

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



**CONCENTRACIÓN DE ANIONES PRESENTES EN LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN SURESTE, DEL ESTADO DE COAHUILA,
MÉXICO. SU RELACIÓN CON LA CALIDAD PARA USO AGRÍCOLA,
INDUSTRIAL Y DOMESTICO**

POR

JOSUÉ ISAÍAS MALDONADO LÓPEZ

TESIS

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO

PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE
**CONCENTRACIÓN DE ANIONES PRESENTES EN LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN SURESTE, DEL ESTADO DE COAHUILA,
MÉXICO. SU RELACIÓN CON LA CALIDAD PARA USO AGRÍCOLA,
INDUSTRIAL Y DOMESTICO**

POR:

JOSUÉ ISAÍAS MALDONADO LÓPEZ

TESIS

PRESENTA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

APROBADA POR EL COMITÉ DE ASESOR:

MC. AARÓN I. MELENDRES ÁLVAREZ

ASESOR PRINCIPAL

ING. GIL FREDY CLEMENTE SOLIS

ASESOR

DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ HERRERA

ASESOR



MC. SERGIO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Buenvista, Saltillo, Coahuila, México.

Marzo 2026.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE
**CONCENTRACIÓN DE ANIONES PRESENTES EN LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN SURESTE, DEL ESTADO DE COAHUILA,
MÉXICO. SU RELACIÓN CON LA CALIDAD PARA USO AGRÍCOLA,
INDUSTRIAL Y DOMESTICO**

POR:

JOSUÉ ISAÍAS MALDONADO LÓPEZ

TESIS


**QUE SOMETE A LA CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN



MC. AARÓN I. MELENDRES ÁLVAREZ

PRESIDENTE DEL JURADO



ING. GIL FREDY CLEMENTE SOLIS

VOCAL



DR. JOSÉ ANTONIO HERNÁNDEZ HERRERA

VOCAL



ING. JOSÉ ENRIQUE MANDUJANO
ÁLVAREZ

VOCAL SUPLENTE





MC. SERGIO SÁNCHEZ MARTÍNEZ

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Marzo 2026.

DECLARACION

El autor quién es responsable directo, jura bajo protesta decir la verdad, que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (copiado y pegado); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados datos o la tesis para presentarla como copia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin comillas; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar el autor original y/o fuente. En este sentido, lo anterior puede ser confirmado por el lector, estando consciente de que, en caso de comprobarse plagio del texto, no respetar los derechos de autor, edición o modificación, será sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias generadas en caso de existir cualquier tipo de plagio y declaro que este trabajo es original.

Autor principal

Josué Isaías Maldonado López

AGRADECIMIENTO

Agradezco A Mi Alma Terra Mater A Mi **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.**

Por brindarme la formación academia que me acogió, alimento y cuido como uno más de sus hijos y brindarme lo necesario para concluir mis estudios profesionales con una educación de excelencia en sus aulas con los mejores catedráticos y doctores.

Al Departamento De Riego Y Drenaje.

Por darme la oportunidad de finalizar mi trabajo de tesis y poder formarme en sus laboratorios de HIDRÁULICA y R.A.S.P.A, donde dejo grandes momentos con mis catedráticos y amigos.

A mi asesor de tesis.

Doctor Luis Samaniego Moreno.

Ala memoria de mi asesor de tesis por brindarme su apoyo y orientación, paciencia y valioso conocimiento durante el desarrollo del presente trabajo y por ser uno de los doctores a cargo de mi educación y ser un gran catedrático que me cuido en mi estancia estudiantil.

Al MC Aarón I. Melendres Álvarez.

Le expreso mi más sincero agradecimiento por dar continuidad a este trabajo y ayudarme a culminarlo, su orientación, rigor y valiosas observaciones han sido determinantes para culminar este trabajo de manera satisfactoria.

Al Instituto Nacional De Estadística, Geográfica e Informática.

Por su apoyo al facilitarme los datos de los aniones en los pozos de la región sureste del estado de Coahuila y poder culminar este trabajo para mi titulación.

Al Ingeniero Gilberto Everardo Calvo Villatoro.

Por cuidarme como un hijo, guiarme cuando no sabía qué camino tomar y estar siempre presente, incluso en los momentos más difíciles, por abrirme un espacio en su casa y en su empresa no solo me enseñaste un oficio o una forma de trabajar, me enseñaste valores: la responsabilidad, el esfuerzo, la humanidad y el compromiso, cada oportunidad que me brindaste fueron una muestra de tu confianza de tu gran corazón y que será un padre más para mí.

A la Señora Isabel Concepción Báez Olivo

Por ser otra madre para mí en esta vida y ayudarme en culminar esta etapa de mi vida y estaré muy agradecido con ella por sus regaños y su cuidado, siempre la llevare en mi corazón y que le doy las gracias por acogerme como uno más de sus hijos.

Al Licenciado Ángel de Jesús Villatoro Martínez

Por ayudarme y aconsejarme cuando necesite y ser una persona especial conmigo, siempre estaré muy agradecido de sus consejos, lo llevare en mi mente y corazón.

A mis amigos.

Vicente Saúl Ávila Peralta.

Saúl Adán Montalvo.

José Flores Macedo.

Enrique Briones Gallegos.

Por la mistad que vivimos dentro y fuera de la universidad, porque este logro no es solo individual, es el resultado de un camino que recorrimos juntos.

Compartimos desvelos, trabajos interminables, exámenes difíciles, risas, estrés y también muchos momentos que quedaran en la memoria. Culminamos una etapa muy importante de nuestras vidas y aun que nuestros caminos tomen rumbos

distintos me llevo el orgullo de haber compartido esta experiencia con personas increíbles. ¡Que el futuro nos depare aún más éxito a todos!

DEDICATORIA

A Dios por su amor y su bondad que me ha brindado durante todo mi camino y las fuerzas que me dio para superar obstáculos y dificultades a lo largo de mi vida, por permitirme alcanzar una meta que parecía difícil de alcanzar. Gracias por darme una familia que siempre me ayuda a superarme y ser lo mejor de mí.

A MIS PADRES.

Fernando Maldonado de la Cruz.

Candelaria del Carmen López Villatoro.

Por su apoyo incondicional, sin ellos no sería posible las metas que he alcanzado en mi vida y culminar un escalón más de mi vida profesional, sin el sacrificio que ellos han hecho por mí, sin ellos no sería posible este gran logro de mi vida, les dedico este trabajo hecho con amor a mis padres que son todo para mí, son unos grandes padres los amo. Gracias por su paciencia y amor así a mí.

A Mi Hermano.

Fernando de Jesús Maldonado López.

A mi hermano muchas gracias por estar siempre conmigo y ser una gran almohada en este proceso de mi vida académica, sé que pasamos momentos difíciles en la vida, pero no podía haberlos superado sin tu compañía y tus regaños, eres un gran hermano te amo mucho.

A Mi Bisabuelito.

Juan López Gutiérrez.

A mi bisabuelito muchas gracias por criarme y estar en una etapa muy bonita en mi vida que me crio para ser el hombre que soy y sus enseñanzas siempre llevaré en mi vida, por finalizar una gran meta en mi vida profesional.

A Mi Abuelita.

Josefa Virginia Villatoro Martínez.

Que me crio y será siempre mi madre querida que donde quiera que te encuentres te mando un beso y un gran abrazo, por criarme y apoyarme en mi vida y todo lo que hizo por mí y convivir una parte de mi vida, te llevare siempre en mi corazón mamita Virginia.

A Mi Abuelito.

Jaime De Jesús López Morales.

Por el estar juntos y poder criarme con sus enseñanzas, por sus consejos, el apoyo que siempre me da y los ánimos que me ofrece, eres un gran pilar en mi vida profesional, te llevo en mi vida siempre papa Jaimito.

A Mis Abuelitos.

Rosario de la Cruz Gordillo.

Juan Maldonado Velasco.

Por ser pilares en mi vida, les mando un abrazo y un beso donde quiera que se encuentren, sus enseñanzas y el cariño con el que me criaron nunca lo olvidare y siempre los tendré en mi vida con cariño, y con mucho amor a mi abuelita rosario, mamá chayito.

A Mis Tíos Abuelos.

Helena Villatoro Martínez.

Gilberto Calvo.

Por el gran apoyo que me dieron y los consejos que gracias a ellos pude culminar una gran etapa en mi vida y vida profesional, que son una gran parte de mí siempre le estaré muy agradecido por todo y mi tío Gilberto muchas gracias por sus consejos y enseñanzas, donde quiera se encuentre le mando un fuerte abrazo y mi agradecimiento por toda mi vida.

A Mis Tíos.

Julio cesar López Villatoro.

Marvin Rogelio López Villatoro.

Eder de Alejandro López Villatoro.

Gilberto Everardo Calvo Villatoro

Luis Alberto Calvo Villatoro.

Mauricio Calvo Villatoro.

Jorge Raúl Calvo Villatoro.

Julieta del Carmen Calvo Villatoro.

Ricardo de Jesús Magdaleno Velasco.

Rosario Maldonado de la Cruz.

Inés de María Maldonado de la Cruz.

María Natividad Maldonado de la Cruz.

Alfredo Maldonado de la Cruz.

Oralia Villatoro.

Isabel Concepción Báez olivo.

María del Rosario Báez olivo.

Por criarme como uno más de sus hijos y siempre estar ahí para mí cuanto más lo necesite, por sus consejos y regaños, ayudarme en mi vida profesional los llevaré con cariños en mi corazón y mente.

A Mis Primos.

Daniela Guadalupe Magdaleno Calvo.

Cristiani Ricardo Magdaleno Calvo.

Jaqueline Guadalupe Calvo Solano.

Fauricio Alfredo Maldonado Villatoro.

Heidi Nayhelli Maldonado Villatoro.

Lorena del refugio Villatoro Maldonado.

Raquel Villatoro Maldonado.

Ángel Alejandro Martínez Maldonado.

Arantza Isabel Calvo Báez.

Helena Dánae Calvo Báez.

Giovanna tanith Gonzales Báez.

Por su invaluable cariño y apoyo al crecer juntos como hermanos, los llevaré siempre con esos recuerdos de ustedes.

A Mis Sobrino.

Fernando Valdemar Maldonado Díaz.

Diana Guadalupe Maldonado Díaz.

Evan Eduardo Gallego González.

Hanna Lucia Rodríguez González.

Gilberto Daniel Calvo Martínez.

Pablo de Jesús Díaz Magdaleno.

Sergio Emiliano Díaz Magdaleno.

Jesús Alberto Ramírez calvo.

Marley Deudiel de la Torre Villatoro.

Mayorid Sinaí de la Torre Villatoro.

Por ser una alegría en mi vida y mostrar el amor sincero y más puro en esta vida, les dejo este trabajo en forma de amor para ellos y que les pueda servir en su vida futura, les deseo mi mayor amor y éxito.

INDICE DE CONTENIDO

INDICE DE CONTENIDO	XIII
INDICE DE CUADROS	XV
INDICE DE FIGURAS.	XVI
RESUMEN.	XVIII
I INTRODUCCIÓN.	1
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	2
1.3 HIPÓTESIS.	2
II REVISIÓN DE LITERATURA.	3
2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS REGIONES ÁRIDAS.	3
2.1.1 PRESIÓN CRECIENTE SOBRE LOS ACUÍFEROS.....	4
2.2 CALIDAD DEL AGUA.	5
2.2.1 INFLUENCIA DE ANIONES EN LA CLASIFICACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.	6
2.3. ANIONES PRINCIPALES.....	7
2.3.1 NITRATOS.....	8
2.3.2 CARBONATO Y BICARBONATO.....	9
2.3.3 SULFATOS.....	10
2.3.4. CLORURO.....	11
2.3.5 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE ANIONES.	11
2.4 IMPACTO DE LAS CONCENTRACIONES ANIÓNICAS EN LA POTABILIDAD, PARA RIEGO Y CORROSIVIDAD DEL AGUA EN LA INDUSTRIA MEXICANA. 12	
2.4.1 NORMAS DE REGULACIÓN DE LOS ANIONES EN LAS AGUAS DE LOS ACUÍFEROS DE MÉXICO.....	13
2.4.2 ESPECIFICACIONES SANITARIAS.....	14
2.5 EFECTO DE LOS IONES EN LA TUBERIA INDUSTRIAL.....	14
2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIVIDAD DEL CLORO.	15

2.5.4 EL IMPACTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CLORURO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA EN ACERO INOXIDABLE.	17
2.6 CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS PARA USO AGRÍCOLA.....	18
2.6.1 CLASIFICACIÓN DEL POR CIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE.....	19
2.6.2 FACTOR DE DECISIÓN EN LAS AGUAS DE RIEGO	20
2.7 CARBONATO DE SODIO RESIDUAL.....	23
III MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1 LOCALIZACIÓN.....	26
3.2 SOFTWARE ARCMAP 10.5.....	28
3.2.1 TAREAS HABITUALES EN ARCMAP 10.5.....	28
3.2.2 DATOS.....	28
3.2.3 INTERPOLACION.....	30
3.3 HERRAMIENTA KRIGING DEL ARC MAP.....	31
IV RESULTADOS Y DISCUCIONES.....	43
4.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS POR PARÁMETRO.....	44
4.1.1 PARA EL CONSUMO HUMANO.....	44
4.1.2 SULFATOS (SO_4^{2-}).....	44
4.1.2 BICARBONATOS (HCO_3^-).....	46
4.1.3 CARBONATOS (CO_3^{2-}).....	48
4.1.4 CLORURO (CL^-).....	50
4.1.5 NITRATOS (NO_3^-).....	52
4.2 CLASIFICACIÓN DE LA SALINIDAD PARA USO AGRÍCOLA.....	53
4.3 CLASIFICACIÓN DEL POR CIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE.....	56
4.4 CARBONATO DE SODIO RESIDUAL.....	59
4.5 CLASIFICACIÓN DEL AGUA PARA USO INDUSTRIAL.....	61
4.5.1 IONES QUE AFECTAN LAS TUBERÍAS INDUSTRIALES.....	62
4.5.2 CLASIFICACIÓN DEL ION CLORO.....	62
V CONCLUSIÓN.....	68
VI BIBLIOGRAFÍA.....	69

INDICE DE CUADROS.

Cuadro 1. Clasificación del Carbonato de Calcio.....	10
Cuadro 2. Límites Permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas.	14
Cuadro 3. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual.	25
Cuadro 4. Municipios del área de estudio en Coahuila de Zaragoza y su extensión territorial.	27
Cuadro 5. Coordenadas en UTM de los pozos con los datos de los aniones.	28
Cuadro 6. Pozos que superan el límite permisible de Sulfato (SO ₄ _Mg/L).	45
Cuadro 7. Pozos con mayores concentraciones de Bicarbonato (HCO ₃ _Mg/L).	47
Cuadro 8. Pozos con mayores concentraciones de Carbonatos (CO ₃ _Mg/L). ...	49
Cuadro 9. Pozos con altas concentraciones de Cloruro (Cl _Mg/L).	51
Cuadro 10. Pozos con mayores concentraciones de Nitratos (NO ₃ _Mg/L).	53
Cuadro 11. Clasificación de la salinidad en la Región Sureste del Estado de Coahuila.....	54
Cuadro 12. Pozos con concentraciones medias de salinidad.....	56
Cuadro 13. Clasificación del por ciento de sodio intercambiable.....	57
Cuadro 14. Pozos con concentración muy alta en sodio.	58
Cuadro 15. Clasificación del Carbonato de Sodio Residual.....	59
Cuadro 16. Carbonato de Sodio Residual_ Clases.....	61
Cuadro 17. Pozos clasificados como no recomendables en Carbonato de Sodio Residual.....	61
Cuadro 18. Clasificación del cloruro para uso industrial.	62
Cuadro 19. Pozos con concentraciones medias.	64

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Diagrama de clasificación del agua de riego (Manual 60, USDA).	22
Figura 2. Localización del área de estudio. Elaboración propia.	26
Figura 3. Localización de los pozos en la zona de estudio. Elaboración propia.	27
Figura 4. Nuevo Mapa. Elaboración propia.....	31
Figura 5. Botones de Mapa en Blanco y OK. Elaboración propia.	31
Figura 6. Botón Agregar Datos. Elaboración propia.....	32
Figura 7. Agregar archivo pozos_1.shp. Elaboración propia.	32
Figura 8. Pozos cargados en el ArcMap. Elaboración propia.	33
Figura 9. Activación de las extensiones de geoprocresamiento. Elaboración propia.	33
Figura 10. Activación de la herramienta geostatical Analyst. Elaboración propia.	34
Figura 11. Herramienta Geostatistical Analyst. Elaboración propia.	34
Figura 12. Kriging/cokriging. Elaboración propia.....	35
Figura 13. Datos medidos y predecidos. Elaboración propia.....	35
Figura 14. Reporte del proceso realizado. Elaboración propia.	36
Figura 15. Mapa de salida Kriging. Elaboración propia.....	36
Figura 16. Clasificación de los límites permisibles. Elaboración propia.	37
Figura 17. Guardado en formato TIFF y reclasificar el archivo. Elaboración propia.	37
Figura 18. Guardado y Reclasificación. Elaboración propia.	38
Figura 19. Herramienta ArcToolbox. Elaboración propia.	38
Figura 20. Reclasify. Elaboración propia.	39
Figura 21. Classification/Clasificación. Elaboración propia.	39
Figura 22. Conversión archivo en shapefile. Elaboración propia.	40
Figura 23. Table Options. Elaboración propia.....	40
Figura 24. Add Field. Elaboración propia.....	41
Figura 25. Agregación de datos. Elaboración propia.	41
Figura 26. Field Calculator. Elaboración propia.	42
Figura 27. Simbología del archivo. Elaboración propia.....	42

Figura 28 Ubicación de pozos analizados en este estudio. Elaboración.....	44
Figura 29. Distribución del Sulfato (Mg/L). Elaboración propia.	44
Figura 30. Distribución del Bicarbonato (Mg/L). Elaboración propia.	46
Figura 31. Distribución del Carbonato (Mg/L). Elaboración propia.....	49
Figura 32. Distribución del Cloruro (Mg/L). Elaboración propia.	50
Figura 33. Distribución Nitrato (Mg/L). Elaboración propia.....	53

RESUMEN.

El presente estudio analiza la calidad del agua subterránea en la región sureste del estado de Coahuila, México, enfocándose en la concentración de los principales aniones: nitratos (NO_3^-), bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2-}), sulfatos (SO_4^{2-}) y cloruros (Cl^-). La problemática se enmarca en la creciente presión sobre los acuíferos en zonas áridas y semiáridas, donde el agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento. El estudio se desarrolló en los municipios de Arteaga, General Cepeda, Ramos Arizpe y Saltillo, utilizando datos geoquímicos de pozos proporcionados por fuentes oficiales. Mediante el uso del software ArcMap 10.5 y la herramienta geoestadística Kriging, se generaron mapas de distribución espacial de los aniones para identificar zonas con diferentes grados de concentración. Los resultados fueron comparados con los límites permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1 y otras normativas mexicanas. Se identificaron áreas donde las concentraciones de sulfatos, cloruros y nitratos superan los valores recomendados, lo cual puede representar riesgos para la salud humana, afectar la estructura del suelo en uso agrícola y generar problemas de corrosión en infraestructura industrial. Se concluye que la región presenta sectores con deterioro en la calidad del agua subterránea, siendo necesario fortalecer los programas de monitoreo, regulación y manejo sostenible del recurso.

Palabras Clave: Agua subterránea, Calidad del agua Aniones, Carbonato de Sodio Residual, Corrosividad.

I INTRODUCCIÓN.

El abastecimiento del agua en México afronta diferentes problemáticas que van desde la sobreexplotación de los mantos acuíferos, los problemas en la red de distribución del agua, la contaminación y la falta de un control sobre las concesiones, incluyendo la parte agrícola. Del agua se tiene, 77% está concesionada a la agricultura, 14% es para abastecimiento público como uso doméstico y negocios, 5% es para la generación de energía y el 4% restante es para la industria. En 2015, CONAGUA reportó una cobertura de agua potable en el país del 92.5%. De este porcentaje, el 95% estaba destinado a zonas urbanas, mientras que el resto a las zonas rurales, pero las zonas urbanas pierden cerca del 40% de su agua potable debido a fugas en las redes de distribución, lo que ocasiona la falta de abastecimiento en algunas zonas. Este mismo fenómeno afecta al agua destinada a la agricultura, donde se calcula una pérdida de 50%. Por su parte, los industriales usan agua de pozo para sus procesos y los permisos de concesión que les otorgan están sobre estimados sin que exista una limitación sobre el volumen que solicitan (García, 2018).

En Coahuila se genera un escurrimiento medio anual de 2,309 hm³, compartido con Nuevo León, Tamaulipas y Estados Unidos de América mediante acuerdos. La recarga de aguas subterráneas es de 1,604 hm³, pero se extraen 1,890 hm³, lo que implica una sobreexplotación de entre 20 y 50% en algunas zonas. El principal uso del agua es agrícola (43.67%), seguido por la generación eléctrica (42.73%), mientras que el uso público urbano (5.44%) e industrial (4.19%) representan proporciones menores. En Saltillo, el abastecimiento de agua proviene exclusivamente de fuentes subterráneas mediante pozos profundos, siendo Sierra de Zapalinamé la principal zona de captación (Fundación Villa de Patos, 2018).

1.1 OBJETIVO GENERAL.

- Evaluar la concentración, distribución y origen de los aniones presentes en las aguas subterráneas en la región Sureste del Estado de Coahuila con el fin de determinar la calidad de esta.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Caracterizar las condiciones químicas del agua de los acuíferos de la región sureste del estado de Coahuila.
- Cuantificar las concentraciones de los aniones (bicarbonato, carbonato, sulfato, cloruro y nitrato) de las muestras de agua subterránea analizadas.
- Comparar los resultados obtenidos de los aniones en aguas subterráneas con los límites establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas de la calidad del agua.
- Analizar la distribución de los aniones presentes en las aguas subterráneas de la región sureste del estado de Coahuila, para identificar las zonas con diferentes grados de contaminación.
- Evaluar las posibles fuentes de aniones en los acuíferos.
- Proponer medidas para disminuir la concentración de los aniones en la región sureste del estado de Coahuila.

1.3 HIPÓTESIS.

- Existe una presencia alta de concentraciones de aniones en el agua subterránea en la región sureste del estado de Coahuila.

II REVISIÓN DE LITERATURA.

2.1 IMPORTANCIA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LAS REGIONES ÁRIDAS.

La disponibilidad de agua dulce es un factor crítico para la sostenibilidad de las sociedades humanas, influenciada por la distribución heterogénea de los recursos hídricos en el tiempo y el espacio (Shojaeian *et al.*, 2021).

En regiones áridas y semiáridas, esta problemática se exagera debido a la escasez inherente de precipitaciones y la limitada presencia de fuentes superficiales permanentes (Bhering *et al.*, 2021).

En tales entornos, el agua subterránea emerge como un recurso fundamental, proveyendo más de un tercio del agua utilizada globalmente y siendo indispensable para sostener la ecología y satisfacer las necesidades hídricas de consumo y producción de alimentos (Wu *et al.*, 2020).

Esta dependencia se acentúa por la fiabilidad y estabilidad que ofrece el agua subterránea, en contraste con la variabilidad de las fuentes superficiales influenciadas por patrones climáticos a corto plazo (Xue *et al.*, 2022).

Esta sobreexplotación genera una serie de consecuencias negativas, incluyendo el incremento en los costos de bombeo, la disminución de la calidad del agua, la degradación de ecosistemas acuáticos y subsidencia del terreno (Quandt *et al.*, 2023).

Ante este panorama, la gestión adecuada de las aguas subterráneas es un desafío significativo, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde la presión sobre este recurso es considerablemente mayor debido al cambio climático y la creciente demanda hídrica (Alao *et al.*, 2024).

2.1.1 PRESIÓN CRECIENTE SOBRE LOS ACUÍFEROS.

La gestión sostenible de este recurso vital se ha vuelto un desafío apremiante, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde la disponibilidad de agua subterránea es fundamental para el consumo humano, la agricultura y la industria (Céspedes *et al.*, 2024).

Esta presión se intensifica debido al aumento exponencial de la demanda hídrica global, multiplicada aproximadamente por seis en el último siglo, y a la variabilidad climática que exacerba la escasez en muchas naciones (Polemio & Voudouris, 2022).

Las proyecciones indican que esta tendencia continuará, con la demanda global de agua incrementándose a más del doble de la tasa de crecimiento poblacional (Ashraf *et al.*, 2017).

Este escenario se agrava por la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos, impulsada por la intensificación agrícola y la urbanización, que ha llevado a tasas de agotamiento de los acuíferos que superan sus capacidades de recarga natural en numerosas regiones a nivel mundial (Xiao *et al.*, 2025).

Este desequilibrio hídrico global, caracterizado por una demanda creciente y una oferta limitada, se ve acentuado por patrones climáticos alterados que exacerban el estrés hídrico subterráneo (Rojas, 2024., Wu *et al.*, 2020).

De hecho, más de un tercio del agua utilizada globalmente se extrae de reservas subterráneas, siendo crucial para mantener ecosistemas y satisfacer necesidades de consumo y producción alimentaria, especialmente en regiones áridas y semiáridas que carecen de suficiente agua superficial (Wu *et al.*, 2020).

Aparte del abastecimiento y cantidad del agua, otro factor muy importante a considerar es la calidad del agua subterránea, la cual dicta el uso apropiado para la misma.

2.2 CALIDAD DEL AGUA.

La calidad del agua se refiere a las características físicas y las concentraciones de componentes químicos presentes en una muestra de agua, implicando un juicio sobre su idoneidad para un uso particular (Day & Dallas, 2011).

Este concepto es fundamental para prevenir enfermedades y mejorar la calidad de vida, siendo un indicador clave de la salud ambiental de una cuenca hidrográfica (Lima *et al.*, 2019).

El monitoreo constante de la calidad del agua es una herramienta esencial para la gestión eficaz de los recursos hídricos (Sória *et al.*, 2020., Whig, 2016).

La evaluación de la calidad del agua es un proceso multifacético que se basa en la medición de parámetros fisicoquímicos, los cuales permiten cuantificar las propiedades del agua y detectar posibles contaminantes (Sarwar *et al.*, 2022).

Estos parámetros proporcionan información esencial sobre el estado del recurso hídrico, permitiendo identificar alteraciones que pueden afectar tanto a la vida acuática como a la salud humana (Escatron *et al.*, 2022).

Asimismo, estos parámetros son vitales para discernir la presencia de impurezas, ya sean flotantes, disueltas, suspendidas, microbiológicas o bacteriológicas, cuya composición y concentración varían según el uso previsto del agua (Cruz, RAC 2022).

Uno de los parámetros a considerar para evaluar la calidad del agua son los aniones.

2.2.1 INFLUENCIA DE ANIONES EN LA CLASIFICACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.

El análisis de las concentraciones de aniones predominantes como bicarbonato, carbonato, sulfato, cloruro y nitrato es fundamental para caracterizar la facies hidroquímica de las aguas naturales (Chadha, 1999).

Esta caracterización es crucial para determinar el origen de los componentes disueltos y, consecuentemente, evaluar el uso potencial del agua en diversas aplicaciones como el consumo humano, riego agrícola y procesos industriales (Jadoon *et al.*, 2024).

La proporción relativa de estos iones permite inferir los procesos hidrogeoquímicos dominantes, tales como la interacción agua-roca, la intrusión salina o la influencia antropogénica (Arroyo-Figueroa *et al.*, 2024).

La identificación del anión dominante, como el bicarbonato, que frecuentemente es el más abundante en cuerpos de agua, o el cloruro, que puede ser prominente en lagos, es clave para entender las fuentes de la salinidad, ya sean naturales por meteorización de minerales o antropogénicas por fertilizantes agrícolas (Franco *et al.*, 2024., Jadoon *et al.*, 2024).

Esta diferenciación es crucial para comprender la composición del agua y las reacciones geoquímicas que ocurren en el acuífero (Lima *et al.*, 2019).

La abundancia relativa de estos aniones, por ejemplo, donde el bicarbonato supera al sulfato y al cloruro en aguas jóvenes o el nitrato se convierte en el segundo anión dominante en ciertas zonas, es un indicador robusto de los procesos de recarga y la interacción con los materiales geológicos circundantes (Madrigal-Solís *et al.*, 2022).

2.3. ANIONES PRINCIPALES.

La composición química de las aguas subterráneas, en particular la concentración de sus aniones principales, constituye una herramienta diagnóstica esencial para dilucidar los procesos hidrogeoquímicos que gobiernan la dinámica de los acuíferos y determinar la calidad intrínseca del recurso hídrico (Zabala *et al.*, 2014).

En este contexto, el estudio de la variabilidad espacial y temporal de aniones como el bicarbonato (HCO_3), carbonato (CO_3^{2-}), cloruro (Cl), sulfato (SO_4^{2-}) y nitrato (NO_3) permite inferir sobre el origen del agua, la interacción agua-roca, la intrusión salina, y la influencia de actividades antropogénicas en el sistema hidrogeológico (Jadoon *et al.*, 2024).

Cada uno de estos aniones principales posee un significado hidroquímico particular que revela información crucial sobre los procesos biogeoquímicos y las fuentes de contaminación en los sistemas acuáticos.

La presencia de bicarbonato, por ejemplo, es un indicador primordial de la disolución de minerales carbonatados y su contribución a la alcalinidad del agua, mientras que el cloruro puede señalar procesos de intrusión salina o contaminación antropogénica (Lima *et al.*, 2019., Madrigal-Solís *et al.*, 2022).

Por otro lado, la detección de sulfato en concentraciones elevadas a menudo está asociada con la disolución de minerales evaporíticos, como el yeso y la anhidrita, o con procesos de oxidación de sulfuros, lo cual influye en el sabor y la corrosividad del agua (Arroyo-Figueroa *et al.*, 2024).

2.3.1 NITRATOS.

La concentración de nitratos en el agua subterránea es un tópico común de muchas discusiones acerca de la calidad del agua, ya que es de importancia tanto para humanos como para animales. Debido a sus propiedades físicas, no pueden olerse ni sentirse y su presencia en concentraciones potencialmente peligrosas, es detectada cuando se manifiesta un problema de salud. A menudo es difícil precisar el origen de la contaminación, debido a que puede provenir de muchas fuentes. La entrada de los nitratos a las aguas subterráneas es un resultado de procesos naturales y del efecto directo o indirecto de las actividades humanas. Los procesos naturales incluyen la precipitación, el intemperismo de los minerales y descomposición de la materia orgánica. Los nitratos provenientes de las actividades humanas incluyen: la escorrentía de terrenos cultivados, efluentes de lagunas y tanques sépticos, fertilización excesiva con nitrógeno, deforestación y el cambio en la materia orgánica del suelo como resultado de la rotación de cultivos (Heaton, 1985).

En el ambiente, el nitrito (NO_2^-) generalmente se convierte a nitrato fácilmente (NO_3^-), lo que significa que el nitrito raramente está presente en aguas subterráneas. El nitrato es esencial en el crecimiento de las plantas. Por esta razón su uso predominante es como fertilizante y se produce en grandes cantidades industrialmente. En relación con la ingesta de nitratos y sus posibles consecuencias para el ser humano como tal, un exceso de estos iones en el agua potable causa metahemoglobinemia, una enfermedad que principalmente se manifiesta en bebés de hasta 6 meses de edad y causa la disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de los glóbulos rojos; como consecuencia inmediata de ello, ocasiona una disminución del oxígeno en los órganos y tejidos de todo el cuerpo, con daños en ellos e, incluso, la muerte. (Ávila, J. P., & Sansores, 2003)

2.3.2 CARBONATO Y BICARBONATO.

Los carbonatos y bicarbonatos (CO_3^{2-} , y HCO_3^-), suelen ser los aniones dominantes en muchos sistemas acuíferos, especialmente en aquellos donde la meteorización de rocas carbonatadas es prevalente (Jiang *et al.*, 2020).

La concentración de bicarbonato, que varía significativamente según la litología, es un indicador clave de la influencia de las unidades de piedra caliza (Cauch-Kau *et al.*, 2022).

En estudios realizados, el ión bicarbonato (HCO_3^-) ha demostrado ser el anión más abundante, con promedios de hasta 333 mg L^{-1} , superando a Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- (Scheiber *et al.*, 2022).

El carbonato de calcio, la dolomita, sal doble de carbonato de calcio, cloruros, sulfatos, nitratos y carbonato de magnesio, se encuentran comúnmente en la superficie de la tierra en ciertos sectores y a menudo penetran en los suministros de agua, por lo que el agua adquiere un alto contenido de iones calcio y magnesio. El carbonato de calcio es insoluble en agua, pero en presencia de anhídrido carbónico, proveniente de la atmósfera, se transforma en bicarbonato de calcio. El bicarbonato de calcio en solución acuosa se encuentra como los iones Ca^{2+} y como bicarbonato, HCO_3^- . La presencia de una gran cantidad de los iones Mg^{2+} y Ca^{2+} determina que esta agua sea calificada como agua dura (K), que puede distinguirse según su dureza temporal o su dureza permanente. El grado de dureza no afecta a la salud de las personas, pero sí a los procesos de lavados, ya que no deja que se forme espuma por parte de los jabones, y producen costras en las calderas por efecto de las elevadas temperaturas. Cuando la dureza es temporal o también llamada dureza de carbonatos, los iones calcio y magnesio se encuentran en forma de bicarbonatos de calcio y magnesio. En el caso de la dureza permanente o dureza de no carbonatos (solo se puede llegar a ablandar el agua, no quitar la dureza por completo) los iones calcio y magnesio están como sales de sulfato de calcio y sulfato de magnesio. Esta dureza del agua se puede

“eliminar” mediante resinas de intercambio iónico (este proceso el agua pasa por unos cilindros que contienen una resina capaz de absorber los iones metálicos y se liberan iones de sodio en el agua), no se puede el método de ebullición; otro método alternativo es la adición de carbonato de sodio, con lo que se logra la precipitación del carbonato de calcio y luego filtrar el agua (Cuadro 1) (Valenzuela, L. C. 2014).

Cuadro 1. Clasificación del Carbonato de Calcio.

Concentraciones de carbonato de calcio Mg/L	Tipo de agua
0-75	Agua blanda
75-150	Agua poco dura
150-300	Agua dura
Sobre 300	Agua muy dura

2.3.3 SULFATOS.

Los sulfatos pueden tener su origen en que las aguas atraviesen terrenos ricos en yesos, o a la contaminación con aguas residuales industriales. El contenido de este no suele presentar problemas de potabilidad para las aguas de consumo, pero, contenidos superiores a 300 mg/L pueden causar trastornos gastrointestinales en los niños.

Su afectación en el ser humano tiene que ver principalmente con el efecto laxante que surge al ingerir una alta concentración de sulfato de sodio y sulfato de magnesio, en el orden de más de 100 mg/L; además, los sulfatos en concentraciones superiores a los 200 mg/L favorecen la corrosión de los metales y cambian el sabor al agua (en menor medida que los cloruros y carbonatos), lo que también incrementa la cantidad de plomo disuelto, proveniente de las tuberías de plomo. En el organismo humano provocan como efecto secundario deshidratación, la cual es muy común después de una ingestión de más de cinco gramos al día de dichas sales, producto de un cuadro diarreico, el cual es más crítico en niños y adultos mayores (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017).

2.3.4. CLORURO

El ión cloruro es uno de los iones inorgánicos que se encuentran en mayor cantidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, su presencia es necesaria en aguas potables. En agua potable, el sabor salado producido por la concentración de cloruros es variable. En algunas aguas conteniendo 25 mg Cl⁻/L se puede detectar el sabor salado si el catión es sodio. Por otra parte, éste puede estar ausente en aguas conteniendo hasta 1g Cl⁻/L cuando los cationes que predominan son calcio y magnesio. Un alto contenido de cloruros puede dañar estructuras metálicas y evitar el crecimiento de plantas. Las altas concentraciones de cloruro en aguas residuales, cuando éstas son utilizadas para el riego en campos agrícolas deteriora, en forma importante la calidad del suelo. Es entonces importante el poder determinar la concentración de cloruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas en un amplio intervalo de concentraciones (Aguilar, 2014).

2.3.5 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE ANIONES.

El estudio de aniones en los acuíferos mexicanos es clave para comprender su composición química y sus efectos en la salud y la gestión del agua. Altas concentraciones de nitratos pueden indicar contaminación agrícola, afectar el riego y reducir el rendimiento de cultivos, además de representar un riesgo para la salud, especialmente en niños, al favorecer la formación de compuestos potencialmente cancerígenos (Navas *et al.*, 2021).

La exposición prolongada a altos niveles de nitrato también se ha vinculado a otras afecciones como enfermedades tiroideas, hipertensión y diabetes (Roy *et al.*, 2023).

En lo industrial los aniones afectan de diversas maneras la maquinaria y los procesos, como la corrosión o la formación de incrustaciones, afectando la eficiencia operativa y la vida útil de los equipos (Giri *et al.*, 2025).

Por tanto, un conocimiento detallado de la distribución y las concentraciones de estos aniones es indispensable para implementar estrategias de mitigación efectivas y garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos en México (Mamun, 2025).

para lograr esto es crucial realizar monitoreos continuos de estos aniones en diversas fuentes de agua subterránea, empleando metodologías analíticas robustas que permitan su cuantificación precisa (Mostafa *et al.*, 2024).

2.4 IMPACTO DE LAS CONCENTRACIONES ANIÓNICAS EN LA POTABILIDAD, PARA RIEGO Y CORROSIVIDAD DEL AGUA EN LA INDUSTRIA MEXICANA.

La evaluación de estas concentraciones es esencial para determinar si el agua es segura para el consumo humano, adecuada para las demandas agrícolas y no corrosiva para los sistemas industriales, aspectos fundamentales para el desarrollo sostenible del país (Pino *et al.*, 2021).

Este análisis cobra particular relevancia en regiones como México, donde la diversidad geográfica y las actividades socioeconómicas generan una amplia variabilidad en la calidad del agua, haciendo indispensable el estudio detallado de sus componentes aniónicos (Roy *et al.*, 2023).

La concentración de aniones específicos como cloruros, sulfatos y bicarbonatos, influye directamente en las propiedades fisicoquímicas del agua, afectando su potabilidad, idoneidad para el riego y su potencial corrosivo en infraestructura industrial (Sanchis *et al.*, 2020).

Por ejemplo, niveles elevados de iones cloruro y sulfato pueden comprometer los rendimientos de los cultivos y la integridad de las infraestructuras hídricas, mientras que concentraciones de sodio y calcio pueden inducir la degradación del suelo y la formación de incrustaciones (Namadi y Sandhu, 2023).

El efecto del cloro en la agricultura mexicana es particularmente relevante en zonas áridas y semiáridas, donde la calidad del agua de riego es crítica para la producción agrícola (Peinado-Guevara *et al.*, 2012).

2.4.1 NORMAS DE REGULACIÓN DE LOS ANIONES EN LAS AGUAS DE LOS ACUÍFEROS DE MÉXICO.

En México, el agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo de todos los sectores, debido a que en más de 50% de su territorio prevalecen los climas seco y semisecos. Actualmente, el subsuelo es la fuente que sostiene el riego de unos dos millones de hectáreas, la tercera parte de la superficie total bajo riego; suministra cerca de 70% del volumen de agua que requieren las ciudades para uso público-urbano, en donde se concentran unos 60 millones de habitantes; abastece a la mayoría de las instalaciones industriales, y satisface casi la totalidad de las demandas de agua de la población rural. La cuantiosa reserva de agua almacenada en los acuíferos regionales, es un recurso valioso que ha propiciado el desarrollo de las zonas áridas y que permite compensar las variaciones estacionales de la precipitación pluvial y del escurrimiento superficial, especialmente durante las sequías cíclicas naturales que afectan algunas regiones de nuestro país. (DOF, 2021).

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es fundamental para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas con el agua, para lo cual se requiere establecer y mantener actualizados los límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas, y radiactivas, con el fin de asegurar y preservar la calidad del agua que se entrega al consumidor por los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados. Por tales razones la Secretaría de Salud, propone la emisión de la Norma Oficial Mexicana nom-127-ssa1-2000, con la finalidad de establecer un eficaz control sanitario del agua que se somete a tratamientos de potabilización a efecto de hacerla apta para uso y consumo humano, acorde a las necesidades actuales. (DOF, 2000).

2.4.2 ESPECIFICACIONES SANITARIAS

El agua para uso y consumo humano de los sistemas de abastecimiento debe cumplir con las siguientes especificaciones.

El agua de los sistemas de abastecimiento no debe tener como fuente de abastecimiento agua residual tratada (Cuadro 2) (Conagua, 2003).

Cuadro 2. Límites Permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas.

PARAMETROS	LIMITES PERMISIBLES	UNIDADES	NORMAS
NITRATOS (NO ₃)	10.00	Mg/L	NOM-127-SSA1-2021
SULFATOS (SO ₄)	400.00	Mg/L	NOM-127-SSA1-2000
CLORUROS (CL)	250.00	Mg/L	NOM-014-CONAGUA 2003
CARBONATOS (HCO ₃)	300.00	Mg/L	NOM-014-CONAGUA 2003
BICARBONATOS (CO ₃)*		Mg/L	

*En el caso de el ion bicarbonato aún no se encuentra con los límites permisibles por las Normas Oficiales Mexicanas.

El hecho de poner los límites permisibles y las clasificaciones de los iones en las aguas subterráneas es de prioridad para los seres vivos, lo agrícola e industrial.

2.5 EFECTO DE LOS IONES EN LA TUBERIA INDUSTRIAL.

En México no se cuenta con una norma oficial mexicana que regule los iones en las tuberías industriales esto debido que es poco el porcentaje de agua que se destina al uso industrial en México. Pero se pueden ver los efectos que los iones ocasionan en las tuberías de las industrias mexicanas.

Pero si se puede contar con un límite requerido que las industrias controlan, los iones no pueden repasar por la afectación que se pueden provocar en las tuberías industriales.

En la industria se cuentan con tuberías de aceros inoxidable y acero al carbono, estos materiales son los más usados en la industria por su alta durabilidad ante las sales en altas concentraciones, los iones que más afectan en corrosión son los iones de cloro y sulfato.

2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIVIDAD DEL CLORO.

La influencia clave de la concentración de iones de cloruro en el tratamiento del agua en la selección del material de acero inoxidable radica en el poder destructivo de los iones de cloruro.

Los iones de cloruro son extremadamente penetrantes y activadores en soluciones acuosas. Representan una grave amenaza para la película pasiva del acero inoxidable, causando principalmente de picaduras que corroen.

Picaduras: Los iones de cloruro se adsorben en los puntos más débiles de la película pasiva (como inclusiones, rayones y la zona de soldadura afectada por el calor), destruyéndola localmente y formando una pequeña zona anódica (picadura de corrosión), mientras que la zona circundante, más grande, de la película pasiva actúa como cátodo. Esta pequeña celda de corrosión, compuesta por un ánodo y un cátodo, impulsa la picadura a propagarse rápida y profundamente en el metal, lo que finalmente provoca la perforación.

La resistencia del acero inoxidable a la corrosión por iones de cloruro no varía linealmente; existen umbrales de concentración críticos por encima de los cuales los aceros inoxidables de uso común fallan rápidamente. Las recomendaciones para la selección de materiales se basan en el rango de concentración de iones de cloruro.

1. Rango de concentración bajo ($\text{Cl}^- < 200$ ppm y temperatura < 60 °C).

En las tuberías industriales los aceros 304 y 304L son opciones económicas para la conducción de agua en industrias. Incluso en estas concentraciones, el aumento de temperatura incrementa significativamente el riesgo de picaduras y SCC (Stress Corrosión Cracking, lo que en español se traduce como Agrietamiento por Corrosión Bajo Tensión). Se requiere extrema precaución por encima de 50 °C. Los iones de cloruro se concentran fácilmente en zonas estancadas, como juntas de bridas y conexiones roscadas, lo que puede causar corrosión por grietas grave incluso a bajas concentraciones. El acero 304/304L es

sensible a esto. Los iones de cloruro se acumulan y concentran fácilmente en zonas de flujo de agua estancada (como fondos de tanques y callejones sin salida), lo que aumenta el riesgo.

2. Rango de concentración media ($200 \text{ ppm} \leq \text{Cl}^- \leq 1500 \text{ ppm}$).

Material principal: el 316/316L (Acero inoxidable) es el estándar. Su principal ventaja reside en la adición de un 2-3 % de molibdeno. El molibdeno mejora significativamente la estabilidad de la película pasiva, especialmente en entornos con cloruro. Inhibe eficazmente la nucleación y propagación de la corrosión por picaduras y aumenta el potencial de picaduras.

Puntos críticos y riesgos:

1500 ppm es un umbral crítico, generalmente considerado el límite superior para el acero inoxidable 316L (especialmente a temperatura ambiente). Por encima de esta concentración, el riesgo aumenta drásticamente.

60 °C es otro umbral crítico. Por encima de esta temperatura, incluso con concentraciones de Cl^- inferiores a 1500 ppm, el riesgo de picaduras y SCC en el acero 316L aumenta significativamente. Se requiere extrema precaución por encima de 70 °C.

Riesgo de fluctuación del proceso: La concentración o la temperatura de Cl^- pueden aumentar inesperadamente durante el funcionamiento del sistema (p. ej., debido a cambios en el agua cruda o fugas en el intercambiador de calor). Se deben considerar márgenes de seguridad durante el diseño.

3. Rango de alta concentración ($\text{Cl}^- > 1500 \text{ ppm}$ y/o temperatura $> 60 \text{ °C}$)

Alto riesgo de falla del acero 316/L: En estas condiciones, la formación de picaduras y la SCC en el acero 316/L son casi inevitables; es solo cuestión de tiempo. Considere aceros inoxidables súper austeníticos como el 904L, el 254 SMO y el AL-6XN; y aceros inoxidables dúplex como el 2205 y el 2507.

Estas aleaciones son significativamente más caras que las 304/316, por lo que su selección requiere una justificación exhaustiva. El aporte de calor de soldadura y

la temperatura entre pasadas deben controlarse estrictamente para mantener el equilibrio de fases y la resistencia a la corrosión. Incluso estos grados avanzados tienen limitaciones de temperatura.

4. Concentraciones extremadamente altas/Ambientes hostiles.

Límites dúplex/súper austeníticos (Acero más común industrial) avanzados: el acero 2507, el acero súper dúplex o los súper austeníticos (por ejemplo, 654 SMO) pueden ser adecuados en determinadas condiciones, pero se requiere extrema precaución.

Aleaciones a base de níquel o titanio: Cuando el acero inoxidable falla, se debe considerar el Hastelloy (Aleación de níquel) o el titanio. Ofrecen una resistencia inigualable a la corrosión por iones de cloruro, pero son extremadamente costosos.

Los materiales no metálicos, como fibra de vidrio, CPVC, PVDF y revestimientos de plástico/caucho, son alternativas rentables, especialmente adecuadas para tuberías y tanques de almacenamiento de presión normal o baja. (Jmfiltec. 2025).

2.5.4 EL IMPACTO DE LA CONCENTRACIÓN DEL CLORURO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA EN ACERO INOXIDABLE.

La presencia de iones cloruro y sulfato ha sido especialmente estudiada en las investigaciones de la corrosión, debido a que es muy común encontrar a dichos iones en el medio que se encuentra en contacto con materiales metálicos. Particularmente, el papel de dichos iones ha sido relevante en el estudio y caracterización del fenómeno corrosión por picaduras, tanto en acero inoxidable como en cobre.

La ruptura de las capas pasivas que se forman en la superficie de los metales antes enunciados permite que ocurra un mecanismo de acidificación local en la superficie, produciendo las citadas picaduras y afectadas de diferente manera por la presencia de cantidades variadas en los iones cloruro y sulfato. En el estudio de las picaduras formadas en cobre, se debe que los iones sulfato tienen una tendencia a corroer más agresivamente al sustrato que los iones cloro. El único

ion que se puede clasificar con límites permisibles para prever la oxidación y corrosión de las tuberías es el anión del cloro que cuenta con las clasificación en condiciones de temperaturas precisas (Zepeda, f. m. 2008).

2.6 CALIDAD DEL AGUA DE LOS ACUÍFEROS PARA USO AGRÍCOLA

La calidad del agua de riego es un factor crítico para la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones áridas y semiáridas donde la disponibilidad de agua dulce es limitada y se recurre a fuentes de menor calidad (Ezlit, 2009., Sousa *et al.*, 2017).

El uso de aguas con alta concentración salina, particularmente de sodio, puede afectar negativamente tanto el rendimiento de los cultivos como la salud del suelo a largo plazo (García & Verón, 2020).

Específicamente, la relación de adsorción de sodio en el agua de riego es un indicador clave que influye en la estabilidad estructural del suelo, la infiltración del agua y la eficiencia de la aplicación del riego (Emdad *et al.*, 2004., Schaeffer *et al.*, 2018).

Un exceso de sodio puede comprometer las propiedades físicas del suelo, llevando a la dispersión de arcillas, reducción de la conductividad hidráulica, y formación de costras superficiales, lo que a su vez disminuye la capacidad de infiltración del agua (Suarez *et al.*, 2006., Bahadori *et al.*, 2012).

La gestión adecuada de la calidad del agua es un factor crítico para la sostenibilidad de la agricultura, influyendo directamente en la salud de los cultivos, la productividad del suelo y la viabilidad económica de las explotaciones agrícolas. Particularmente, la concentración iónica en los acuíferos subterráneos representa un aspecto fundamental que debe ser monitoreado y controlado rigurosamente para prevenir impactos negativos en los ecosistemas agrícola.

Para determinar la calidad de agua en el uso agrícola existen muchos métodos, pero el que nos lleva a mas tipos de aguas es el porcentaje de sodio intercambiable.

2.6.1 CLASIFICACIÓN DEL POR CIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE.

La importancia de este proceso radica en el efecto dispersante que tiene el sodio al ser intercambiado por los coloides del suelo, debido a su elevado radio de hidratación.

Cuando un suelo sufre dispersión por efecto del Na, su estructura, la ordenación espacial de las partículas del suelo, se ve alterada con diferentes grados de intensidad, sellándose total o parcialmente la superficie del suelo a la infiltración del agua de riego e impidiendo el intercambio gaseoso entre la atmósfera y el perfil del suelo.

Se desarrollan en consecuencia condiciones inapropiadas para el adecuado desarrollo del sistema radicular de las plantas, afectándose el rendimiento de los cultivos.

Por tratarse de un proceso de intercambio catiónico entre las arcillas del suelo y los iones disueltos en el agua que fluye en el perfil del suelo, el peligro de sodificación queda determinado por la relación entre el sodio y iones divalentes, expresada en un índice conocido como relación de adsorción de sodio o RAS, expresado así:

Ecuación 1:

$$RAS = \frac{Na}{\frac{\sqrt{(Ca+Mg)}}{2}}$$

Donde Na, Ca²⁺ y Mg²⁺ representan las concentraciones en miliequivalentes por litro de los iones respectivos.

La clasificación de las aguas de riego con respecto a la RAS se basa principalmente en el efecto que tiene el sodio intercambiable sobre la condición física del suelo.

No obstante, las plantas sensibles a este elemento pueden sufrir daños a consecuencia de la acumulación del sodio en sus tejidos cuando los valores de sodio intercambiable son más bajos que los necesarios para deteriorar la condición física del suelo.

2.6.2 FACTOR DE DECISIÓN EN LAS AGUAS DE RIEGO

A. CONDUCTIVIDAD

1. Agua de baja salinidad (C1): puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos, en casi cualquier tipo de suelo, con muy poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. Se necesita algún lavado, pero éste se logra en condiciones normales de riego, excepto en suelos de muy baja permeabilidad.

2. Agua de salinidad media (C2); puede usarse siempre que haya un cierto grado de lavado, en casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

3. Agua altamente salina (C3); no puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas de control de la salinidad, debiendo por lo tanto seleccionarse únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.

4. Agua muy altamente salina (C4); no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias; puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables y el drenaje adecuado, debiendo aplicarse exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso se debe seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

B. SODIO

1. Agua baja en sodio (S1); puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. No obstante, los cultivos sensibles, como algunos frutales y aguacates, pueden acumular cantidad perjudiciales de sodio.

2. Agua media en sodio (S2); en suelos de textura fina de sodio presenta un peligro considerable, más aún si dichos suelos poseen una alta capacidad de intercambio de cationes especialmente bajo condiciones de lavado deficiente, a menos que el suelo contenga yeso. Estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa o en suelos orgánicos de buena permeabilidad.

3. Agua alta en sodio (S3); puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que estos necesitarán prácticas especiales de manejo, buen drenaje, fácil lavado y adiciones de materia orgánica. Los suelos yesíferos pueden no desarrollar niveles perjudiciales de sodio intercambiable cuando se riegan con este tipo de aguas. Puede requerirse el uso de mejoradores químicos para sustituir al sodio intercambiable; sin embargo, tales mejoradores no serán económicos si se usan aguas de muy alta salinidad.

4. Agua muy alta en sodio (S4); es inadecuada para riego excepto cuando su salinidad es media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejorado hace antieconómico su empleo.

Ocasionalmente el agua de riego puede disolver un buen porcentaje de calcio en los calcáreos de tal manera que disminuye notablemente el peligro por sodio, condición que de tenerse muy en cuenta en el caso de usar agua de las clases C1-S3 y C1-S4.

Tratándose de suelos calcáreos de pH alto o de suelos que no son calcáreos el estado de las aguas C1-S3, C1-S4, C2-S4 se puede modificar ventajosamente agregando yeso al agua; igual manera es conveniente aplicar yeso al suelo

periódicamente cuando vaya a regar, aguas C2-S3 y C3-S2. Todas las clasificaciones de las aguas se muestran en la Figura 1(USDA, 1954).

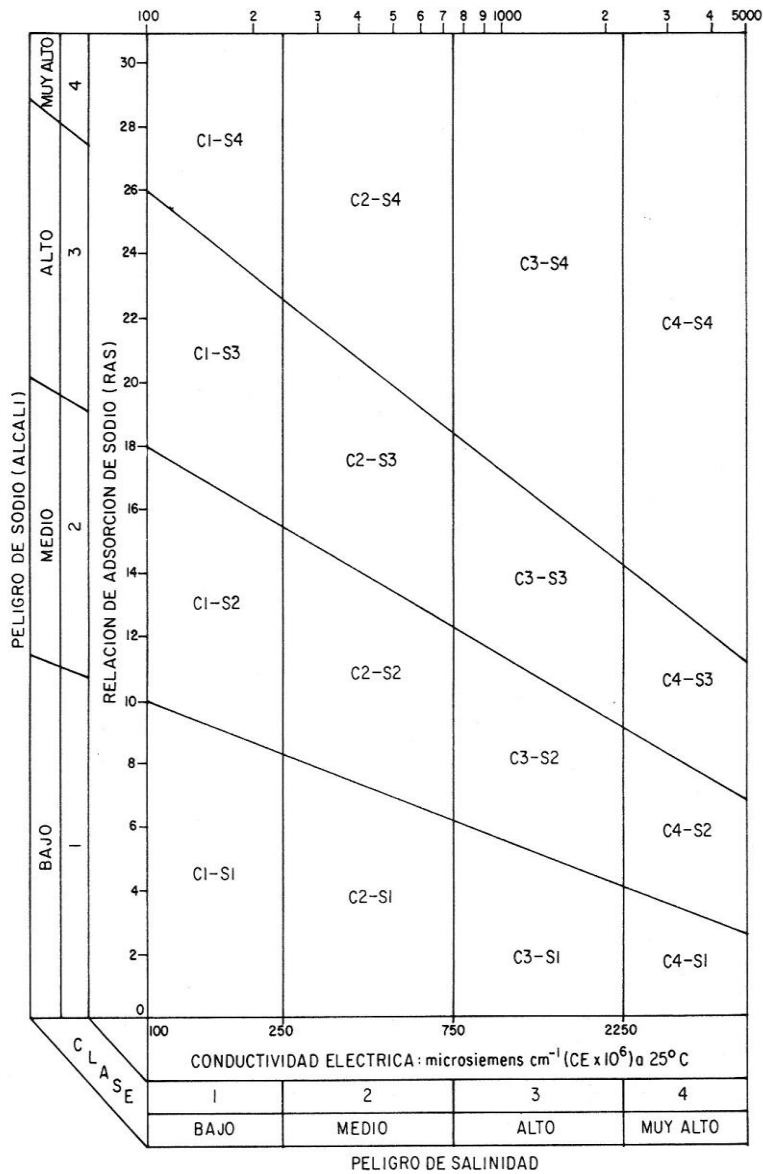


Figura 1. Diagrama de clasificación del agua de riego (Manual 60, USDA).

Para calcular la calidad de agua de riego es necesario usar los cationes y así clasificar las salinidades y la sodicidad.

Otra forma de poder calcular la calidad de agua para riego es usando los aniones, es el carbonato de sodio residual que usa los aniones carbono y bicarbonato y los cationes calcio y magnesio.

2.7 CARBONATO DE SODIO RESIDUAL.

El cálculo de carbonato sódico residual (RSC) se emplea para predecir la tendencia del calcio y magnesio a precipitar en el suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas. Cuando esto ocurre, aumentara la proporción relativa de sodio presente en el suelo, es decir, aumentara el valor de SAR y, por tanto, el riesgo de sodificación del suelo, a pesar de que la cantidad presente de sodio no ha variado.

Desde los inicios de estudios sobre la calidad de aguas superficiales y subterráneas para riego, se observó experimentalmente que los distintos tipos de aguas se infiltraban de manera diferente en los suelos agrícolas bajo riego; y como consecuencia de estas observaciones, se estableció que sus variadas composiciones químicas afectaban las propiedades físicas de los suelos, de manera diferente. Por lo que en esos tiempos se mencionaba que aguas duras hacían suelos blandos y aguas blandas hacían suelos duros. Hoy se sabe que las aguas blandas, ricas en bicarbonato de sodio propician considerablemente la acumulación de sodio intercambiable en los suelos.

Las aguas de baja calidad han sido usadas para riego en muchas regiones áridas y semiáridas, debido a la ausencia de fuentes limitadas de aguas de buena calidad. A veces las aguas subterráneas que están disponibles para el riego, tienen altos contenidos de carbonato de sodio residual. El uso indiscriminado de estas aguas en la irrigación a veces causa una acumulación excesiva de sales, y conduce a una rápida salinización y sodificación del perfil del suelo, procesos que afectan adversamente el desarrollo de cultivos.

Cuando en los suelos sódicos se incrementa el sodio intercambiable, conduce a deficiencias de calcio y magnesio.

La precipitación de Ca y Mg en forma de carbonatos de calcio y de magnesio, propician una acumulación considerable de sodio

carbonato de sodio residual, para evaluar las aguas de riego que tienen cantidades considerables de carbonatos y bicarbonatos.

Utiliza tres términos para referirse a estas reacciones: Porcentaje de sodio encontrado.

$$\frac{\text{Na}}{\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2 + \text{Na}}$$

Porcentaje de sodio posible.

$$\frac{\text{Na} + 100}{(\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2 + \text{Na}) - (\text{CO}_2 + \text{HCO}_3)}$$

Carbonato de Sodio residual Na_2CO_3 .

$$(\text{CO}_2 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2)$$

Los constituyentes iónicos en estas relaciones se expresan en miliequivalentes por litro.

El carbonato de sodio residual se calcula de acuerdo con la siguiente relación:

$$\text{CSR} = (\text{CO}_2 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca}^2 + \text{Mg}^2)$$

Dónde: los iones en estas relaciones se expresan en miliequivalentes por litro (Cuadro 3).

Cuadro 3. Clasificación de las aguas de riego, de acuerdo con el carbonato de sodio residual.

Clase	Carbonato de Sodio Residual (meq/L)
Buena	< 1.25
Condicionada	1.25 a 2.5
No recomendable	> 2.5

Se han utilizado para riego aguas de pozos profundos y aguas residuales con valores de carbonato de sodio residual más altos.

Esto es debido a que, en la actualidad, prácticamente se han utilizado en el riego de cultivos, todo tipo de aguas de la más variada composición química.

Las aguas que contienen $CSR > 2.5$ Meq/L han sido consideradas como insatisfactorias para riego (Puñales, T. T., & Aguilar, C. B, 2016).

III MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1 LOCALIZACIÓN.

La zona de estudio se encuentra al Sur del Estado de Coahuila, colindando al este con el Estado de Nuevo León y al sur con el Estado de Zacatecas, donde se encuentran los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe, General Cepeda y Arteaga, como se observa en la figura 2.

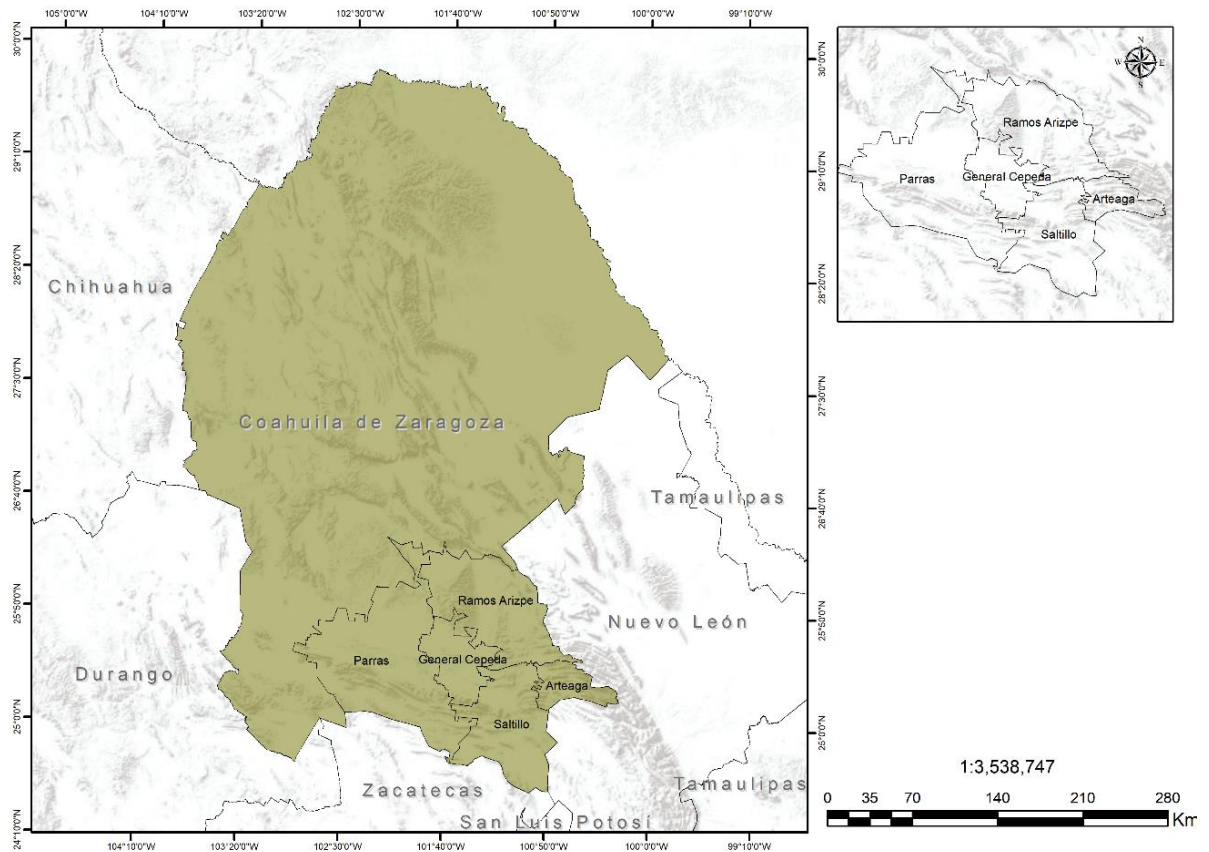


Figura 2. Localización del área de estudio. Elaboración propia.

La localización de la zona de estudio cuenta con cuatro municipios, cada uno con diferentes tipos de climas, suelo, hidrografía, flora, fauna y con una extensión territorial como se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Municipios del área de estudio en Coahuila de Zaragoza y su extensión territorial.

Municipio	Extensión territorial (k ²)
ARTEAGA	1,818.60
SALTILLO	6,837
GENERAL CEPEDA	3,517
RAMOS ARIZPE.	5,306.6

La zona de estudio corresponde a los pozos de monitoreo y aprovechamiento administrados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), localizados en la región Sureste del Estado de Coahuila, México. Esta región forma parte de una de las zonas con mayor presión sobre los recursos hídricos subterráneos del Estado (Figura 3).

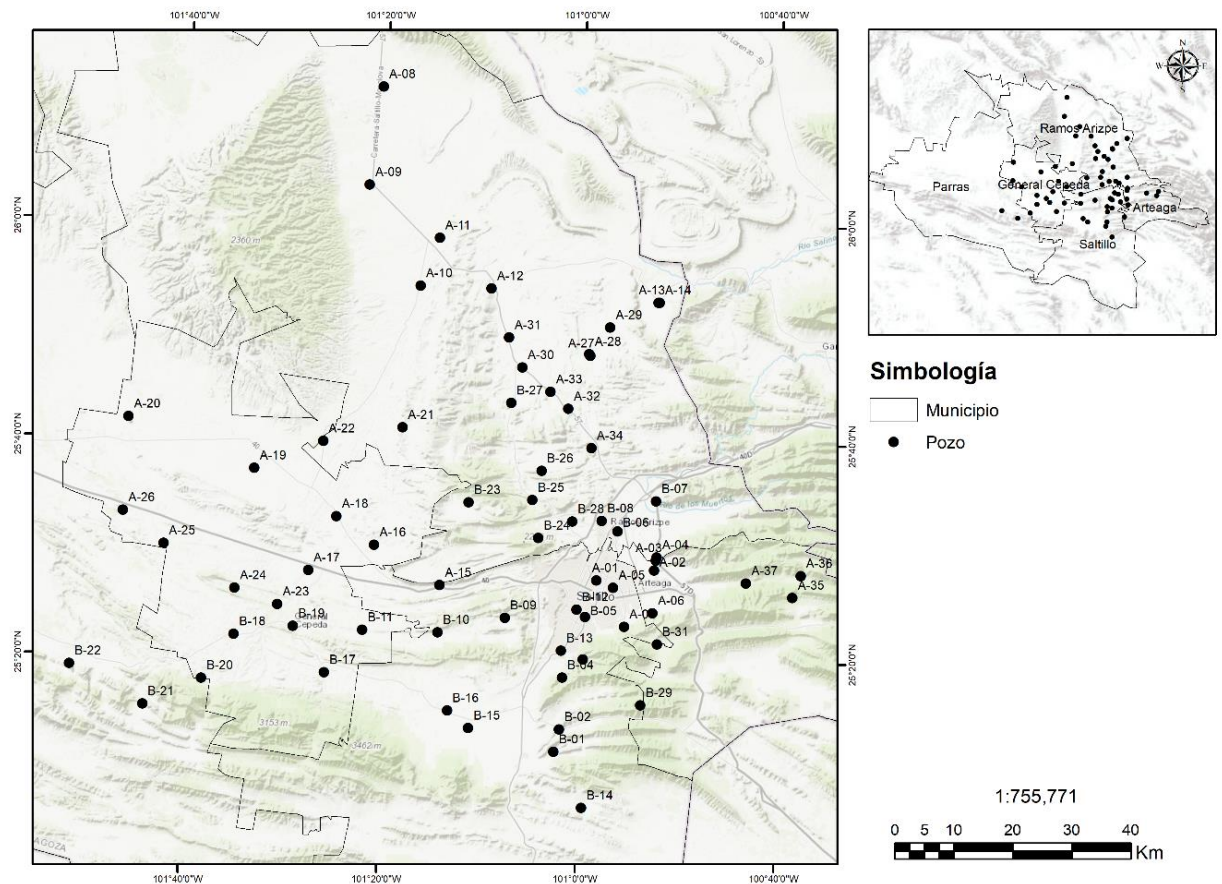


Figura 3. Localización de los pozos en la zona de estudio. Elaboración propia.

3.2 SOFTWARE ARCMAP 10.5.

ArcMap es un software donde se visualiza y explora los dataset SIG (sistema de información geográfica) de su área de estudio, donde asigna símbolos y donde crea los diseños de mapa para imprimir o publicar. ArcMap representa la información geográfica como una colección de capas y otros elementos en un mapa. Los elementos de mapa comunes son el marco de datos, que contiene las capas de mapa para una extensión determinada, más la barra de escala, la flecha de norte, el título, texto descriptivo o una leyenda de símbolos (ESRI, 2025).

3.2.1 TAREAS HABITUALES EN ARCMAP 10.5.

- Trabajar con mapas.
- Imprimir mapas.
- Compilar y editar datasets.
- Usar el procesamiento para automatizar el trabajo y realizar análisis.
- Organizar y administrar geodatabases y documentos de ArcGIS.
- Publicar documentos de mapa como servicios de mapas.
- Compartir mapas, capas, modelos de geoprocésamiento y geodatabases con otros usuarios.
- Documentar la información geográfica.
- Personalizar la experiencia del usuario.

3.2.2 DATOS

Se contó con una base de datos proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) de los pozos ubicados en los municipios de Saltillo, Arteaga, Ramos Arizpe y General Cepeda, la cual incluye sus coordenadas geográficas y UTM, así como diversos parámetros físicos y las concentraciones de aniones, como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Coordenadas en UTM de los pozos con los datos de los aniones.

Pozo	UTM	UTM	Municipio	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
------	-----	-----	-----------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-----------------	------------------------------

	Longitud X	Latitud Y		(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
A-01	301893	2817110	Saltillo	167.29	409.57	19.69	83.95	9.36
A-02	311682	2818794	Arteaga	257.10	186.26	17.72	49.61	11.84
A-03	311986	2820449	Ramos Arizpe	184.47	259.36	12.80	33.85	10.60
A-04	312156	2820990	Ramos Arizpe	191.26	269.38	8.86	42.31	9.48
A-05	304760	2815852	Saltillo	180.54	343.44	10.46	80.03	30.86
A-06	311433	2811514	Arteaga	99.37	172.90	15.79	27.49	2.79
A-07	306596	2809233	Saltillo	63.38	226.38	17.12	21.72	2.79
A-08	265901	2900809	Ramos Arizpe	449.40	196.39	19.03	116.63	135.71
A-09	263526	2884194	Ramos Arizpe	143.20	412.89	19.51	48.92	46.35
A-10	272144	2867059	Ramos Arizpe	578.20	417.94	14.27	75.73	0.50
A-11	275409	2875162	Ramos Arizpe	1165.31	367.53	11.15	230.71	62.47
A-12	284181	2866580	Ramos Arizpe	753.80	197.36	28.54	701.53	3.84
A-13	312484	2864127	Ramos Arizpe	1205.20	185.75	38.05	528.35	4.03
A-14	312666	2864145	Ramos Arizpe	1393.73	194.71	27.87	682.82	12.95
A-15	275346	2816332	Saltillo	809.40	160.60	15.22	30.53	1.30
A-16	264251	2823169	General Cepeda	117.32	242.63	22.27	36.10	30.37
A-17	253107	2818856	General Cepeda	185.32	234.54	21.47	79.64	13.76
A-18	257864	2827991	General Cepeda	824.39	241.01	7.95	99.02	31.11
A-19	243964	2836202	General Cepeda	830.40	235.35	7.95	101.17	83.29
A-20	222642	2845000	General Cepeda	607.20	332.40	29.42	112.91	36.44
A-21	269085	2843055	Ramos Arizpe	222.10	201.38	27.83	34.42	12.08
A-22	255629	2840762	Ramos Arizpe	24.34	80.07	4.77	8.68	5.45
A-23	247845	2813111	General Cepeda	289.20	262.85	8.75	24.42	16.98
A-24	240605	2815893	General Cepeda	1247.60	160.13	8.75	60.92	13.08
A-25	228580	2823465	General Cepeda	627.80	165.80	12.72	211.98	109.81
A-26	221683	2829103	General Cepeda	361.40	291.15	30.22	52.05	20.26
A-27	300900	2855140	Ramos Arizpe	1379.60	323.50	10.34	311.18	75.11
A-28	300738	2855432	Ramos Arizpe	378.90	395.48	15.90	149.74	15.55
A-29	304285	2859958	Ramos Arizpe	625.80	224.03	11.13	131.83	56.52
A-30	289380	2853187	Ramos Arizpe	516.40	151.24	19.88	128.62	303.96
A-31	287143	2858296	Ramos Arizpe	735.50	183.59	8.75	178.60	3.10
A-32	297169	2846185	Ramos Arizpe	671.20	287.11	7.95	230.84	109.32
A-33	294147	2849069	Ramos Arizpe	822.40	226.45	9.54	303.64	127.91
A-34	301090	2839509	Ramos Arizpe	331.50	492.53	7.95	157.85	0.43
A-35	335139	2814144	Arteaga	111.96	321.08	7.95	22.07	0.31
A-36	336557	2817831	Arteaga	32.32	232.11	17.50	21.22	21.07
A-37	327269	2816595	Arteaga	29.54	225.64	19.88	23.10	0.00
B-01	294626	2788086	Saltillo	14.06	290.40	14.94	18.34	3.97
B-02	295586	2791834	Saltillo	17.15	248.19	24.07	12.16	4.71
B-03	299614	2803705	Saltillo	19.99	237.21	16.60	10.17	1.61

B-04	296102	2800616	Saltillo	10.96	192.47	29.88	4.47	4.40
B-05	299991	2810900	Saltillo	72.30	243.64	16.94	50.45	41.46
B-06	305502	2825406	Ramos Arizpe	535.00	172.27	11.29	86.08	16.55
B-07	312053	2830473	Ramos Arizpe	548.19	172.27	8.07	27.93	1.12
B-08	302846	2827155	Ramos Arizpe	834.00	344.54	9.68	462.68	126.42
B-09	286406	2810779	Saltillo	624.40	202.62	11.29	162.46	57.63
B-10	274998	2808327	Saltillo	626.40	147.66	12.10	114.39	40.90
B-11	262242	2808762	General Cepeda	605.59	123.87	12.91	189.06	55.22
B-12	298577	2812180	Saltillo	48.76	239.54	8.87	41.33	32.10
B-13	295923	2805185	Saltillo	59.66	242.00	8.07	23.66	12.33
B-14	299346	2778553	Saltillo	682.19	207.54	8.07	34.58	6.51
B-15	280191	2792082	Saltillo	121.88	193.60	12.10	54.53	29.19
B-16	276615	2795060	Saltillo	80.84	201.80	17.75	56.62	36.81
B-17	255754	2801530	General Cepeda	91.96	463.49	74.21	16.63	0.00
B-18	240457	2808054	General Cepeda	371.51	297.99	6.64	61.28	79.01
B-19	250471	2809427	General Cepeda	383.80	252.55	10.79	88.26	50.38
B-20	234926	2800641	General Cepeda	42.14	270.14	9.96	8.08	10.29
B-21	224966	2796291	Parras	27.80	258.32	10.79	18.34	2.91
B-22	212562	2803116	Parras	39.55	243.97	19.09	11.40	1.55
B-23	280295	2830358	Ramos Arizpe	1005.20	156.17	22.41	21.66	1.55
B-24	292081	2824292	Ramos Arizpe	111.20	218.06	21.58	22.33	2.91
B-25	291083	2830711	Ramos Arizpe	16.28	137.60	0.00	7.89	4.96
B-26	292634	2835653	Ramos Arizpe	175.30	285.33	9.13	24.99	11.15
B-27	287500	2847199	Ramos Arizpe	377.40	256.63	11.62	101.47	132.62
B-28	297859	2827095	Ramos Arizpe	306.80	257.47	8.30	53.11	44.49
B-29	309372	2795959	Saltillo	3.33	210.66	8.30	9.69	0.00
B-31	312167	2806271	Arteaga	19.79	215.26	14.11	15.87	7.56

Con esta información se llevaron a cabo los procesos de análisis e interpretación de los datos.

Las coordenadas de los pozos y los valores de los parámetros medidos en el agua se organizaron en una base de datos y posteriormente se analizaron en ArcMap 10.5.4.

3.2.3 INTERPOLACION

Para el uso del software ArcMap convertimos los datos en CVS desde el Excel y con las coordenadas en UTM.

El kriging es un método geoestadístico de interpolación que permite estimar valores en puntos no muestreados a partir de datos puntuales con localización espacial (X, Y, Z). A diferencia de otros métodos (como el inverso de la distancia o IDW), kriging considera la autocorrelación espacial entre los puntos, es decir, cómo los valores se relacionan según su distancia y dirección.

3.3 HERRAMIENTA KRIGING DEL ARC MAP.

En el cuadro de diálogo dar clic en **Nuevo Mapa (New maps)** (Figura 8).

Haga clic en **Blank máp (mapa en blanco)** (Figura 9).

Dar clic en **OK**.

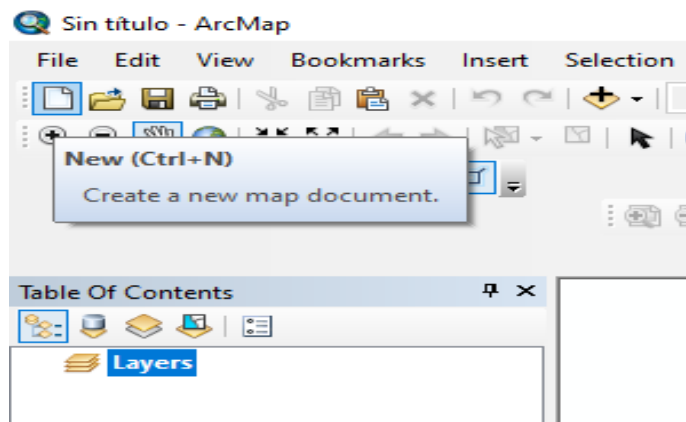


Figura 4. Nuevo Mapa. Elaboración propia.

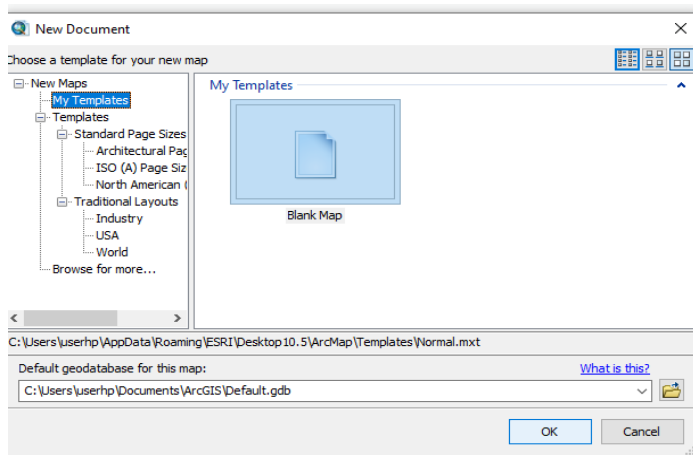


Figura 5. Botones de Mapa en Blanco y OK. Elaboración propia.

Ya creado el mapa en blanco se procede a cargar los archivos.

Procedimiento File>Add data> Add XY Data.

Dar clic en el botón **Add XY Data/ agregar datos** (Figura 10)

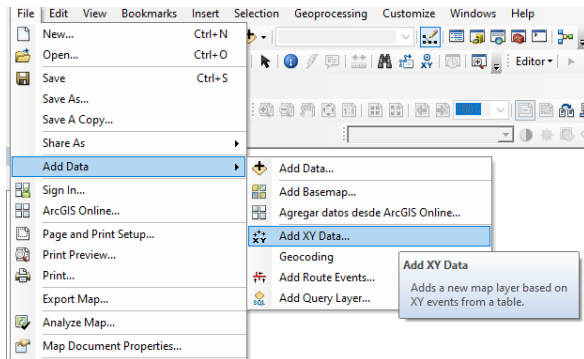


Figura 6. Botón Agregar Datos. Elaboración propia.

- 1 Asegurar de tener los puntos de muestreo en formato shapefile o feature class, con coordenadas proyectadas UTM
- 2 Ubicar la carpeta de destino.
- 3 Seleccionar la carpeta (shp).
- 4 Dar **click** en agregar (Figura 11).

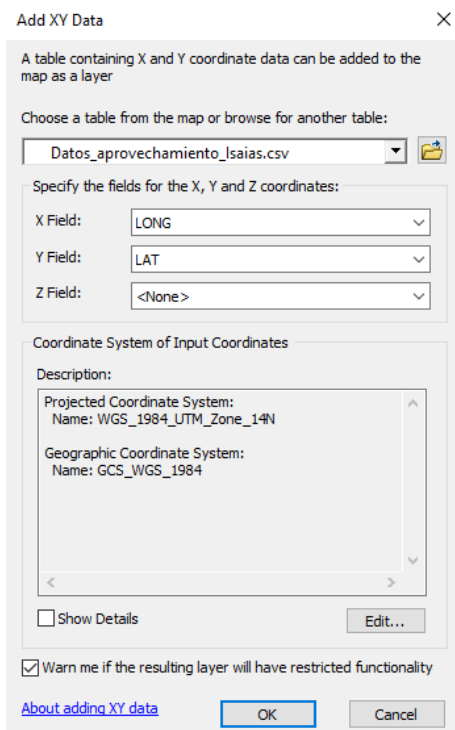


Figura 7. Agregar archivo pozos_1.shp. Elaboración propia.

Posteriormente de haber cargado los pozos, en la pantalla empezar a ver los puntos y usar la herramienta de **Geoprocesamiento** (Figura 12).

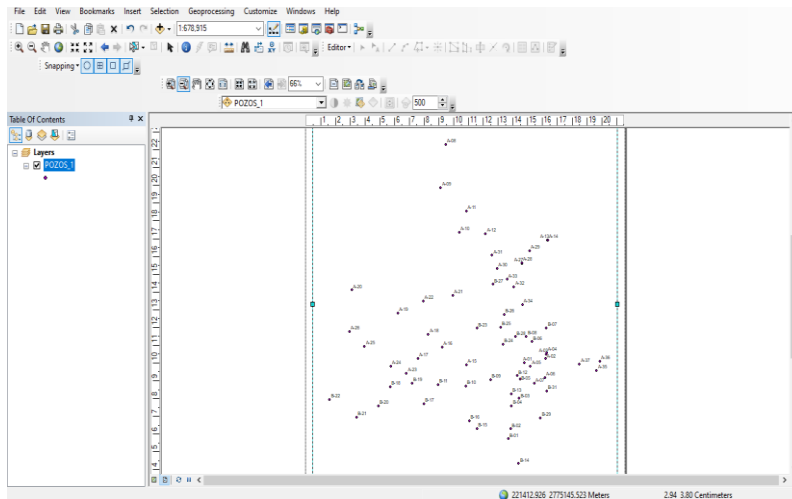


Figura 8. Pozos cargados en el ArcMap. Elaboración propia.

Si es la primera vez que usa la herramienta de Geoprocesamiento, hay que activar las extensiones, de la barra de **Menú>Customize>Extensions** (Figura 13).

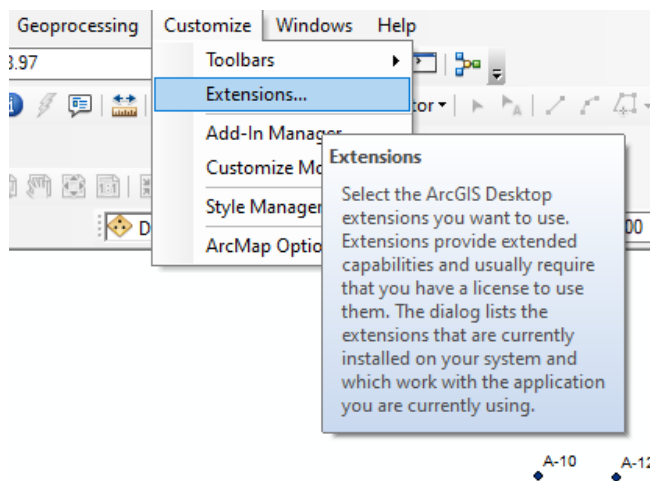


Figura 9. Activación de las extensiones de geoprocesamiento. Elaboración propia.

Active la herramienta Geostatistical Analyst, click derecho en la barra de herramientas, seleccionar **Geostatistical Analyst**.

Se despliega la ventana de **Geostatistical Analyst >Geostatistical Wizard** (Asistente Geoestadístico) (Figura 14).

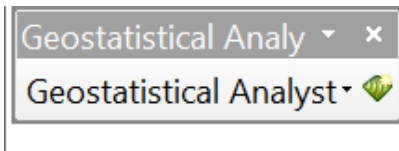


Figura 10. Activación de la herramienta geostatistical Analyst. Elaboración propia.

Ahora que tiene abierto el **Geostatistical Wizard** (Asistente Geoestadístico), el **Kriging** se encuentra dentro de los métodos geoestadísticos. Como se mencionó anteriormente, esto se debe a que crea su superficie de predicción óptima con un semivariograma y puede estimar un grado de confianza de la probabilidad de que esa predicción sea cierta.

Pasos a seguir de la herramienta Geostatistical Analyst.

1. **Geostatistical Analyst.**
2. **Geostatistical Wizard** (Figura 15).

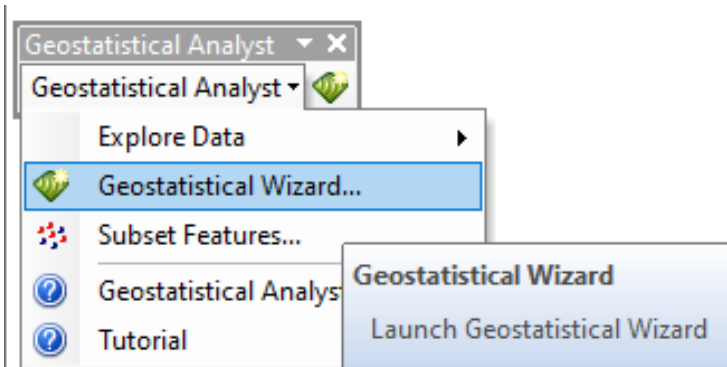


Figura 11. Herramienta Geostatistical Analyst. Elaboración propia.

Tenga en cuenta que, si selecciona una sola entrada, se trata simplemente de Kriging. Pero al agregar una segunda variable, se convierte en cokriging (Figura 16).

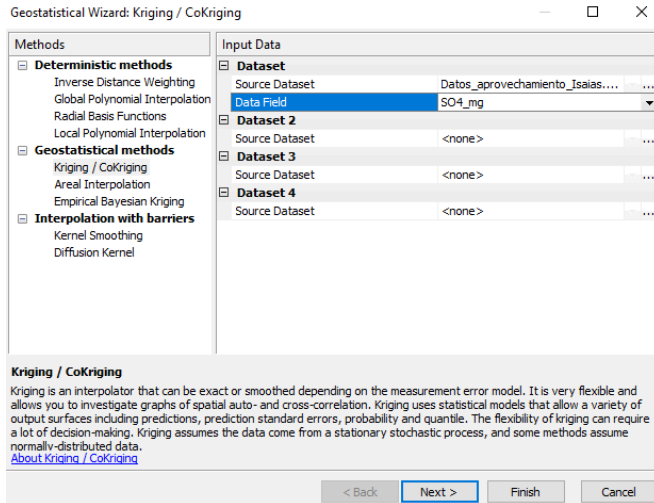


Figura 12. Kriging/cokriging. Elaboración propia.

El Kriging ordinario era el predeterminado en ArcGIS. Ahora, gracias a la transformación de puntuación normal, el Kriging simple es el predeterminado.

Ahora se muestran los datos medidos y los predecidos.

1. Dar **Next**, hasta que aparezca los datos medidos y predecidos (Figura 17).

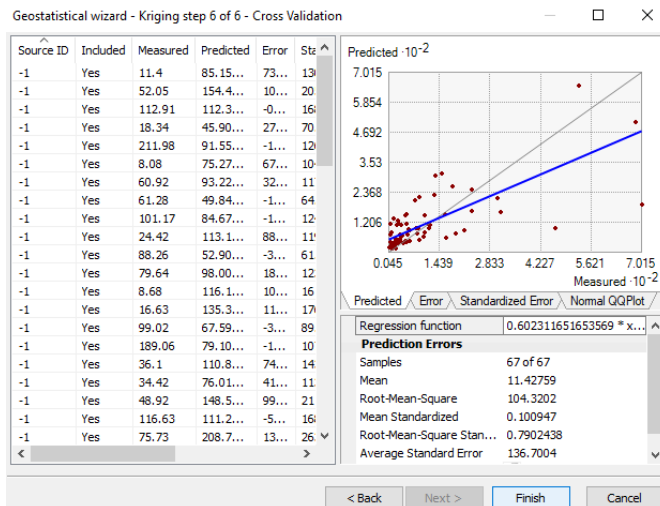


Figura 13. Datos medidos y predecidos. Elaboración propia.

Al dar en la tecla **Finish/Finalizar**.

Se presenta el reporte con el proceso realizado (Figura 18).

1. Dar **OK**.
2. Al finalizar muestra un mapa de salida (Figura 19).

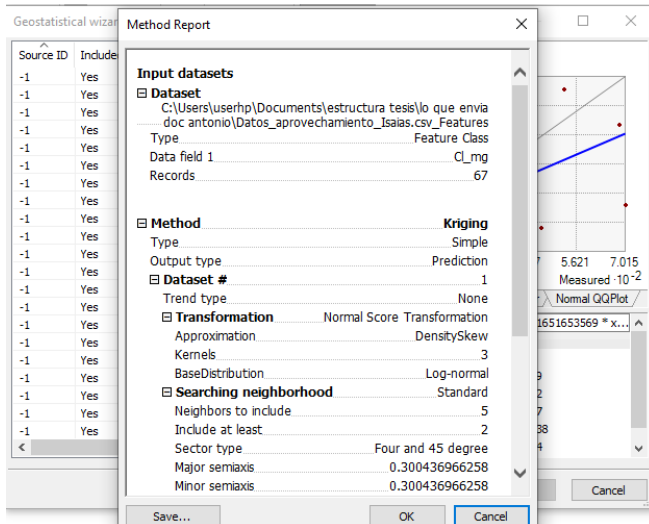


Figura 14. Reporte del proceso realizado. Elaboración propia.

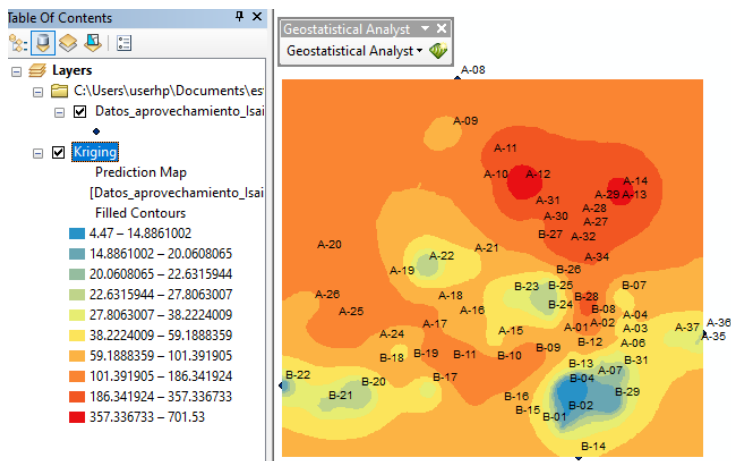


Figura 15. Mapa de salida Kriging. Elaboración propia.

Ahora en **Symbology** hay que adecuar el mapa obtenido, teniendo como referencia el límite permitido de SO_4 en agua que es de 400 mg. Doble clic al Archivo **Kriging**, se despliega la ventana.

1. Dar click en **Classify**
2. Se despliega la ventana y ahí seleccionar el método: **Manual**

3. Agregar los datos y en Clases colocar el valor de 5 y en **Breaks** (Corte o divisiones), agregar los valores de forma manual, los valores 200, 400, 600 y 800 y posteriormente OK.
4. En **symbol** escoger los colores de acuerdo al criterio sobre los límites permisibles.
5. Dar **Aceptar** (Figura 20).

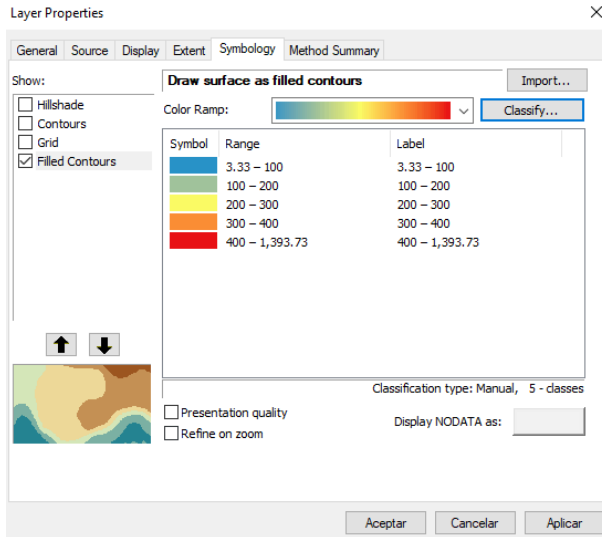


Figura 16. Clasificación de los límites permisibles. Elaboración propia.

Guardar el archivo en formato TIFF.

1. Guardar el archivo en formato **TIFF** y reclasificar el archivo
2. Clic derecho al archivo realizado con **kriging>Data>Export to Raster** (Figura 21).

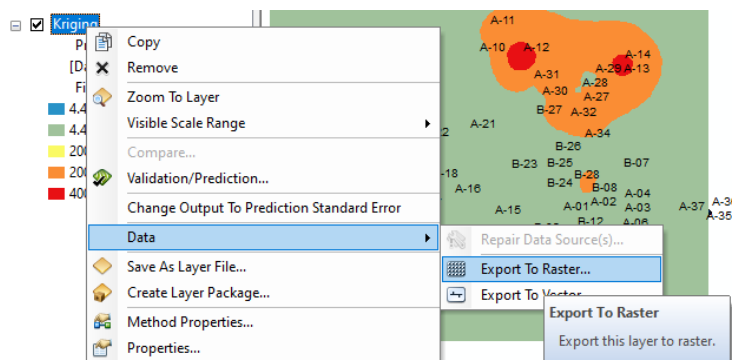


Figura 17. Guardado en formato TIFF y reclasificar el archivo. Elaboración propia.

Guardar el archivo con el nombre que corresponda.

En este caso sería sulfato.SO₄ (Figura 22).

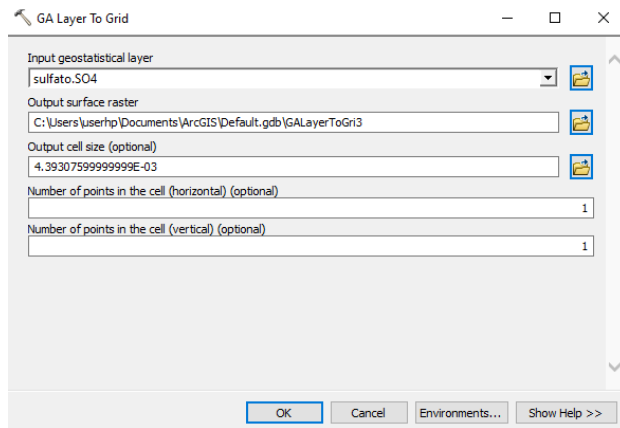


Figura 18. Guardado y Reclasificación. Elaboración propia.

Reclasificar el archivo para determinar los valores máximos y mínimos de las concentraciones del agua de los pozos.

1. Dar click en la barra de herramientas en la caja de herramientas o **ArcToolbox**.
2. Ahora en **Spatial Analysis Tools**, posteriormente **Reclass** y finalmente **Reclassify** (Figura 23).



Figura 19. Herramienta ArcToolbox. Elaboración propia.

3. Se despliega la ventana donde hay que escoger el archivo a **Classify/reclasificar** (Figura 24).

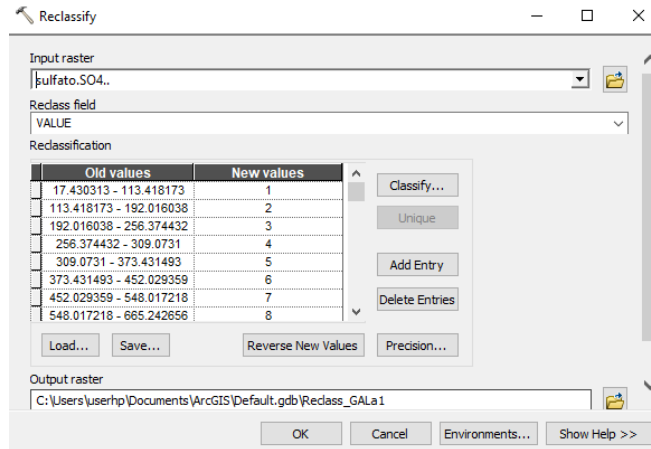


Figura 20. Reclassify. Elaboración propia.

4. Ahora dar click en **Classify** se despliega esa ventana, puede seleccionar manual y cambiar a 5 clases y cambiar los datos y dar en **Ok** (Figura25).

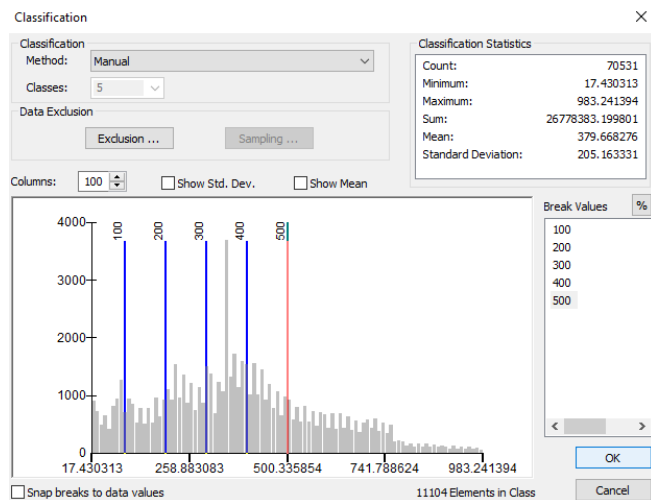


Figura 21. Classification/Clasificación. Elaboración propia.

El archivo hay que convertirlo en shapefile

5. Para ello en la barra de herramientas en la caja de herramientas o **ArcToolbox**, en **Conversión Tools**.

- Posteriormente **From Ráster** y en **Ráster to polygon**, dar click
- En la ventana que se despliega seleccionar el archivo que se convertirá a shapefile y el nombre de salida y ok (Figura 26).

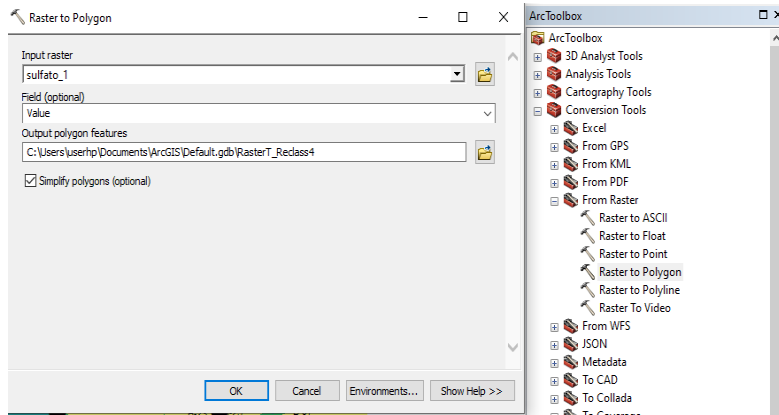


Figura 22. Conversión archivo en shapefile. Elaboración propia.

Ahora hay que agregar los campos al archivo shapefile

- Dar click derecho al archivo y ahí **Open Attribute Table** (Abrir tabla de atributos) y **click** (Figura 27).

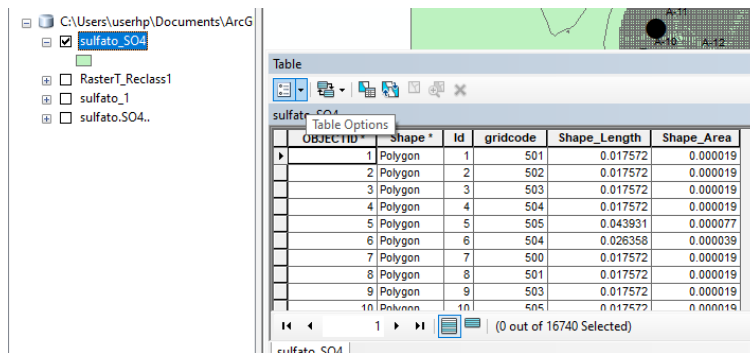


Figura 23. Table Options. Elaboración propia.

- Se despliega la tabla y ahora agregar los campos, en **Table Options**, **add Field** (Figura 28).

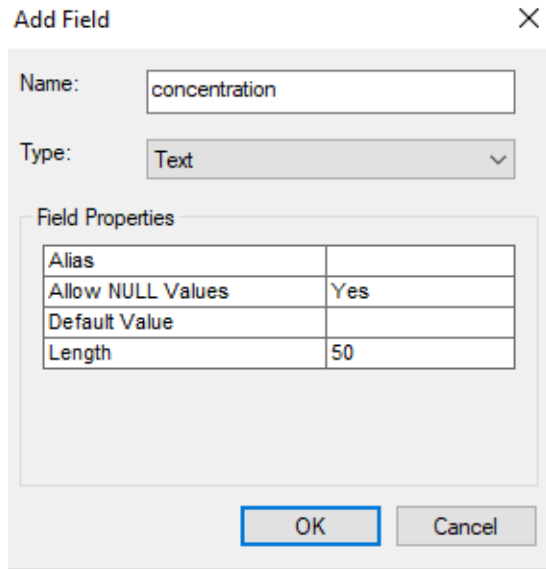


Figura 24. Add Field. Elaboración propia.

10. Colocar en orden de importancia el campo **gridcode** y agregar los datos en los campos iniciando en el número 1 que es un valor de 100.
11. Seleccionar en el lado izquierdo que se muestre de color azul y ahora en el título del campo **concentra** darle un clic derecho y seleccionar **Field Calculator** (Figura 29).

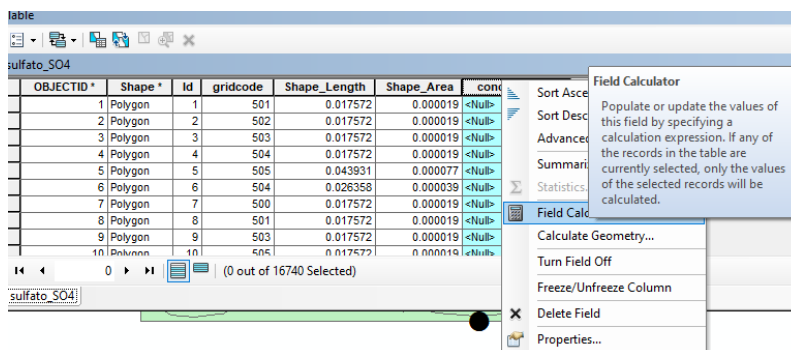


Figura 25. Agregación de datos. Elaboración propia.

Se despliega el teclado numérico y agregar el valor “100” y **ok** (Figura 30).

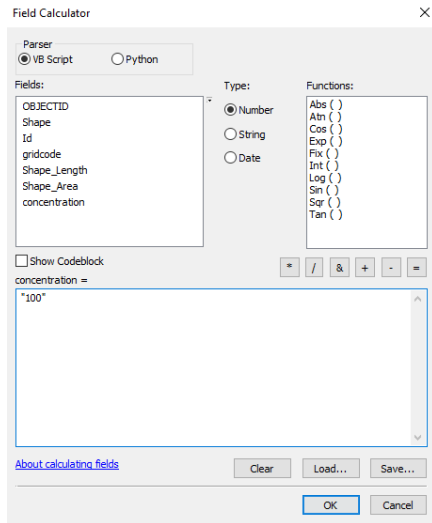


Figura 26. Field Calculator. Elaboración propia.

Ahora agregar la **simbología** al archivo shapefile (Figura 31).

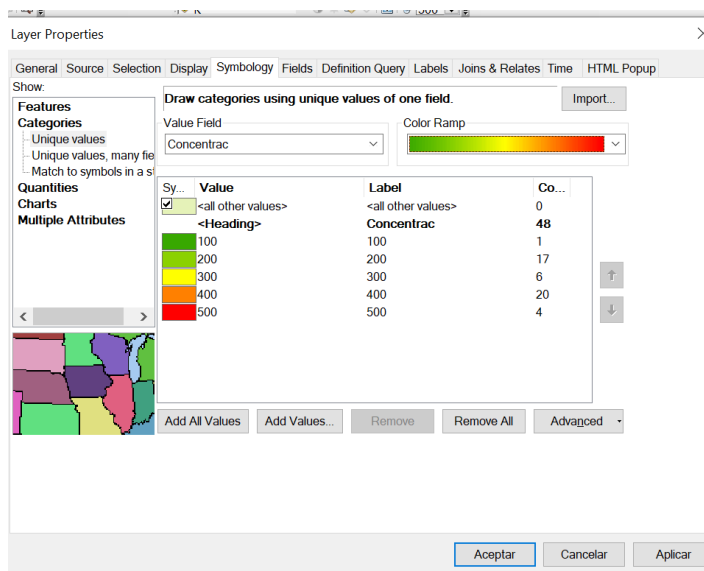


Figura 27. Simbología del archivo. Elaboración propia.

Este proceso se repite para cada uno de los valores a interpolar.

4.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS POR PARÁMETRO.

4.1.1 PARA EL CONSUMO HUMANO.

4.1.2 SULFATOS (SO_4^{2-}).

En la Región Sureste del Estado de Coahuila se encuentra presencia elevada del anión sulfato de acuerdo a los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 para uso urbano (Figura 33).

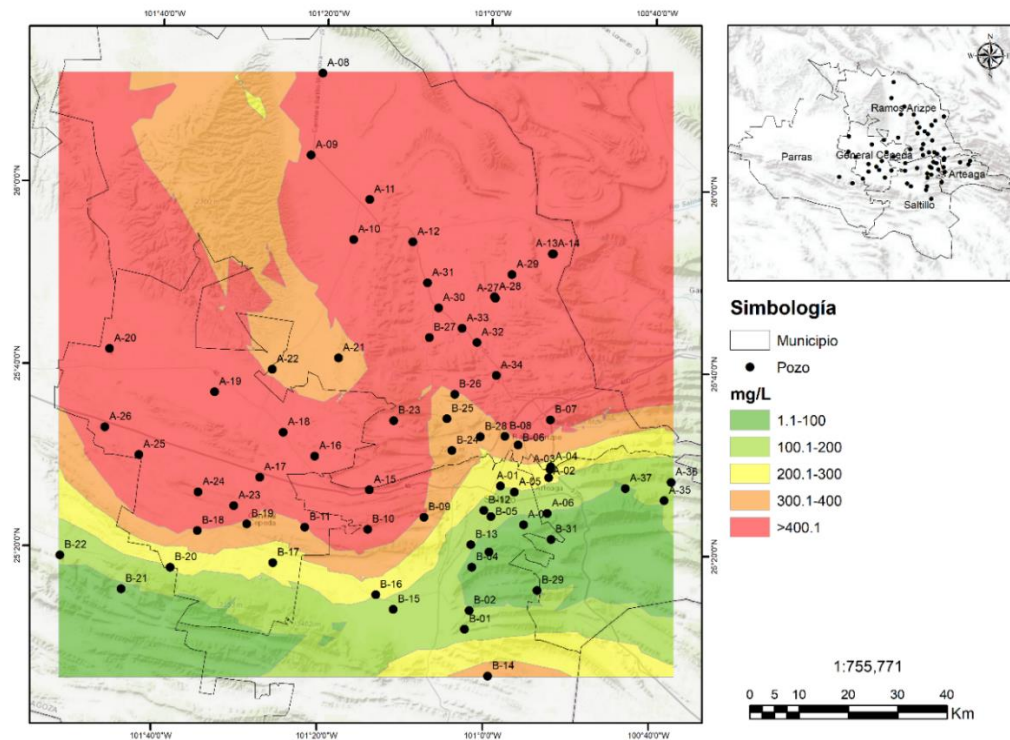


Figura 29. Distribución del Sulfato (Mg/L). Elaboración propia.

Los valores presentan una amplia variación con la mínima de 3.33 y la máxima de 1393.7 mg/L. Los pozos que sobrepasan los límites permisibles se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Pozos que superan el límite permisible de Sulfato (SO₄_Mg/L).

Pozo	SO ₄ _mg	Municipio	X	Y
A-14	1393.73	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97
A-27	1379.60	Ramos Arizpe	300900.156	2855140.01
A-24	1247.60	General Cepeda	240605.002	2815892.96
A-13	1205.20	Ramos Arizpe	312484.087	2864126.95
A-11	1165.31	Ramos Arizpe	275409.036	2875161.89
B-23	1005.20	Ramos Arizpe	280294.636	2830358.01
B-08	834.00	Ramos Arizpe	302845.82	2827155.47
A-19	830.40	General Cepeda	243964.059	2836201.99
A-18	824.39	General Cepeda	257864.017	2827990.9
A-33	822.40	Ramos Arizpe	294146.975	2849069.01

Los pozos presentan niveles elevados de sulfatos, no apta para consumo humano de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021 (agua potable) superan los 400 mg/L por lo tanto no cumplen con la norma.

Los niveles mayores de 400 mg/L no son aptos para el consumo humano lo que puede provocar efectos dañinos a la salud humana.

Los valores más altos se registran en el municipio de Ramos Arizpe, posiblemente asociados a la influencia de materiales evaporíticos (yesos o anhidritas) en el acuífero.

4.1.2 BICARBONATOS (HCO_3^-).

En la Figura 34, se observa que, en gran medida, los valores de bicarbonatos se encuentran entre los valores de 200.1 a 300.0, lo que indica una afectación de la calidad del agua.

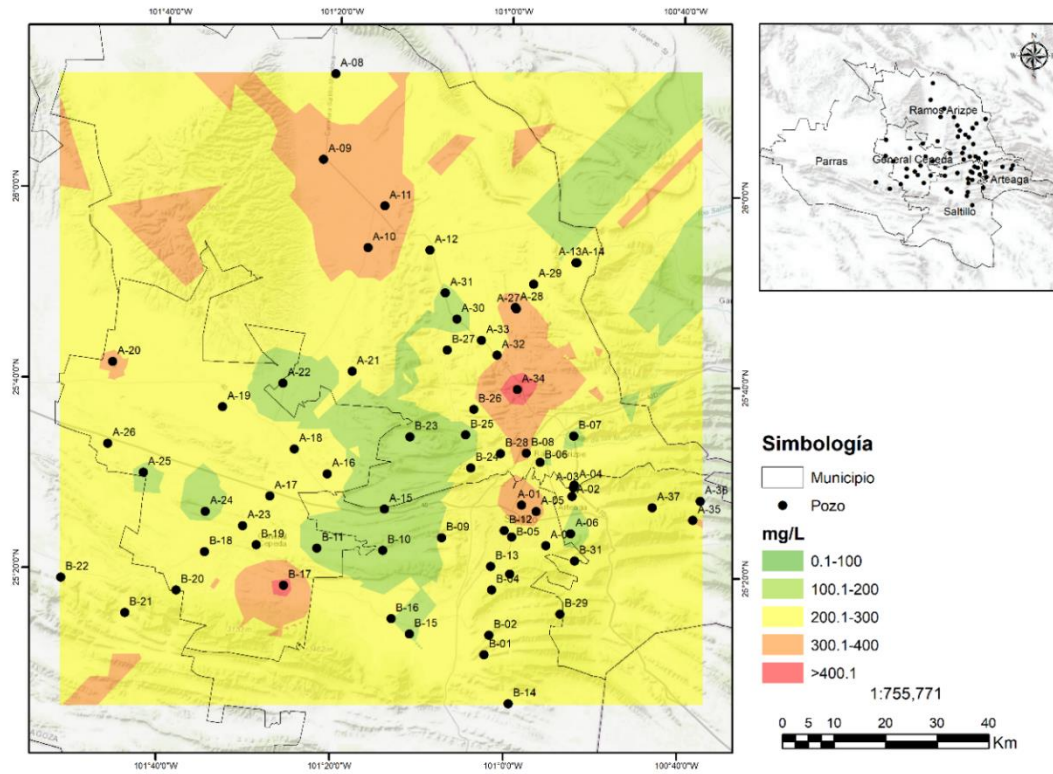


Figura 30. Distribución del Bicarbonato (Mg/L). Elaboración propia.

Los pozos presentan concentraciones desde 80 y hasta 492 mg/L (promedio de \approx 250 mg/L).

El agua tiene alcalinidad moderada, con presencia importante de bicarbonatos, pero sin riesgos para riego ni consumo desde el punto de vista del HCO_3^- .

Estos valores indican aguas típicas de acuíferos con interacción prolongada con rocas carbonatadas (calizas o dolomías).

Ramos Arizpe presenta los valores más altos de bicarbonatos (hasta 492.5 mg/L), lo que sugiere mayor interacción agua-roca carbonatada o mayor tiempo de residencia subterránea y también menor recarga del acuífero.

Los pozos con altas concentraciones de bicarbonato se encuentran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Pozos con mayores concentraciones de Bicarbonato (HCO_3^- Mg/L).

Pozo	HCO_3^- Mg	Municipio	X	Y
A-34	492.53	Ramos Arizpe	301089.956	2839509.04
B-17	463.49	General Cepeda	255753.954	2801530.27
A-10	417.94	Ramos Arizpe	272144.095	2867058.98
A-09	412.89	Ramos Arizpe	263526.099	2884193.95
A-01	409.57	Saltillo	301893.091	2817109.98
A-28	395.48	Ramos Arizpe	300738.056	2855431.89
A-11	367.53	Ramos Arizpe	275409.036	2875161.89
B-08	344.54	Ramos Arizpe	302845.82	2827155.47
A-05	343.44	Saltillo	304760.022	2815851.98
A-20	332.40	General Cepeda	222641.953	2844999.99

4.1.3 CARBONATOS (CO_3^{2-}).

Los carbonatos se identifican de manera limitada, lo que sugiere condiciones ligeramente alcalinas y su presencia reducida consistente con sistemas acuíferos donde predominan los bicarbonatos como especie aniónica principal (Figura 35).

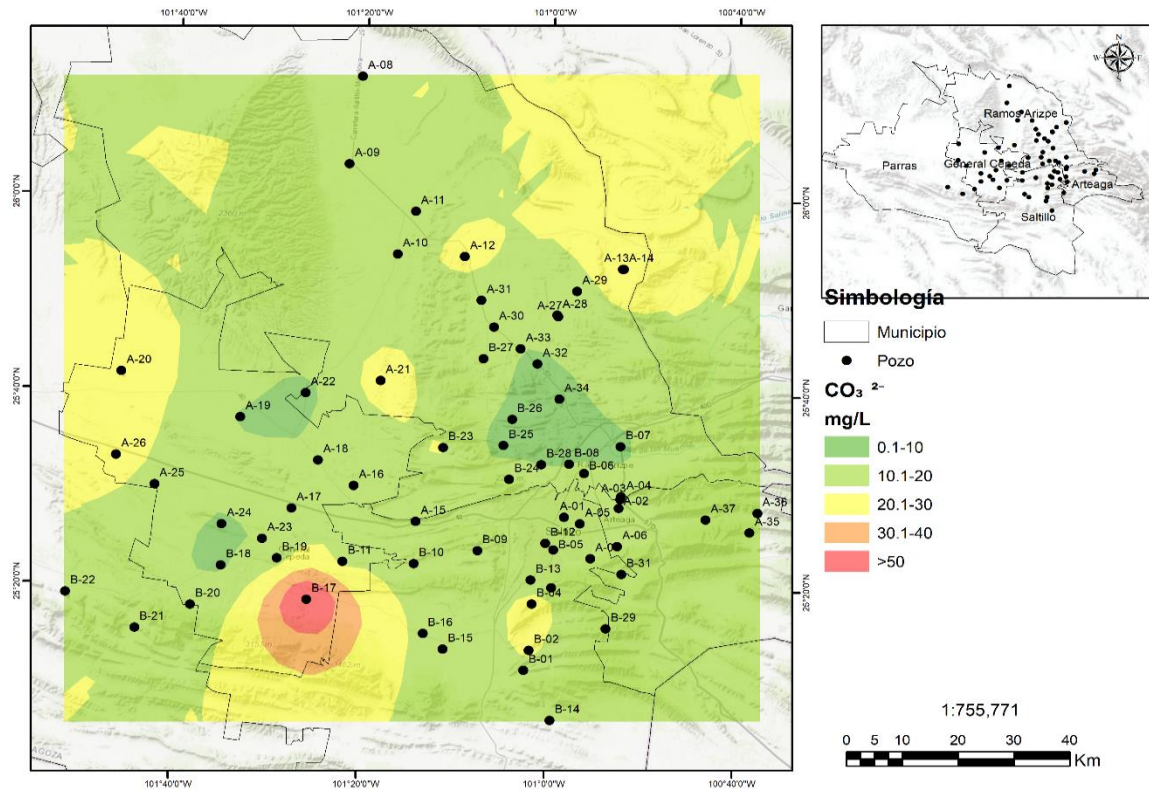


Figura 31. Distribución del Carbonato (Mg/L). Elaboración propia.

Las concentraciones son de bajas a moderadas, entre los valores de 0.1 y 74.21 mg/L (con promedio de =15. mg/L).

Los valores de carbonato muestran una variación moderada ($\text{CV} \approx 44\%$), influida por un valor alto en el pozo B-17 (74.21 mg/L), que podría representar un ambiente más alcalino o con condiciones geoquímicas distintas (pH alto o recarga local con evaporación intensa).

Los pozos B-17 y A-13 presentan los valores más altos (>38.05 mg/L).

Estos niveles son normales en aguas con tendencia alcalina y buena aireación subterránea.

Esto indica un predominio de aguas bicarbonatadas–carbonatadas cálcicas, con leve tendencia a la alcalinidad, propia de acuíferos en zonas áridas con evaporación moderada.

De los 10 pozos, los del municipio de General Cepeda presenta las concentraciones más altas, posiblemente asociadas a aguas más antiguas o con mayor evaporación, o bien a zonas donde el CO₂ disuelto se reduce, permitiendo la formación de carbonato libre.

Solo el 14 % de los pozos tienen una alta concentración de carbonatos, ninguno superando los límites permisibles de 300 Mg/L (Cuadro 8).

Cuadro 8. Pozos con mayores concentraciones de Carbonatos (CO₃_Mg/L).

Pozo	Co ₃ _Mg	Municipio	X	Y
B-17	74.21	General Cepeda	255753.954	2801530.27
A-13	38.05	Ramos Arizpe	312484.087	2864126.95
A-26	30.22	General Cepeda	221683.006	2829102.96
B-04	29.88	Saltillo	296102.115	2800616.05
A-20	29.42	General Cepeda	222641.953	2844999.99
A-12	28.54	Ramos Arizpe	284181.028	2866579.91
A-14	27.87	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97
A-21	27.83	Ramos Arizpe	269085.091	2843054.89
B-02	24.07	Saltillo	295585.548	2791833.92
B-23	22.41	Ramos Arizpe	280294.636	2830358.01

4.1.4 CLORURO (CL⁻).

Como se observa en la Figura 36, la distribución del anión cloruro se encuentra con los valores más altos al norte de la región superando los límites permisibles para el consumo humano.

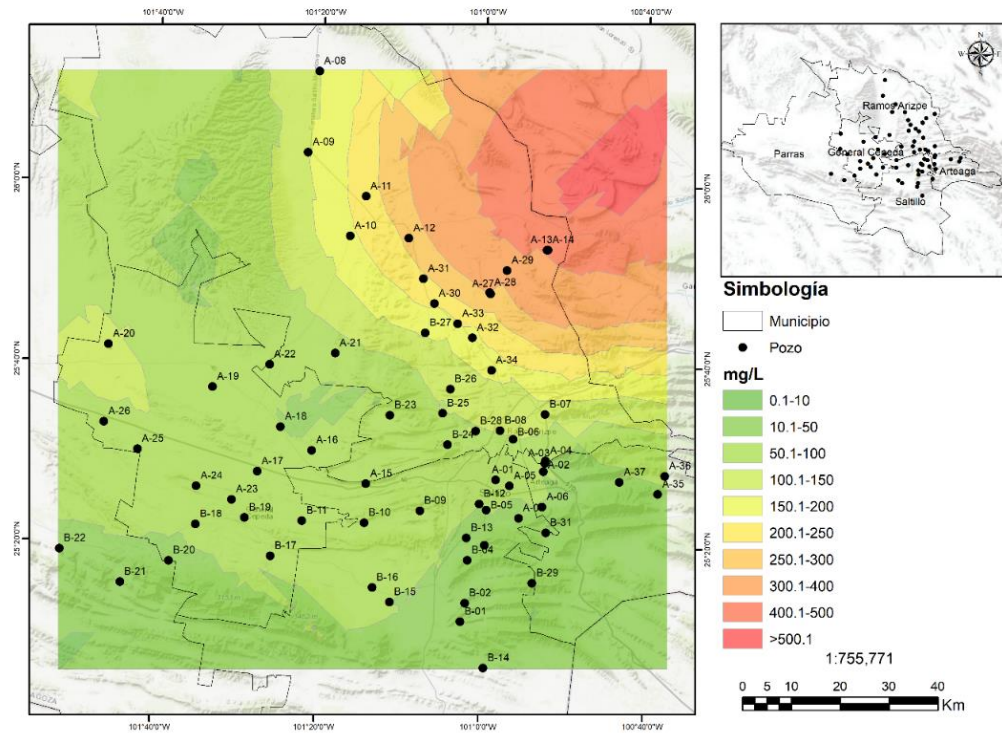


Figura 32. Distribución del Cloruro (Mg/L). Elaboración propia.

Las concentraciones varían entre 4.47 y hasta 701.53 mg/L (promedio de \approx 105.1357 Mg/L), siendo el límite permisible de 250 Mg/L.

Los pozos que superan los límites permisibles del cloruro se encuentran al norte de la región sur del estado de Coahuila, predominando los municipios de Ramos Arizpe y General Cepeda. Teniendo que el 14 % de los pozos presentan altos valores de cloruro.

Los pozos A-12 y A-14 presentan concentraciones extremadamente altas, lo que puede indicar evaporación intensa o fuentes profundas ricas en sales.

El municipio de Ramos Arizpe concentra ocho de los pozos con mayor concentración de cloruros y General Cepeda con dos de los pozos (Cuadro 9).

Cuadro 9. Pozos con altas concentraciones de Cloruro (Cl _Mg/L).

Pozo	Cl_Mg	Municipio	X	Y
A-12	701.53	Ramos Arizpe	284181.028	2866579.91
A-14	682.82	Ramos Arizpe	312666.06	2864144.97
A-13	528.35	Ramos Arizpe	312484.087	2864126.95
B-08	462.68	Ramos Arizpe	302845.82	2827155.47
A-27	311.18	Ramos Arizpe	300900.156	2855140.01
A-33	303.64	Ramos Arizpe	294146.975	2849069.01
A-32	230.84	Ramos Arizpe	297168.953	2846184.95
A-11	230.71	Ramos Arizpe	275409.036	2875161.89
A-25	211.98	General Cepeda	228580.095	2823464.91
B-11	189.06	General Cepeda	262241.583	2808762.23

4.1.5 NITRATOS (NO_3^-).

Los pozos que superan los límites permisibles de la Norma Oficial Mexicanas para el uso humano se encuentran al norte de la zona de estudio, más preciso en los municipios de Ramos Arizpe y General Cepeda (Figura 37).

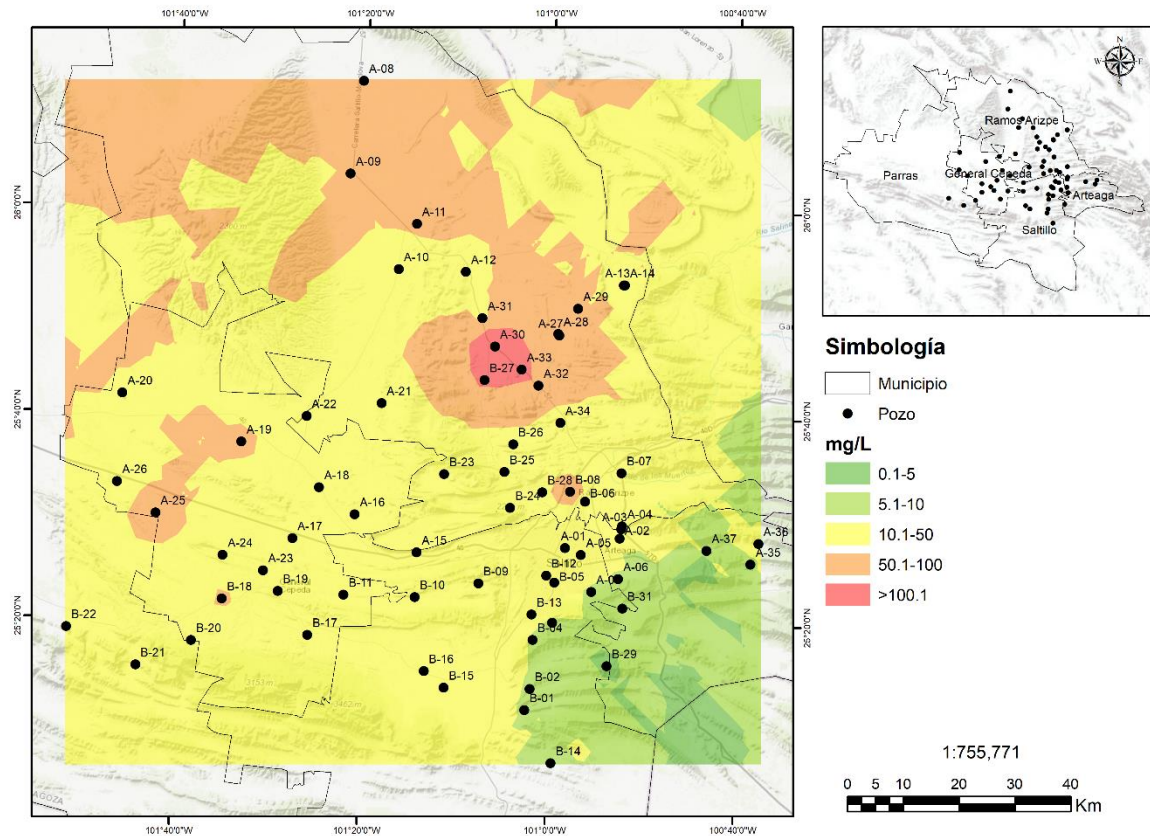


Figura 33. Distribución Nitrato (Mg/L). Elaboración propia.

Las concentraciones del nitrato oscilan entre 0.01 y 303.96 mg/L. Teniendo que un 55.1 % está entre los valores de 10.1 y 50 mg/L.

El pozo con mayor concentración es A-30 (303.96 mg/L).

El municipio de Ramos Arizpe concentra los pozos con los valores más críticos, incluyendo el pozo con la mayor concentración registrada (A-30).

Estos valores podrían indicar una fuerte influencia antrópica, posiblemente por uso de fertilizantes nitrogenados o infiltración de aguas residuales domésticas.

Los pozos que superan el límite permisible del anión nitrato se encuentran en el municipio de Ramos Arizpe y General Cepeda, siendo el 13 % de los pozos muestreados (Cuadro 10).

Cuadro 10. Pozos con mayores concentraciones de Nitratos (NO₃_Mg/L).

Pozo	NO ₃ _Mg	Municipio	X	Y
A-30	303.96	Ramos Arizpe	289380.03	2853186.93
A-08	135.71	Ramos Arizpe	265900.971	2900808.93
B-27	132.62	Ramos Arizpe	287500.227	2847199.07
A-33	127.91	Ramos Arizpe	294146.975	2849069.01
B-08	126.42	Ramos Arizpe	302845.82	2827155.47
A-25	109.81	General Cepeda	228580.095	2823464.91
A-32	109.32	Ramos Arizpe	297168.953	2846184.95
A-19	83.29	General Cepeda	243964.059	2836201.99
B-18	79.01	General Cepeda	240456.555	2808054.48

4.2 CLASIFICACIÓN DE LA SALINIDAD PARA USO AGRÍCOLA.

La conductividad del agua, medida generalmente en milisiemens por centímetro (mS/cm), es un parámetro que indica la capacidad del agua para transmitir corriente eléctrica.

Esta propiedad depende directamente de la presencia de iones disueltos, como sales, minerales y otras sustancias que se disocian en el agua. Cuanto mayor es la concentración de estos iones, mayor será la conductividad, ya que facilitan el movimiento de cargas eléctricas a través del líquido en el Cuadro 11 se muestran los valores de este parámetro en los pozos analizados en este estudio.

Cuadro 11. Clasificación de la salinidad en la Región Sureste del Estado de Coahuila.

No Campo	Municipio	Ce ($\mu\text{s Cm}^{-1}$)	Clasificación
A-01	Saltillo	1896.875	C3 Agua Altamente Salina
A-02	Arteaga	1351.5625	C3 Agua Altamente Salina
A-03	Ramos Arizpe	1348.4375	C3 Agua Altamente Salina
A-04	Ramos Arizpe	1437.5	C3 Agua Altamente Salina
A-05	Saltillo	1664.0625	C3 Agua Altamente Salina
A-06	Arteaga	845.3125	C3 Agua Altamente Salina
A-07	Saltillo	889.0625	C3 Agua Altamente Salina
A-08	Ramos Arizpe	2337.5	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-09	Ramos Arizpe	1628.125	C3 Agua Altamente Salina
A-10	Ramos Arizpe	3012.5	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-11	Ramos Arizpe	4684.375	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-12	Ramos Arizpe	4873.4375	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-13	Ramos Arizpe	5298.4375	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-14	Ramos Arizpe	6189.0625	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-15	Saltillo	2267.1875	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-16	General Cepeda	1185.9375	C3 Agua Altamente Salina
A-17	General Cepeda	1437.5	C3 Agua Altamente Salina
A-18	General Cepeda	3190.625	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-19	General Cepeda	3132.8125	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-20	General Cepeda	2934.375	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-21	Ramos Arizpe	1418.75	C3 Agua Altamente Salina
A-22	Ramos Arizpe	271.875	C2 Agua De Salinidad Media
A-23	General Cepeda	1509.375	C3 Agua Altamente Salina
A-24	General Cepeda	3343.75	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-25	General Cepeda	3110.9375	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-26	General Cepeda	1964.0625	C3 Agua Altamente Salina
A-27	Ramos Arizpe	5009.375	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-28	Ramos Arizpe	2779.6875	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-29	Ramos Arizpe	2750	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-30	Ramos Arizpe	2968.75	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-31	Ramos Arizpe	2890.625	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-32	Ramos Arizpe	3443.75	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-33	Ramos Arizpe	4065.625	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-34	Ramos Arizpe	2918.75	C4 Agua Muy Altamente Salina
A-35	Arteaga	1151.5625	C3 Agua Altamente Salina
A-36	Arteaga	900	C3 Agua Altamente Salina

A-37	Arteaga	795.3125	C3 Agua Altamente Salina
B-01	Saltillo	900	C3 Agua Altamente Salina
B-02	Saltillo	828.125	C3 Agua Altamente Salina
B-03	Saltillo	759.375	C3 Agua Altamente Salina
B-04	Saltillo	656.25	C2 Agua de Salinidad Media
B-05	Saltillo	1239.0625	C3 Agua Altamente Salina
B-06	Ramos Arizpe	2256.25	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-07	Ramos Arizpe	1895.3125	C3 Agua Altamente Salina
B-08	Ramos Arizpe	7284.375	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-09	Saltillo	2893.75	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-10	Saltillo	3021.875	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-11	General Cepeda	4490.625	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-12	Saltillo	1034.375	C3 Agua Altamente Salina
B-13	Saltillo	909.375	C3 Agua Altamente Salina
B-14	Saltillo	2406.25	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-15	Saltillo	1203.125	C3 Agua Altamente Salina
B-16	Saltillo	1162.5	C3 Agua Altamente Salina
B-17	General Cepeda	1718.75	C3 Agua Altamente Salina
B-18	General Cepeda	2156.25	C3 Agua Altamente Salina
B-19	General Cepeda	2207.8125	C3 Agua Altamente Salina
B-20	General Cepeda	884.375	C3 Agua Altamente Salina
B-21	Parras	784.375	C3 Agua Altamente Salina
B-22	Parras	814.0625	C3 Agua Altamente Salina
B-23	Ramos Arizpe	2867.1875	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-24	Ramos Arizpe	1089.0625	C3 Agua Altamente Salina
B-25	Ramos Arizpe	448.4375	C2 Agua de Salinidad Media
B-26	Ramos Arizpe	1373.4375	C3 Agua Altamente Salina
B-27	Ramos Arizpe	2470.3125	C4 Agua Muy Altamente Salina
B-28	Ramos Arizpe	1860.9375	C3 Agua Altamente Salina
B-29	Saltillo	540.625	C2 Agua de Salinidad Media
B-31	Arteaga	751.5625	C3 Agua Altamente Salina

Aquella agua clasificada como agua muy altamente salina (C4); no es apropiada para riego bajo condiciones ordinarias; puede usarse ocasionalmente en circunstancias muy especiales. Los suelos deben ser permeables y el drenaje adecuado, debiendo aplicarse exceso de agua para lograr un buen lavado; en este caso se debe seleccionar cultivos altamente tolerantes a sales.

En la región sureste se encuentran pozos con una alta salinidad (C3) los cuales están distribuidos en los municipios de Saltillo, Arteaga y General Cepeda, los 35

pozos con clasificación de C3 equivalen al 52.23 % de los pozos analizados en este estudio.

El agua clasificada como altamente salina (C3); no puede usarse en suelos cuyo drenaje sea deficiente. Aún con drenaje adecuado se pueden necesitar prácticas de control de la salinidad, debiendo por lo tanto seleccionarse únicamente aquellas especies vegetales muy tolerantes a sales.

Lo que más sorprende es que solo 5.97% de los pozos cuentan con un agua de salinidad media, que son cuatro pozos de los 67 en total evaluados. Esos pozos se encuentran dos en los Municipios de Ramos Arizpe y dos en Saltillo (Cuadro 12).

Cuadro 12. Pozos con concentraciones medias de salinidad.

Pozo	MUNICIPIO	Ce ($\mu\text{s Cm}^{-1}$)	CLASIFICACIÓN
A-22	Ramos Arizpe	271.875	C2 Agua De Salinidad Media
B-04	Saltillo	656.25	C2 agua de salinidad media
B-25	Ramos Arizpe	448.4375	C2 agua de salinidad media
B-29	Saltillo	540.625	C2 agua de salinidad media

El agua con clasificación de salinidad media (C2); puede usarse siempre que haya un cierto grado de lavado, en casi todos los casos y sin necesidad de prácticas especiales de control de la salinidad se pueden producir las plantas moderadamente tolerantes a las sales.

4.3 CLASIFICACIÓN DEL POR CIENTO DE SODIO INTERCAMBIABLE.

En el Cuadro 13, se muestra el Por ciento de Sodio Intercambiable (PSI) el cual es requerido para determinar la calidad del agua desde el punto de vista agrícola en la zona sureste del estado de Coahuila.

Cuadro 13. Clasificación del por ciento de sodio intercambiable.

Pozo	MUNICIPIO	PSI	Clasificación PSI
A-01	Saltillo	3.59243066	S1 Agua Baja
A-02	Arteaga	0.73782018	S1 Agua Baja
A-03	Ramos Arizpe	0.63009825	S1 Agua Baja
A-04	Ramos Arizpe	0.60207173	S1 Agua Baja
A-05	Saltillo	0.66244623	S1 Agua Baja
A-06	Arteaga	0.35851372	S1 Agua Baja
A-07	Saltillo	0.3677103	S1 Agua Baja
A-08	Ramos Arizpe	4.62747453	S1 Agua Baja
A-09	Ramos Arizpe	2.05725917	S1 Agua Baja
A-10	Ramos Arizpe	26.0023124	S4 Agua Muy Alta
A-11	Ramos Arizpe	8.29546918	S1 Agua Baja
A-12	Ramos Arizpe	4.04261619	S1 Agua Baja
A-13	Ramos Arizpe	4.38052834	S1 Agua Baja
A-14	Ramos Arizpe	4.50346985	S1 Agua Baja
A-15	Saltillo	2.02049579	S1 Agua Baja
A-16	General Cepeda	2.0117355	S1 Agua Baja
A-17	General Cepeda	2.37427221	S1 Agua Baja
A-18	General Cepeda	4.07395462	S1 Agua Baja
A-19	General Cepeda	4.05332013	S1 Agua Baja
A-20	General Cepeda	17.2603898	S2 Agua Moderada
A-21	Ramos Arizpe	2.13043809	S1 Agua Baja
A-22	Ramos Arizpe	0.61934416	S1 Agua Baja
A-23	General Cepeda	1.90951708	S1 Agua Baja
A-24	General Cepeda	1.7310853	S1 Agua Baja
A-25	General Cepeda	2.57100247	S1 Agua Baja
A-26	General Cepeda	2.69731443	S1 Agua Baja
A-27	Ramos Arizpe	3.81357359	S1 Agua Baja
A-28	Ramos Arizpe	3.12116006	S1 Agua Baja
A-29	Ramos Arizpe	2.88857998	S1 Agua Baja
A-30	Ramos Arizpe	2.34482682	S1 Agua Baja
A-31	Ramos Arizpe	1.81933115	S1 Agua Baja
A-32	Ramos Arizpe	2.09920538	S1 Agua Baja
A-33	Ramos Arizpe	2.43489695	S1 Agua Baja
A-34	Ramos Arizpe	3.61034138	S1 Agua Baja
A-35	Arteaga	0.75207986	S1 Agua Baja
A-36	Arteaga	0.43934109	S1 Agua Baja
A-37	Arteaga	1.21218083	S1 Agua Baja
B-01	Saltillo	0.45983265	S1 Agua Baja
B-02	Saltillo	0.35949159	S1 Agua Baja
B-03	Saltillo	0.29557676	S1 Agua Baja

B-04	Saltillo	0.27324754	S1 Agua Baja
B-05	Saltillo	1.2481023	S1 Agua Baja
B-06	Ramos Arizpe	2.70810111	S1 Agua Baja
B-07	Ramos Arizpe	0.64802846	S1 Agua Baja
B-08	Ramos Arizpe	3.58631983	S1 Agua Baja
B-09	Saltillo	2.96800888	S1 Agua Baja
B-10	Saltillo	2.14812153	S1 Agua Baja
B-11	General Cepeda	2.48883879	S1 Agua Baja
B-12	Saltillo	0.45972533	S1 Agua Baja
B-13	Saltillo	0.41380045	S1 Agua Baja
B-14	Saltillo	0.53694283	S1 Agua Baja
B-15	Saltillo	0.69826237	S1 Agua Baja
B-16	Saltillo	0.46079502	S1 Agua Baja
B-17	General Cepeda	52.4175233	S4 Agua Muy Alta
B-18	General Cepeda	1.31159479	S1 Agua Baja
B-19	General Cepeda	1.63582103	S1 Agua Baja
B-20	General Cepeda	0.65125382	S1 Agua Baja
B-21	Parras	0.13685929	S1 Agua Baja
B-22	Parras	0.10258259	S1 Agua Baja
B-23	Ramos Arizpe	1.19584	S1 Agua Baja
B-24	Ramos Arizpe	1.14218263	S1 Agua Baja
B-25	Ramos Arizpe	0.3243933	S1 Agua Baja
B-26	Ramos Arizpe	1.78029711	S1 Agua Baja
B-27	Ramos Arizpe	1.77645067	S1 Agua Baja
B-28	Ramos Arizpe	2.08558476	S1 Agua Baja
B-29	Saltillo	0.03488007	S1 Agua Baja
B-31	Arteaga	0.56574958	S1 Agua Baja

Se encontró que solo dos pozos son de muy alta sodicidad, lo cual es el 2.98 % de la totalidad de los pozos (Cuadro 14).

Cuadro 14. Pozos con concentración muy alta en sodio.

Pozo	MUNICIPIO	PSI	CLASIFICACIÓN
A-10	Ramos Arizpe	26.0023124	S4 Agua Muy Alta
B-17	General Cepeda	52.4175233	S4 Agua Muy Alta

El agua clasificada como muy alta en sodio (S4); es inadecuada para riego excepto cuando su salinidad es media y cuando la disolución del calcio del suelo y/o la aplicación de yeso u otros mejorado hace antieconómico su empleo.

4.4 CARBONATO DE SODIO RESIDUAL.

Para determinar la calidad de agua en los aniones para los pozos de agua subterránea se tienen en cuenta los cationes calcio y magnesio, y los aniones carbonato y bicarbonato, ya teniendo los cálculos en sus respectivas unidades.

Se clasifica el resultado de acuerdo a los valores establecidos como se muestra en el Cuadro 15.

Cuadro 15. Clasificación del Carbonato de Sodio Residual.

Pozo	MUNICIPIO	CSR	
		(Meq/L)	Clasificación del CSR
A-01	Saltillo	0.246627	Buena
A-02	Arteaga	-5.553694	Buena
A-03	Ramos Arizpe	-4.04696	Buena
A-04	Ramos Arizpe	-4.226082	Buena
A-05	Saltillo	-5.376368	Buena
A-06	Arteaga	-2.194989	Buena
A-07	Saltillo	-1.203434	Buena
A-08	Ramos Arizpe	-4.983044	Buena
A-09	Ramos Arizpe	-1.177025	Buena
A-10	Ramos Arizpe	6.096884	No recomendable
A-11	Ramos Arizpe	-8.47488	Buena
A-12	Ramos Arizpe	-19.669725	Buena
A-13	Ramos Arizpe	-21.06583	Buena
A-14	Ramos Arizpe	-27.027557	Buena
A-15	Saltillo	-11.444871	Buena
A-16	General Cepeda	-0.335121	Buena
A-17	General Cepeda	-1.860968	Buena
A-18	General Cepeda	-9.773768	Buena
A-19	General Cepeda	-9.779146	Buena
A-20	General Cepeda	3.673487	No recomendable
A-21	Ramos Arizpe	-1.692077	Buena
A-22	Ramos Arizpe	0.055535	Buena
A-23	General Cepeda	-2.82826	Buena
A-24	General Cepeda	-22.723382	Buena
A-25	General Cepeda	-14.266812	Buena
A-26	General Cepeda	-3.020885	Buena
A-27	Ramos Arizpe	-22.137703	Buena

A-28	Ramos Arizpe	-3.645248	Buena
A-29	Ramos Arizpe	-9.34832	Buena
A-30	Ramos Arizpe	-12.84125	Buena
A-31	Ramos Arizpe	-14.583449	Buena
A-32	Ramos Arizpe	-14.39457	Buena
A-33	Ramos Arizpe	-20.154889	Buena
A-34	Ramos Arizpe	-1.442803	Buena
A-35	Arteaga	-1.178318	Buena
A-36	Arteaga	-0.755716	Buena
A-37	Arteaga	0.392748	Buena
B-01	Saltillo	0.142805	Buena
B-02	Saltillo	0.102282	Buena
B-03	Saltillo	-0.051243	Buena
B-04	Saltillo	0.152106	Buena
B-05	Saltillo	-1.408656	Buena
B-06	Ramos Arizpe	-6.65986	Buena
B-07	Ramos Arizpe	-9.8788	Buena
B-08	Ramos Arizpe	-18.237677	Buena
B-09	Saltillo	-10.745069	Buena
B-10	Saltillo	-10.516344	Buena
B-11	General Cepeda	-11.439611	Buena
B-12	Saltillo	-2.053527	Buena
B-13	Saltillo	-1.125481	Buena
B-14	Saltillo	-13.114677	Buena
B-15	Saltillo	-3.550125	Buena
B-16	Saltillo	-2.786505	Buena
B-17	General Cepeda	9.967476	No recomendable
B-18	General Cepeda	-7.637329	Buena
B-19	General Cepeda	-6.971232	Buena
B-20	General Cepeda	-0.277641	Buena
B-21	Parras	-0.736198	Buena
B-22	Parras	-0.822692	Buena
B-23	Ramos Arizpe	-17.808656	Buena
B-24	Ramos Arizpe	-0.838676	Buena
B-25	Ramos Arizpe	-0.113731	Buena
B-26	Ramos Arizpe	-1.404381	Buena
B-27	Ramos Arizpe	-8.56814	Buena
B-28	Ramos Arizpe	-4.65842	Buena
B-29	Saltillo	-0.206765	Buena
B-31	Arteaga	-0.069298	Buena

El carbonato de sodio residual se clasifica en 3 clases (Meq/L), como se muestra en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Carbonato de Sodio Residual_ Clases.

Clase	Carbonato de Sodio Residual (Meq/L)
Buena	< 1.25
Condicionada	1.25 a 2.5
No recomendable	> 2.5

Los pozos que superan los límites permisibles de carbonato de sodio residual son 3 pozos que se encuentran en los municipios de Ramos Arizpe (Pozo A_10), y 2 pozos en General Cepeda (Pozo A-20, Y B-17), se muestra en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Pozos clasificados como no recomendables en Carbonato de Sodio Residual.

POZOS	MUNICIPIOS	CSR	
		MEQ/L	CLASIFICACION
A-10	Ramos Arizpe	6.096884	No Recomendable
A-20	General Cepeda	3.673487	No Recomendable
B-17	General Cepeda	9.967476	No Recomendable

Los pozos A-10, A-20 y B-17, son los pozos no recomendables para usarse para riego agrícola, ya que presentan altos valores en la clasificación

Eso indica que más del 95 % de los pozos en la región Sur del Estado de Coahuila no tienen una alta concentración de carbonato de sodio residual y no puede provocar repercusiones a los cultivos y suelo de la región.

4.5 CLASIFICACIÓN DEL AGUA PARA USO INDUSTRIAL.

En México no se cuenta con una Norma Oficial Mexicana que regule los iones en la industria, esto debido que es poco el porcentaje que se destina a este uso. Pero

se pueden ver los efectos que los iones ocasionan en las tuberías de las industrias mexicanas.

Se cuenta con un límite requerido que los iones no pueden sobrepasar, por la afectación que provocan a las tuberías industriales, debido a las concentraciones de los iones.

4.5.1 IONES QUE AFECTAN LAS TUBERÍAS INDUSTRIALES.

En la industria se cuentan con tuberías de aceros inoxidable y acero al carbono, estos materiales son los más usados en la industria por su alta durabilidad ante las sales en altas concentraciones, los únicos iones que afectan en corrosión son los iones de cloro y sulfato.

4.5.2 CLASIFICACIÓN DEL ION CLORO.

El ion de cloro en altas concentraciones provoca la corrosión y picaduras en las tuberías, se clasifica el ion de acuerdo a su concentración y los límites que usan las industrias para clasificarlo en sus aguas es mostrado en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Clasificación del cloruro para uso industrial.

Pozo	MUNICIPIO	CLORO-PPM	CLASIFICACION
A-01	Saltillo	83.948436	Concentracion Baja
A-02	Arteaga	49.605894	Concentracion Baja
A-03	Ramos Arizpe	33.853332	Concentracion Baja
A-04	Ramos Arizpe	42.31312	Concentracion Baja
A-05	Saltillo	80.034756	Concentracion Baja
A-06	Arteaga	27.493602	Concentracion Baja
A-07	Saltillo	21.720924	Concentracion Baja
A-08	Ramos Arizpe	116.627664	Concentracion Baja
A-09	Ramos Arizpe	48.921	Concentracion Baja
A-10	Ramos Arizpe	75.729708	Concentracion Baja
A-11	Ramos Arizpe	230.711436	Concentracion Media
A-12	Ramos Arizpe	701.52714	Concentracion Media
A-13	Ramos Arizpe	528.3468	Concentracion Media
A-14	Ramos Arizpe	682.82372	Concentracion Media
A-15	Saltillo	30.526704	Concentracion Baja
A-16	General Cepeda	36.103698	Concentracion Baja
A-17	General Cepeda	79.643388	Concentracion Baja

A-18	General Cepeda	99.016104	Concentracion Baja
A-19	General Cepeda	101.168628	Concentracion Baja
A-20	General Cepeda	112.909668	Concentracion Baja
A-21	Ramos Arizpe	34.418405	Concentracion Baja
A-22	Ramos Arizpe	8.675324	Concentracion Baja
A-23	General Cepeda	24.422923	Concentracion Baja
A-24	General Cepeda	60.915862	Concentracion Baja
A-25	General Cepeda	211.979656	Concentracion Media
A-26	General Cepeda	52.051944	Concentracion Baja
A-27	Ramos Arizpe	311.1801	Concentracion Media
A-28	Ramos Arizpe	149.743636	Concentracion Baja
A-29	Ramos Arizpe	131.827206	Concentracion Baja
A-30	Ramos Arizpe	128.621108	Concentracion Baja
A-31	Ramos Arizpe	178.598518	Concentracion Baja
A-32	Ramos Arizpe	230.839056	Concentracion Media
A-33	Ramos Arizpe	303.63634	Concentracion Media
A-34	Ramos Arizpe	157.853178	Concentracion Baja
A-35	Arteaga	22.065498	Concentracion Baja
A-36	Arteaga	21.216825	Concentracion Baja
A-37	Arteaga	23.102765	Concentracion Baja
B-01	Saltillo	18.336158	Concentracion Baja
B-02	Saltillo	12.160768	Concentracion Baja
B-03	Saltillo	10.165642	Concentracion Baja
B-04	Saltillo	4.465282	Concentracion Baja
B-05	Saltillo	50.448186	Concentracion Baja
B-06	Ramos Arizpe	86.075436	Concentracion Baja
B-07	Ramos Arizpe	27.931764	Concentracion Baja
B-08	Ramos Arizpe	462.67922	Concentracion Media
B-09	Saltillo	162.46026	Concentracion Baja
B-10	Saltillo	114.387224	Concentracion Baja
B-11	General Cepeda	189.06194	Concentracion Baja
B-12	Saltillo	41.32761	Concentracion Baja
B-13	Saltillo	23.656494	Concentracion Baja
B-14	Saltillo	34.582184	Concentracion Baja
B-15	Saltillo	54.533444	Concentracion Baja
B-16	Saltillo	56.623576	Concentracion Baja
B-17	General Cepeda	16.62605	Concentracion Baja
B-18	General Cepeda	61.27887	Concentracion Baja
B-19	General Cepeda	88.260574	Concentracion Baja
B-20	General Cepeda	8.07551	Concentracion Baja
B-21	Parras	18.336158	Concentracion Baja
B-22	Parras	11.40072	Concentracion Baja
B-23	Ramos Arizpe	21.661368	Concentracion Baja

B-24	Ramos Arizpe	22.32641	Concentracion Baja
B-25	Ramos Arizpe	7.885498	Concentracion Baja
B-26	Ramos Arizpe	24.986578	Concentracion Baja
B-27	Ramos Arizpe	101.466408	Concentracion Baja
B-28	Ramos Arizpe	53.108354	Concentracion Baja
B-29	Saltillo	9.690612	Concentracion Baja
B-31	Arteaga	15.866002	Concentracion Baja

En la clasificación del ion cloro se encontraron concentraciones entre 8.67 ppm y 303.63 ppm, lo que indica que solo el 13 % de los pozos cuenta con valores medios (Cuadro 19).

Cuadro 19. Pozos con concentraciones medias.

Pozo	MUNICIPIO	CLORO-PPM	CLASIFICACION
A-11	Ramos Arizpe	230.711436	Concentracion Media
A-12	Ramos Arizpe	701.52714	Concentracion Media
A-13	Ramos Arizpe	528.3468	Concentracion Media
A-14	Ramos Arizpe	682.82372	Concentracion Media
A-25	General Cepeda	211.979656	Concentracion Media
A-27	Ramos Arizpe	311.1801	Concentracion Media
A-32	Ramos Arizpe	230.839056	Concentracion Media
A-33	Ramos Arizpe	303.63634	Concentracion Media
B-08	Ramos Arizpe	462.67922	Concentracion Media

Rango de concentración media ($200 \text{ ppm} \leq \text{Cl}^- \leq 1500 \text{ ppm}$)

Material principal: El 316/316/L (tubería de acero inoxidable) es el estándar. Su principal ventaja reside en la adición de un 2-3 % de molibdeno. El molibdeno mejora significativamente la estabilidad de la película pasiva, especialmente en entornos con cloruro. Inhibe eficazmente la nucleación y propagación de la corrosión por picaduras.

Puntos críticos y riesgos:

1500 ppm es un umbral crítico, generalmente considerado el límite superior para el acero inoxidable 316L (especialmente a temperatura ambiente). Por encima de esta concentración, el riesgo aumenta drásticamente.

60 °C es otro umbral crítico. Por encima de esta temperatura, incluso con concentraciones de Cl^- inferiores a 1500 ppm, el riesgo de picaduras y SCC (Stress Corrosión Cracking, lo que en español se traduce como Agrietamiento por Corrosión Bajo Tensión) en el acero 316L aumenta significativamente. Se requiere extrema precaución por encima de 70 °C.

Riesgo de fluctuación del proceso: La concentración o la temperatura de Cl^- pueden aumentar inesperadamente durante el funcionamiento del sistema (debido a cambios en el agua cruda o fugas en el intercambiador de calor). Se deben considerar márgenes de seguridad durante el diseño.

En la Región Sureste del estado de Coahuila se cuenta con una alta extracción de agua subterránea, debido a que se encuentra en la región árida y semi árida del país.

La modelación a través del software de ArcMap 10.5 fue una herramienta fundamental, para ajustar el monitoreo de los aniones en la región, además de permitir la creación de los mapas que muestran la interpolación realizada a partir de los datos obtenidos de los pozos de la Región Sureste del Estado de Coahuila.

Las aguas subterráneas de los pozos cuentan con concentraciones altas de aniones de acuerdo a los rangos establecidos, los aniones que se encuentran con las mayores concentraciones en la región sureste del estado de Coahuila son los aniones de sulfato y cloro, sin embargo, llegan a afectar al 20 % de los pozos en la región.

Para el uso doméstico.

Los pozos que superan los límites permisibles del anión sulfato (SO_4) son del orden del 15 %. Por lo que, no son aptos para consumo humano de acuerdo con la NOM-127-SSA1-2021 (agua potable) ya que superan los 400 mg/L, por lo tanto,

solo el 85 % de los pozos cumplen con la norma, lo que puede ser favorable en la región.

En cuanto a los iones de carbonato (HCO_3) y bicarbonato (CO_3), solo el 14 % presentan valores altos, lo cual no es un riesgo para el consumo humano y el 86 % de los pozos no superan el límite permisible.

Con respecto al ion cloruro (Cl) solo el 14 % de los pozos cuenta con valores que superan los límites de la Norma Oficial Mexicana para consumo humano, estos pozos se encuentran solamente en el municipio de Ramos Arizpe, lo que se puede percibir en sabor salado en el agua y provocar enfermedades en las personas y el 85 % de los pozos no superan los valores permisibles.

Con referencia al ion nitrato (NO_3), solo el 13% de los pozos presentan valores altos y estos pozos se encuentran ubicados en el municipio de Ramos Arizpe. La concentración de este ion en esos pozos sobrepasa los límites permisibles para la salud humana. El 87 % de los pozos cuentan con valores que no superan los límites permisibles. Este ion no puede olerse ni sentirse y su alta concentración puede provocar problemas para la salud de las personas.

Los pozos que superan los límites permisibles de los aniones se encuentran en el municipio de Ramos Arizpe, esos pozos pueden ser tratados con osmosis inversa (OI), ya que es el método más eficaz, capaz de eliminar hasta el 99% de los sulfatos, sales y otros sólidos disueltos y filtración especializada como lo es los filtros de arena/ceolita. Útiles para eliminar sólidos suspendidos y reducir la turbidez, lo cual a veces acompaña a los altos iones.

Para uso agrícola.

Los pozos que se estudiaron pueden ser aprovechados para el uso agrícola, ya que, de acuerdo a los rangos establecidos para este estudio de carbonato de sodio residual, más del 95 % los pozos no son perjudiciales para los cultivos de la región

ya que, sirve como neutralizador de ácidos, regula el pH y sirve como un ablandador de aguas duras.

Para la calidad del agua para uso industrial

Se cuenta con una clasificación establecida sobre el ion cloruro que provoca oxidación y corrosión en las tuberías industriales, y de los aceros 304 y 304L y al carbono. Solo el 13 % de los pozos estudiados cuenta con una clase media, lo que indica que 87 % de los pozos son de clase baja y son aptos para el uso en las tuberías industriales sin afectación de corrosividad y oxidación.

V CONCLUSIÓN.

La calidad del agua subterránea en la región Sureste de Coahuila está influenciada principalmente por procesos naturales de interacción entre el agua y las rocas del acuífero. En el municipio de Ramos Arizpe se registran las mayores concentraciones de sulfatos y bicarbonatos, lo que sugiere la presencia de materiales evaporíticos y un mayor tiempo de permanencia del agua en formaciones carbonatadas. Por su parte, General Cepeda presenta las concentraciones más altas de carbonatos, posiblemente asociadas a aguas de mayor antigüedad o a procesos de evaporación más intensos. En cuanto a los cloruros, el 14 % de los pozos supera los límites permisibles, principalmente en los municipios de Ramos Arizpe y General Cepeda, lo que indica la necesidad de atención y seguimiento en estas zonas. Los nitratos, en general, se mantienen en concentraciones bajas en la región, aunque los valores más elevados también se concentran en Ramos Arizpe.

La calidad del agua está controlada mayormente por factores geológicos; sin embargo, existen puntos específicos que requieren monitoreo para garantizar su adecuada gestión y uso.

VI BIBLIOGRAFÍA.

- AGUILAR, M. (2014). Análisis de Agua, Determinación de Cloruros Totales en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas. *Secretaría de Economía*, 45-57.
- ALAO, J. O., BELLO, A. Y., LAWAL, H. A., & ABDULLAHI, D. (2024). Assessment of groundwater challenge and the sustainable management strategies. *Results in Earth Sciences*, 2, 100049.
- ARGÜELLO TOVAR, J. (1996). Calidad del agua para riego. FAO AGRIS - Sistema Internacional de Ciencia y Tecnología Agrícolas. En línea en: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122610/records/67dab5bd677d8be0233b40f1>. Consultado en diciembre 2025.
- ARROYO-FIGUEROA, C., CHALÁ, DC, GUTIÉRREZ-RIBON, G. Y QUIÑONES-BOLAÑOS, E. (2024). Un marco para evaluar la calidad del agua subterránea y la relación entre la meteorización de las rocas y la hidrogeoquímica del agua subterránea en la zona tropical: Un estudio de caso del acuífero costero Arroyo Grande, en la región Caribe de Colombia. *Water* , 16 (12), 1650.
- ASHRAF, B., AGHAKOUCHAK, A., ALIZADEH, A., MOUSAVI BAYGI, M., R. MOFTAKHARI, H., MIRCHI, A., Y MADANI, K. (2017). Cuantificación del estrés antropogénico en los recursos hídricos subterráneos. *Scientific reports* , 7 (1), 12910.
- ÁVILA, J. P., & SANSORES, A. C. (2003). Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería*, 7(2), 47-54. En línea en: <https://www.redalyc.org/pdf/467/46770204.pdf>. Consultado en diciembre 2025.
- BAHADORI, A., AL-HADDABI, M. Y VUTHALURU, HB (2012). Herramienta predictiva simple para estimar la relación de adsorción de sodio y evaluar posibles problemas de infiltración en aguas residuales regeneradas. *Communications in soil science and plant analysis*, 43 (19), 2492-2503.

- BHERING, A. P., ANTUNES, I. M. H. R., MARQUES, E. A., & DE PAULA, R. S. (2021). Geological and hydrogeological review of a semi-arid region with conflicts to water availability (southeastern Brazil). *Environmental Research*, 202, 111756.
- BOLAÑOS-ALFARO, J. D., CORDERO-CASTRO, G., & SEGURA-ARAYA, G. (2017). Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Revista Tecnología en Marcha*, 30(4), 15-27.
- CAUICH-KAU, D., RÜDE, T. R., CARDONA-BENAVIDES, A., & CASTRO-LARRAGOITIA, J. (2022). Natural occurrence and controls of arsenic in groundwater in a semiarid basin in the Mexican Altiplano. *Hydrogeology Journal*, 30(8), 2459-2477.
- CÉSPEDES, J. M. N., ANGUIANO, J. H. H., CONCEPCIÓN, P. C. A., SARMIENTO, C. D., MARTÍNEZ, J. L. M., KNAPPETT, P. S. & ZHA, X. (2024). Influence of climate variability on change in storage of overexploited aquifers in a semi-arid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(3), 2087-2103.
- CHADHA, DK (1999). Propuesta de un nuevo diagrama para la clasificación geoquímica de aguas naturales y la interpretación de datos químicos. *Revista de Hidrogeología*, 7 (5), 431-439.
- COAHUILA PA' DELANTE, 2025. Datos Municipios. En línea en : <https://coahuila.gob.mx/micrositios/index/datos-municipios> consultado en noviembre 2025.
- CONAGUA, (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-014-CONAGUA-2003, requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CRUZ, RAC (2022). Evaluación de la calidad del agua mediante la bioindicación de macroinvertebrados acuáticos, en un tramo del río Toribio, ciénaga Magdalena, Colombia. *Ciencia e Ingeniería*: 9 (2), 7.
- DAY, J. Y DALLAS, H. (2011). Fundamentos de la calidad del agua. Planificación y gestión de recursos hídricos. Cambridge University Press, Cambridge , 68-89.

- DOF. (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2000, salud ambiental. agua para uso y consumo humano. límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Estados Unidos Mexicanos.- Secretaría de Salud.
- DOF. (2021) Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Estados Unidos Mexicanos. - Secretaría de Salud.
- ESRI, 2025. Qué es Arc-Map?. En línea en: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/map/main/what-is-arcmap-.htm>.
- FUNDACIÓN VILLA DE PATOS, A.C. & INSTITUTO MEXICANO PARA EL DESARROLLO COMUNITARIO, A.C. (2018). *Informe Derramadero: La “Ciudad Modelo” y el Agua en Saltillo, Coahuila*. Agua.org.mx. En línea en: <https://agua.org.mx/biblioteca/informe-derramadero-la-ciudad-modelo-y-el-agua-en-salttillo-coahuila/>. Consultado en noviembre 2025.
- GARCÍA, J. C. A., & VERÓN, J. A. S. (2020). Evaluación de la calidad de agua para riego mediante el empleo de criterios actualizados. *Semiárida*, 30(2), 82-82.
- GIRI, S., TIWARI, A. K., MAHATO, M. K., & SINGH, A. K. (2025). Major ion chemistry and suitability of groundwater resources for different utilizations in mica mining areas, Jharkhand, India. *Geochemical Transactions*, 26(1), 5.
- HEATON, T. 1985. Isotopic and chemical aspects of nitrate in the ground water of the Springbok Flats. *Water, SA*. Vol. 11, No. 4, pp. 199-208. En línea en <https://www.redalyc.org/pdf/467/46770204.pdf>. Consultado en diciembre 2025.
- JADOON, W. A., ZAHEER, M., TARIQ, A., SAJJAD, R. U., & VAROL, M. (2024). Assessment of hydrochemical characteristics, health risks and quality of groundwater for drinking and irrigation purposes in a mountainous region of Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(31), 43967-43986.
- JMFILTEC.(2025). Impacto de la concentración del ion cloro en el tratamiento del agua en la selección del acero inoxidable. En línea

en:<https://www.jmfiltec.com/news/the-impact-of-chloride-ion-concentration-in-water-85251092.html?utm.com>. Consultado en diciembre 2025.

LAURA GARCÍA J., (2018). Problemáticas económicas del agua en México. Ciencia UNAM. En línea en: <https://ciencia.unam.mx/leer/775/problematicas-economicas-del-agua-en-mexico>. Consultado en octubre 2025.

LIMA, IQ, MUÑOZ, MO, RAMOS, OER, BHATTACHARYA, P., CHOQUE, RQ, AGUIRRE, JQ Y SRACEK, O. (2019). Evaluación hidroquímica con respecto a arsénico y otros oligoelementos en la Cuenca del Bajo Katari, Altiplano boliviano. Agua subterránea para el desarrollo sostenible, 8, 281-293.

MADRIGAL-SOLÍS, H., JIMÉNEZ-GAVILÁN, P., VADILLO-PÉREZ, I., FONSECA-SÁNCHEZ, A., CALDERÓN-SÁNCHEZ, H., QUESADA-HERNÁNDEZ, L., & GÓMEZ-CRUZ, A. (2022). Discriminant model and hydrogeochemical processes for characterizing preferential flow paths in four interconnected volcanic aquifers in Costa Rica. Hydrogeology Journal, 30(8), 2315-2340.

MAMUN, A. (2025). Asociaciones elementales con nitratos en aguas subterráneas en la región noreste de Arabia Saudita: Implicaciones para la gestión sostenible del agua. Limnological Review, 25 (2), 12.

MOSTAFA, G. A., ALHUSAIN, A. S., EL-TOHAMY, M. F., & ALRABIAH, H. (2024). Evaluation of some anions in groundwater in Riyadh, Saudi Arabia, and human health risk assessment of nitrate and fluoride. Scientific Reports, 14(1), 24752.

NAMADI, P., HE, M., & SANDHU, P. (2023). Modeling ion constituents in the Sacramento-San Joaquin Delta using multiple machine learning approaches. Journal of Hydroinformatics, 25(6), 2541-2560.

NAVAS, M. B., BIDEBERRIPE, H. P., CABELLO, C. I., GAZZOLI, D., CASELLA, M. L., & JAWORSKI, M. A. (2021). Use of PdCu catalysts supported on zirconia-ceria based supports for the elimination of oxyanions present in water. Catalysis Today, 372, 154-163.

PEINADO-GUEVARA, H, GREEN-RUIZ, C, HERRERA-BARRIENTOS, J, ESCOLERO FUENTES, O., DELGADO-RODRÍGUEZ, O, BELMONTE-JIMÉNEZ, S, &

- LADRÓN DE GUEVARA, M. (2012). Relación entre concentración de cloruros y conductividad eléctrica en aguas subterráneas y su estimación a partir de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en Guasave, Sinaloa, México.
- PINO-VALLEJO, M., BASANTES, F. V., PAZMIÑO MONTERO, M., & ANDRADE OROZCO, P. (2021). Efectividad de los lechos filtrantes en la reducción de sulfatos y carbonato de calcio en el agua de consumo humano. *Perfiles*, 1(26), 83-89.
- POLEMIO, M. Y VOUDOURIS, K. (2022). Gestión de recursos hídricos subterráneos: conciliación de la demanda, la calidad de los recursos y la sostenibilidad. *Wáter* 14 (13), 2107.
- PUÑALES, T. T., & AGUILAR, C. B. (2016). La calidad del agua para el riego. Principales indicadores de medida y procesos que la impactan. *Revista Científica Agroecosistemas*, 4(1),46-61. En línea en ([https://www.gipuzkoa.eus/documents/2227195/2228975/recomencriteriosdeinterpretacionaguas.pdf/c52b6626-2092-ca14-e596f189dd8eef9b#:~:text=Carbonato%20s%C3%B3dico%20residual%20\(RSC\),de%20sodio%20no%20ha%20variado](https://www.gipuzkoa.eus/documents/2227195/2228975/recomencriteriosdeinterpretacionaguas.pdf/c52b6626-2092-ca14-e596f189dd8eef9b#:~:text=Carbonato%20s%C3%B3dico%20residual%20(RSC),de%20sodio%20no%20ha%20variado)). Consultado e noviembre 2025.
- QUANDT, A., LARSEN, A. E., BARTEL, G., OKAMURA, K., & SOUSA, D. (2023). Sustainable groundwater management and its implications for agricultural land repurposing. *Regional Environmental Change*, 23(4), 120.
- RODRÍGUEZ, I. A., SILVA, R. P., & REYES, A. M. (2010). Determinación de sulfato por el método turbidimétrico en aguas y aguas residuales. Validación del método. *Revista cubana de química*, 22(3), 39-44.
- ROJAS SCHEFFER, V. (2024). Application of hydrogeological models coupled with agent-based models to address sustainable groundwater management in Latin America. *Hydrogeology Journal*, 32(4), 935-949.
- ROY, P. D., GARCÍA-ARRIOLA, O. A., SELVAM, S., VARGAS-MARTÍNEZ, I. G., & SÁNCHEZ-ZAVALA, J. L. (2023). Evaluation of water from Lake Coatetelco in central-south Mexico and surrounding groundwater wells for drinking and irrigation,

and the possible health risks. *Environmental Science and Pollution Research*, 30 (54), 115430-115447.

SANCHIS, I., DÍAZ, E., PIZARRO, A. H., RODRÍGUEZ, J. J., & MOHEDANO, A. F. (2020). Effect of water composition on catalytic reduction of nitrate. *Separation and Purification Technology*, 255, 117766.

SARWAR, T., SHAKOOR, H., KHAN, J., SHAH, A. A., AMIN, S., SAJJAD, A., & IQBAL, J. (2022). Analysis of Water Quality Using Physico-Chemical Parameters in Different Cities of Pakistan. *International Journal of Chemistry*, 14 (2), 28.

SCHAEFFER, A., KÄSTNER, M., & TRAPP, S. (2018). Improving the interpretation of Non-Extractable Residues (NER) in degradation assessment. In SETAC Europe 28th Annual Meeting (pp. 343-344). Society of Environmental Toxicology and Chemistry.

SCHEIBER, L., TEIXIDÓ, M., CRIOLLO, R., LABAD, F., VÁZQUEZ-SUÑÉ, E., IZQUIERDO, M., & DE CASTRO, D. (2022). ASSET project: Assessing sustainable urban drainage system (SUDS) efficiency to reduce urban runoff water contamination. *Advances in Geosciences*, 59, 37-44.

SHOJAEIAN, M. R., KARIMIDASTENAEI, Z., RAHMATI, O., & HAGHIGHI, A. T. (2021). Assessing morphological changes in a human-impacted alluvial system using hydro-sediment modeling and remote sensing. *International Journal of Sediment Research*, 36 (3), 439-448.

SÓRIA, M., TAVARES, V. E. Q., PINTO, M. A. B., STUMPF, L., ZARNOTT, D., BUBOLZ, J., & NÖRENBERG, B. G. (2020). Evaluation of physicochemical water parameters in watersheds of southern Brazil. *Revista Ambiente & Água*, 15, e2596.

SOUSA, A. F., WEBER, O. B., CRISOSTOMO, L. A., ESCOBAR, M. E. O., & DE OLIVEIRA, T. S. (2017). Changes in soil soluble salts and plant growth in a sandy soil irrigated with treated water from oil extraction. *Agricultural Water Management*, 193, 13-21.

SUAREZ, D. L., WOOD, J. D., & LESCH, S. M. (2006). Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agricultural water management*, 86(1-2), 150-164.

USDA (1954). *Saline and alkali soils*. United States Salinity Laboratory Staff. Agriculture Handbook No. 60

VALENZUELA, L. C. (2014). *La química del agua*. México: Plaza y Valdés. En línea en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/49297147/la_quimica_del_agua-libre.pdf?1475437000=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLa_quimica_del_Agua.pdf&Expires=1768354502&Signature=EOwqtx0oebWCiesBwVwVcaHREcv3rkHwR1Np1ex7cAyeMvS5vfVxo9B0XdbaezxR2Ud8nrQizX6sYdrloLGFWE26O~lq-cOP~h8XEYyoAgikrhlI6FL86mYA-u9d86Mh1LsZK8GzG5kVKzKbiUk-9cJanuqjFgrY3HeP6l~Zk8cJhv4vaURtOSj-WG55eqHYPM43fsmmQdxHpP3r6TozGoj~DYfzIBVFupTqrx8Ozi2RcTAKxiLvtPUbsEadYzEzrjP-hRCCOA1CVDmWcH4Ee56t0n5eSbVpe4lz40hOfYAOEDoEy-yE7WRQ48RKzu1JBgoq2l1ZQ28cwsRMm-UQ_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA . Consultado noviembre 2025

WHIG, P., & AHMAD, S. N. (2016). Modelling and simulation of economical water quality monitoring device. *Journal of Aquaculture & Marine Biology*, 4(6), 1-6.

WU, W. Y., LO, M. H., WADA, Y., FAMIGLIETTI, J. S., REAGER, J. T., YEH, P. J. F., ... & YANG, Z. L. (2020). Divergent effects of climate change on future groundwater availability in key mid-latitude aquifers. *Nature communications*, 11(1), 3710.

XIAO, Y., WANG, J. Y ZHOU, J. (2025). La hidrosfera bajo el impulso de la actividad humana y el cambio climático: estado, evolución y estrategias. *Sustainability*, 17 (7), 3257.

XUE, D., DAI, H., LIU, Y., LIU, Y., ZHANG, L. Y LV, W. (2022). Simulación de la interacción del agua de la zona vadosa y el agua subterránea en el oasis de Cele: evaluación del impacto de la intensificación agrícola, noroeste de China. *Agriculture*, 12 (5), 641.

ZEPEDA, F. M. (2008). Efecto de la relación de iones cloruro y sulfato en el comportamiento frente a la corrosión del acero aisi 1018 (doctoral dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México). En línea en:<https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2008/octubre/0635167/0635167.pdf>. Consultado en noviembre 2025.