkit for environmentally friendly mineral resource development. En G. S. Plumlee & M. J. Logsdon (Eds.), *The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, techniques, and health issues* (Vol. 6A, pp. 1–27). Society of Economic Geologists, *Reviews in Economic Geology*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
(2011). *Diccionario geomorfológico* (1.^a ed.). <https://www.igeograf.unam.mx>

Rivas Hernández, A. (2022). ¿Cómo construir un humedal para el tratamiento del agua residual en mi escuela? Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://doi.org/10.24850/b-imta-2022-08>

Rodríguez-Lara, J. W., Cervantes-Ortiz, F., Arámbula-Villa, G., Mariscal-Amaro, L. A., Aguirre-Mancilla, C. L., & Andrio-Enríquez, E. (2022). *Lirio acuático (*Eichhornia*

crassipes): una revisión. Agro Mesoamericana, 33(1), Artículo 44201.
<https://doi.org/10.15517/am.v33i1.44201>

Sánchez-Solis, Y., Raqui-Ramirez, C. E., Huaroc-Ponce, E. J., & Huaroc-Ponce, N. M. (2024). Importancia de conocer la normalidad de los datos utilizados en los trabajos de investigación por tesis. Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0, 17(2).
<https://doi.org/10.37843/rted.v17i2.554>

Selinus, O., Alloway, B., Centeno, J. A., Finkelman, R. B., Fuge, R., Lindh, U. y Smedley, P. (eds.) (2013). Essentials of Medical Geology (Revised Edition). Dordrecht: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5>

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional del Agua). (2015). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Evaluación rápida de plantas potabilizadoras (ISBN: 978-607-626-002-9). Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.

SEMARNAT. (2018). Capítulo 6, tema 1: [Título específico del apartado si lo conoces]. En Informe de la situación del medio ambiente en México 2018. Recuperado de
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap6.html#tema1>

SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2011). Carta Geológica-Minera La Salitrera F14-C15, S.L.P., Esc. 1:50,000.

SGM. (2017, 22 de marzo). Yacimientos minerales. Museo Virtual de Geología.
https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Yacimientos-minerales.html

SGM (2023). Geoquímica. GEOINFOMEX SGM-00-005. En línea:
<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#> consultado el 03/07/2023.

SGM. (2023). Yacimientos minerales. GEOINFOMEX SGM-00-005. En línea:
<https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#> consultado el 03/07/2023.

Servicio Meteorológico Nacional – CONAGUA. Información estadística climatológica. Recuperado el 12 febrero 2024, de

<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Simulador de Flujos de Aguas de Cuencas Hidrográficas (SIATL). Recuperado el 12 diciembre 2023, de https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#

Smith, K.S. and Huyck, H.L.O. 1999. An Overview of the Abundance, Relative Mobility, Bioavailability, and Human Toxicity of Metals. In G.S. Plumlee and M.J. Logsdon (Eds.), The Environmental Chemistry of Mineral Deposits, Reviews in Economic Geology, Volume 6A, pp. 29-70.

Tarback, E. J., Lutgens, F. K., & Tasa, D. (2005). Ciencias de la Tierra (8.^a ed.). Pearson Educación S. A.

Torres-Rivera, S., Torres-Hernández, J. R., Carranco-Lozada, S. E., García-Arreola, M. E., López-Doncel, R. A., & Montenegro-Ríos, J. A. (2023). Anthropogenic contamination in the free aquifer of the San Luis Potosí Valley. International Journal of Environmental Research and Public Health, 20(12), 6152. <https://doi.org/10.3390/ijerph20126152>

Waters S., Atalah J., Thompson L., Thomson-Laing G., Pearman J., Puddick J., Howarth J. D., Reyes L., Vandergoes M.J., Wood S.A. (2023). It's all in the mud - The use of sediment geochemistry to estimate contemporary water quality in lakes, Applied Geochemistry, Volume 153, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105667>.

WHO (World Health Organization). (2017). Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

WHO. (2019). Department of Public Health, Environmental and Social Determinants of Health. World Health Organization. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Yuan, G., Cao, Y., Schulz, H.-M., Hao, F., Gluyas, J., Liu, K., Yang, T., Wang, Y., Xi, K., & Li, F. (2019). A review of feldspar alteration and its geological significance in sedimentary basins: From shallow aquifers to deep hydrocarbon reservoirs. Earth-Science Reviews, 191, 114–140. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.004>

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

ANEXOS

Anexo 1. Estimación de la precipitación en la cuenca presa El Realito.

Clasificación de precipitación entre (mm/año)	Promedio de isoyetas (Pi) (mm/año)	Área de influencia (Ai) km ²	(Pi)*(Ai) (mm/año*km ²)
(<300)	300	61.79	18,535.55
(300-350)	325	602.18	195,708.54
(350-400)	375	2,074.71	778,014.80
(400-450)	425	1,401.69	595,716.85
(450-500)	475	567.48	269,555.35
(500-550)	525	218.30	114,608.39
(>550)	550	113.93	62,663.35
Sumatoria		5,040.08	2,034,802.83
Precipitación mm/año			403.72

Anexo 2. Coeficiente de escorrentía.

Tipo de suelo	Uso de suelo	Área (km ²)	N	AN
Litosol	Desprovisto de vegetación	0.28	86	23.82
	Asentamientos humanos	5.61	69	387.30
	Bosque de táscate	5.57	60	334.31
	Bosque de pino	27.92	60	1675.14
	Bosque de pino-encino	10.08	60	604.97
	Bosque de encino	51.40	60	3083.83
	Bosque de encino-pino	33.43	60	2005.98
	Cuerpo de agua	5.56	100	556.41
	Matorral crasicaule	439.29	60	26357.33
	Mezquital xerófilo	0.79	60	47.61
	Matorral submontano	41.69	60	2501.49
	Pastizal inducido	47.66	48	2287.46
	Pastizal natural	129.74	60	7784.39
	Agricultura de riego anual	5.76	76	437.81
	Agricultura de riego anual y permanente	3.89	76	295.73
	Agricultura de temporal anual	18.56	76	1410.57
	Agricultura de temporal anual y permanente	0.60	76	45.59
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	2.43	48	116.86
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	37.78	48	1813.67
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	8.38	48	402.05

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tipo de suelo	Uso de suelo	Área (km ²)	N	AN
Xerosol háplico	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	35.43	48	1700.53
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	15.65	48	751.07
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	48.13	48	2310.22
	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	34.95	48	1677.54
	Asentamientos humanos	15.14	75	1135.78
	Bosque de pino	8.13	66	536.38
	Cuerpo de agua	1.07	100	106.68
	Matorral crasicaule	37.10	71	2633.97
	Pastizal inducido	21.85	48	1048.57
	Pastizal natural	27.82	48	1335.56
	Agricultura de riego semipermanente	0.24	76	18.01
	Agricultura de temporal anual	40.61	76	3086.30
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	4.46	48	214.15
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	9.19	48	441.05
	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	34.51	48	1656.64
Regosol calcárico	Asentamientos humanos	6.91	75	517.93
	Pastizal natural	0.53	60	31.78
	Agricultura de riego anual	0.32	76	24.29
	Agricultura de temporal anual	1.67	76	127.07
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	0.02	65	1.20
Planosol mólico	Matorral crasicaule	9.83	89	874.85
	Agricultura de temporal anual	3.87	86	332.79
	Desprovisto de vegetación	1.91	91	173.91
	Asentamientos humanos	44.16	83	3664.95
	Bosque de táscate	19.43	77	1496.24
Feozem háplico	Bosque de pino	326.36	73	23824.64
	Bosque de pino-encino	18.68	73	1363.55
	Bosque de encino	26.66	73	1946.20
	Bosque de encino-pino	0.48	73	34.72
	Sin vegetación aparente	1.35	94	126.78
	Cuerpo de agua	18.65	100	1865.27
	Matorral crasicaule	392.85	80	31427.93
	Mezquital xerófilo	2.30	73	167.68
	Matorral submontano	0.33	80	26.71
	Pastizal inducido	212.67	65	13823.26
	Pastizal natural	757.55	65	49240.53
	Agricultura de riego anual	23.81	83	1976.24
	Agricultura de riego anual y permanente	1.09	83	90.66

EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tipo de suelo	Uso de suelo	Área (km ²)	N	AN
Regosol éutrico	Agricultura de riego anual y semipermanente	256.40	83	21281.41
	Agricultura de riego semipermanente	2.56	83	212.59
	Agricultura de temporal anual	426.38	83	35389.21
	Agricultura de temporal anual y permanente	3.10	83	257.54
	Vegetación halófila xerófila	3.79	48	182.03
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	30.94	73	2258.78
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	214.28	73	15642.21
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	4.14	73	302.29
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	70.54	73	5149.40
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	0.25	73	18.54
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	8.40	73	613.21
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	129.60	80	10368.35
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral desértico micrófilo	7.52	80	601.25
	Vegetación secundaria arbustiva de mezquital xerófilo	11.36	80	908.63
	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	371.57	65	24151.85
	Desprovisto de vegetación	0.17	86	14.94
	Asentamientos humanos	3.04	73	222.12
	Bosque de pino	4.56	77	351.36
	Bosque de pino-encino	3.46	60	207.80
	Bosque de encino	14.22	66	938.36
	Bosque de encino-pino	21.63	60	1297.98
	Sin vegetación aparente	0.03	84	2.59
	Cuerpo de agua	0.19	100	18.98
	Matorral crasicaule	66.70	89	5936.27
	Pastizal inducido	22.95	60	1377.05
	Pastizal natural	45.50	65	2957.31
	Agricultura de riego anual y permanente	1.31	76	99.48
	Agricultura de temporal anual	10.59	76	804.79
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino	0.62	60	37.40
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino	5.52	60	331.20
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	4.04	60	242.65
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	20.99	71	1489.94

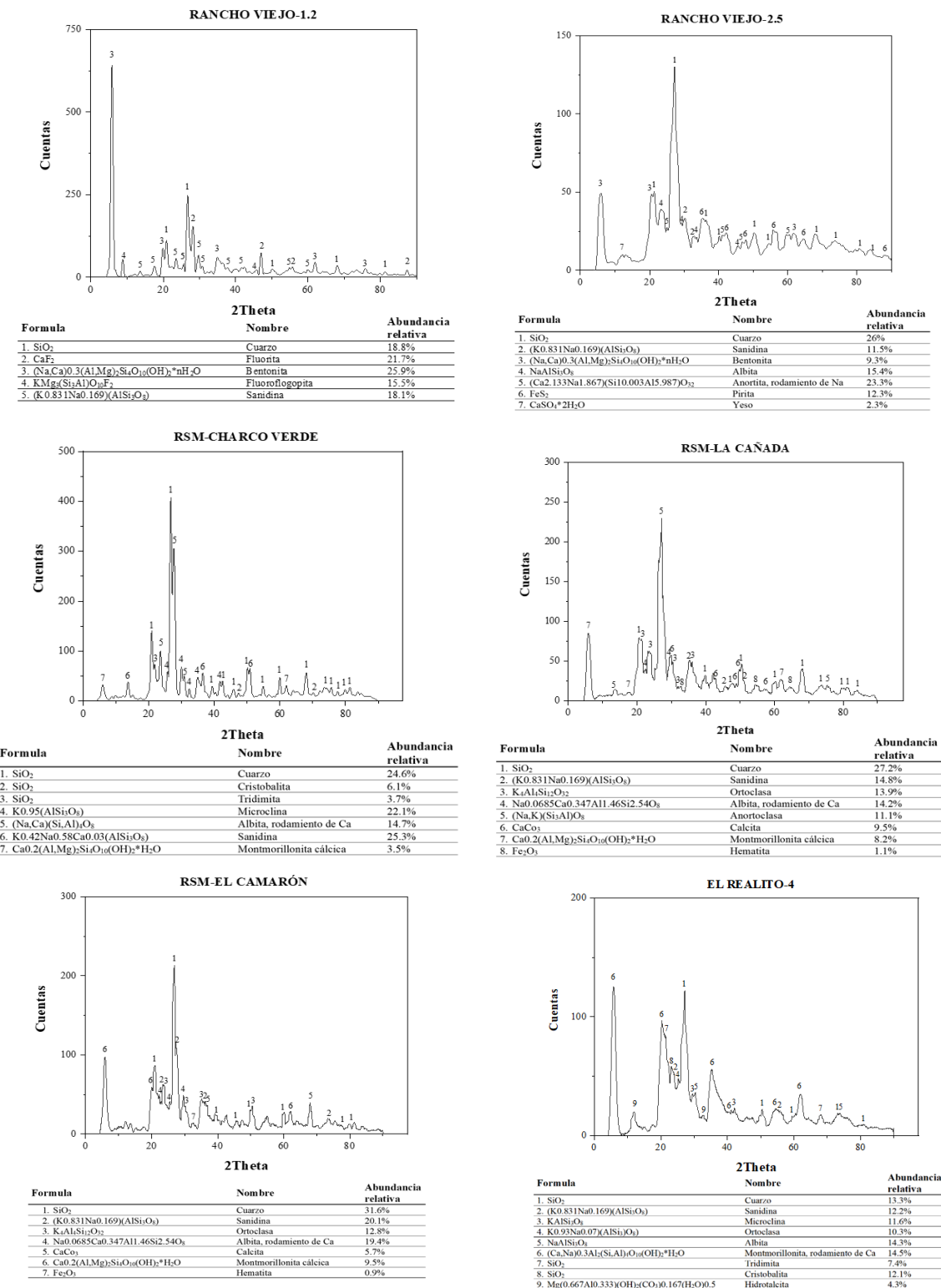
EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS
AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Tipo de suelo	Uso de suelo	Área (km ²)	N	AN
Luvisol órtico	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	54.63	71	3878.74
	Desprovisto de vegetación	0.36	94	33.86
	Matorral crasicaule	13.75	89	1223.55
	Pastizal natural	11.23	73	819.88
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	21.93	80	1754.72
Luvisol crómico	Bosque de táscate	2.31	79	182.13
	Bosque de encino	3.90	79	308.15
	Bosque de encino-pino	5.82	73	424.50
	Cuerpo de agua	0.29	100	29.05
	Matorral crasicaule	3.61	89	321.49
	Pastizal inducido	3.41	73	248.75
	Pastizal natural	6.57	73	479.52
	Agricultura de temporal anual	9.34	86	803.66
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	3.22	79	254.34
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino-pino	3.78	79	298.75
	Vegetación secundaria arbustiva de matorral crasicaule	10.83	89	963.90
	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	9.36	73	683.37
	Bosque de encino	1.74	73	126.71
	Cuerpo de agua	0.27	100	27.16
Feozem lúvico	Matorral crasicaule	0.03	80	2.17
	Pastizal inducido	4.64	65	301.31
	Pastizal natural	1.31	73	95.87
	Agricultura de riego anual y semipermanente	0.39	83	32.43
	Agricultura de temporal anual	9.86	83	818.23
	Agricultura de temporal anual y permanente	1.30	83	108.15
	Vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscate	0.36	73	26.05
	Vegetación secundaria arbórea de bosque de encino	0.16	73	11.95
	Vegetación secundaria arbustiva de pastizal natural	5.26	80	421.07
	Sumatoria		8571	352330.88
			Nponderada	69.93

Se obtuvo una precipitación efectiva de 296.96 mm/año; al dividir este valor entre la precipitación total estimada de 403.72 mm/año, se determinó un Ce de 0.74 para la cuenca de la presa El Realito.

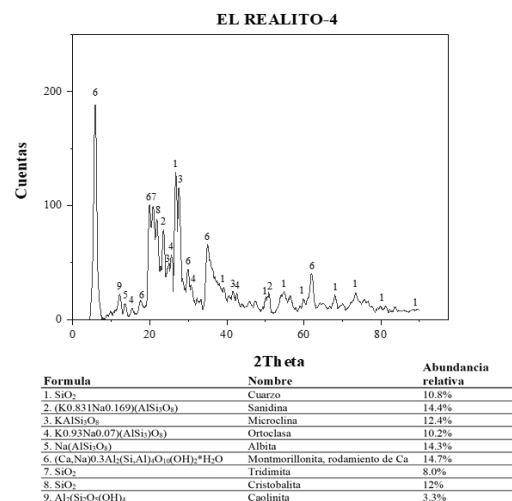
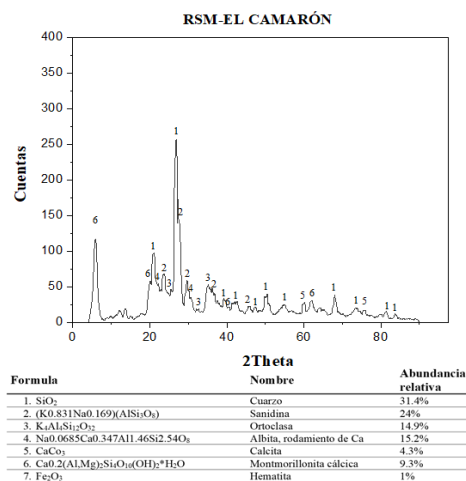
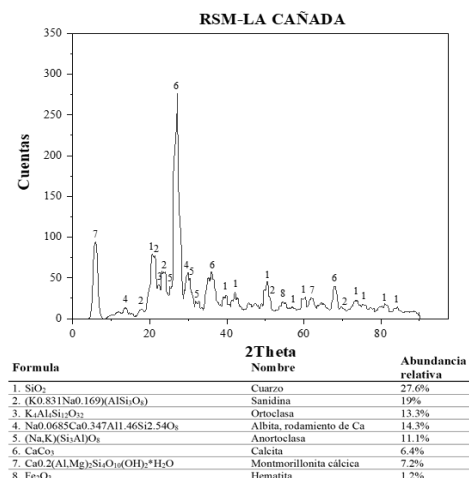
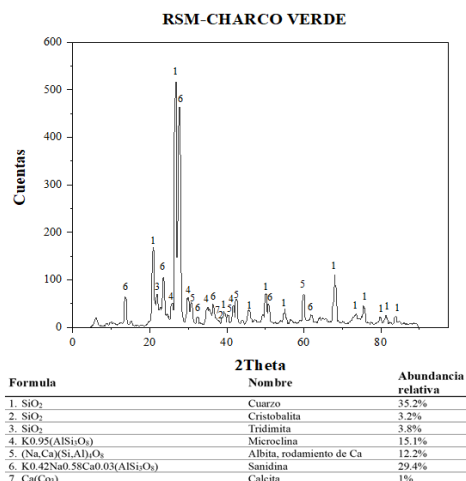
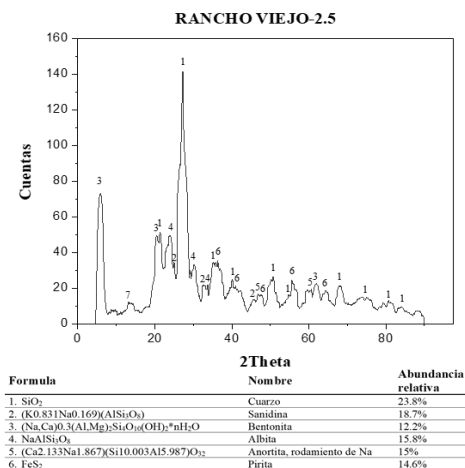
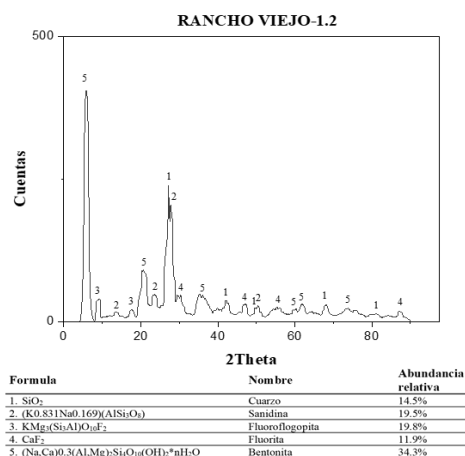
EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

Anexo 3. Difractogramas de los sitios de interés obtenidos del análisis por Difracción de Rayos X.

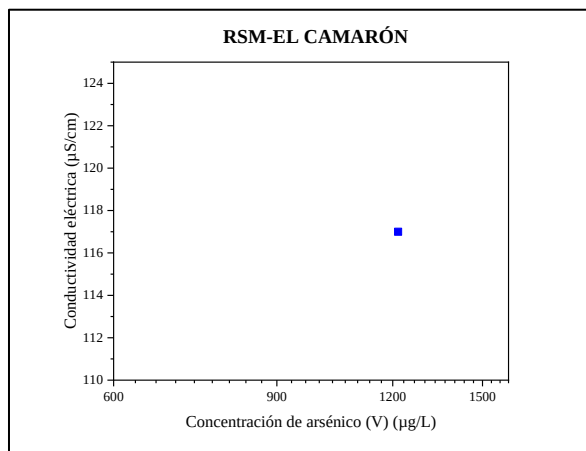


EVALUACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA PRESA EL REALITO, SUS AFLUENTES Y SU IMPACTO SOBRE LA CALIDAD DE AGUA

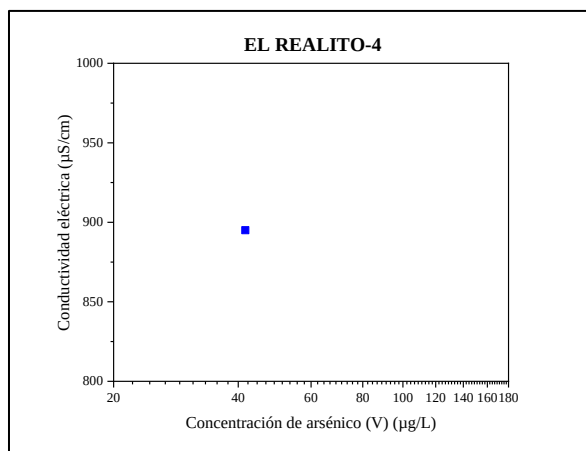
Anexo 4. Difractogramas de los sitios de interés obtenidos del análisis por Difracción de Rayos X después del análisis con agua meteórica.



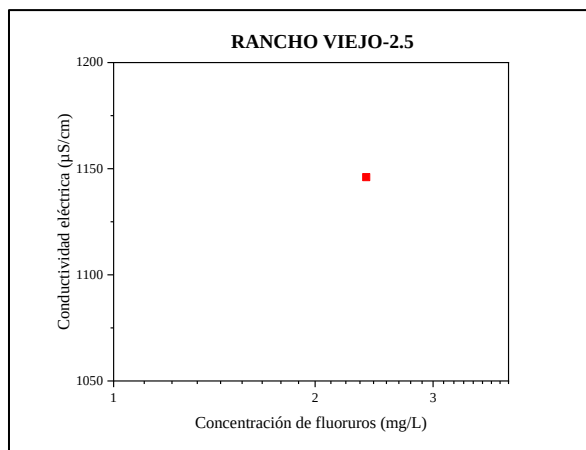
Anexo 5. Ajuste de correlación lineal no considerando el primer lavado de la muestra RSM-El Camarón.



Anexo 6. Ajuste de correlación lineal no considerando el primer lavado de la muestra presa El Realito.



Anexo 7. Ajuste de correlación lineal no considerando el primer lavado de la muestra RV-2.5.



Anexo 8. Ajuste de correlación lineal no considerando el primer lavado de la muestra RSM-Charco Verde.

