

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA, LEON
UNAN-LEON
DIRECCIÓN DE ÁREA DE CONOCIMIENTO DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
DIRECCIÓN ESPECÍFICA DE QUIMICA



TRABAJO MONOGRAFICO PARA OPTAR AL TITULO DE LICENCIADO EN QUIMICA

Estudio de la calidad del agua subterránea en el municipio de Posoltega, Nicaragua para usos Industriales, agrícola y consumo humano.

AUTORES:

- Br. Marcos Antonio Palma Hernández.
- Bra. Yosani Rashell Martínez Méndez.
- Bra. Anielka María rosales.

TUTOR.

MSc. Manuel Antonio Vanegas Carvajal.

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por brindarme la salud, la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi tutor, MSc. Manuel Vanegas, por su orientación técnica, disposición constante y valiosos aportes durante el desarrollo de esta monografía. Su guía fue fundamental para mantener el enfoque científico y metodológico del trabajo.

A las autoridades, personal docente y administrativo de la facultad de ciencias y tecnologías, por facilitarme el acceso a los recursos académicos e institucionales requeridos para llevar a cabo esta investigación.

A mi familia, por su acompañamiento incondicional, comprensión y respaldo moral a lo largo de este proceso. A mis padres, en particular, por ser ejemplo de esfuerzo y compromiso, y por alentarme a perseverar en cada etapa de mi formación profesional.

Agradezco también a mis compañeros y amistades que me acompañaron durante este camino, por sus palabras de ánimo, su colaboración y su apoyo solidario en los momentos clave.

Finalmente, extendiendo mi reconocimiento a todas aquellas personas e instituciones que, directa o indirectamente, contribuyeron al desarrollo de esta investigación. A todos, muchas gracias.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes han sido fundamentales en mi formación académica y profesional.

A mis padres, por inculcarme el valor del conocimiento, la disciplina y el compromiso, elementos que han sido esenciales para alcanzar este logro.

A mi familia, por su respaldo constante y su comprensión durante las exigencias propias del proceso investigativo.

Y a todas las personas que, desde el ámbito académico o personal, aportaron directa o indirectamente a mi desarrollo como profesional, esta monografía representa el resultado del esfuerzo colectivo, el acompañamiento oportuno y la convicción en el valor del conocimiento técnico y científico.

RESUMEN

En la presente monografía se evalúa la calidad fisicoquímica del agua subterránea en siete pozos ubicados en el municipio de Posoltega, Nicaragua, durante las estaciones seca (marzo) y lluviosa (octubre) del año 2024. El estudio se enfocó en analizar parámetros clave como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales (TDS), dureza, alcalinidad, nitratos, nitritos, cloruros, sulfatos, flúor, hierro, sodio, calcio, magnesio, potasio y bicarbonato, con el fin de determinar la aptitud del recurso hídrico para consumo humano, uso agrícola e industrial.

Los resultados evidenciaron variaciones estacionales significativas, con un aumento general de la salinidad en época seca debido a la concentración por evaporación y una ligera dilución en la estación lluviosa por efecto de la recarga hídrica. Sin embargo, todos los parámetros evaluados se mantuvieron dentro de los límites permisibles establecidos por la Norma (CAPRE, 2010) para potabilidad. El contenido de nitratos fue moderado en todos los pozos, sin exceder los 50 mg/L, aunque algunos valores se acercaron al límite recomendado, especialmente en el pozo 2. Los pozos 3 y 4 destacaron por su baja mineralización y estabilidad estacional, siendo los más aptos para consumo humano y riego.

En relación con el uso agrícola, el agua fue clasificada como excelente a aceptable según los estándares de Texas A&M (2003), aunque los niveles de nitrato superaron los valores recomendados para cultivos sensibles, lo que sugiere la necesidad de considerar su aporte dentro del manejo nutricional. Para uso industrial, tomando como referencia las directrices de la EPA (2004), ningún pozo cumplió completamente los criterios sin tratamiento, debido principalmente al exceso de nitratos y alcalinidad; no obstante, los pozos 1 y 4 presentaron las menores desviaciones, siendo viables con acondicionamientos previos.

ABSTRACT

This monograph evaluates the physicochemical quality of groundwater from seven wells located in the municipality of Posoltega., Nicaragua, during the dry (March) and rainy (October) seasons of 2024. The study focused on analyzing key parameters such as pH, electrical conductivity, total dissolved solids (TDS), hardness, alkalinity, nitrates, nitrites, chlorides, sulfates, fluoride, iron, sodium, calcium, magnesium, potassium, and bicarbonate to determine the suitability of the resource for human consumption, agricultural use, and industrial applications.

The results revealed significant seasonal variations, with increased salinity during the dry season due to evaporation-induced concentration, and dilution effects during the rainy season as a result of aquifer recharge. However, all measured parameters remained within the permissible limits established by (CAPRE, 2010) for drinking water. Nitrate concentrations were moderate and below the 50 mg/L limit in all wells, although some values—particularly in well 2—approached the maximum. Wells 3 and 4 stood out for their low mineral content and seasonal stability, making them the most suitable for drinking and irrigation purposes.

For agricultural use, the water was classified as excellent to acceptable according to Texas A&M (2003) standards, although nitrate levels exceeded the recommended threshold for sensitive crops, suggesting the need to account for their nutrient contribution in fertilization planning. Regarding industrial use, based on EPA (2004) guidelines, none of the wells fully met the reuse criteria without prior treatment, mainly due to excess nitrate and alkalinity. However, wells 1 and 4 showed fewer deviations and could be considered viable after conditioning

Carta de autorización del tutor



Universidad
Nacional Autónoma de
Nicaragua UNAN-
León

Dr. Sergio López

Jefe Dirección de Química.
Su despacho.

MANUEL ANTONIO VANEGAS CARVAJAL, profesor Titular de la Dirección de Química de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua y director de la Monografía titulada ***“ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL MUNICIPIO DE POSOLTEGA, NICARAGUA, PARA USOS INDUSTRIALES, AGRICOLA Y CONSUMO HUMANO”***.

HACE CONSTAR QUE:

Los Bachilleres: Br. Marcos Antonio Palma Hernández, Bra. Yosani Rashell Martínez Méndez, y Bra. Anielka María Rosales, han realizado el presente trabajo de investigación para aspirar al título de Licenciado en Química.

Como responsable de la dirección y supervisión tanto de los distintos aspectos del trabajo, como de su redacción, considera que el trabajo reúne los requisitos y la estructura académica requeridos para ser presentado y defendido ante un jurado.

Y para que así conste, expido y firmo la presente en la ciudad de León a los veintiséis días del mes de mayo del año dos mil veinticinco.

Fdo. Manuel Antonio Vanegas
Carvajal Profesor Titular
Departamento de Química, UNAN-León.

CC. archivo

INDICE

I. INTRODUCCION	1
II. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objeto específico	2
III. MARCO TEÓRICO	3
3.1. AGUA SUBTERRÁNEA.	3
3.1.1. El ciclo hidrológico del agua subterránea.	3
3.1.2. La importancia del agua subterránea como recurso.	3
3.1.3. Los problemas del agua subterránea.....	4
3.1.4. Contaminación del agua subterránea	4
3.1.5. Gestión sostenible de las aguas subterránea	5
3.2. ACUIFEROS.	6
3.2.1. Definición y función de los acuíferos.....	6
3.2.2. Tipos acuíferos según su estructura	6
3.2.3. Características y propiedades de los acuíferos.	7
3.3. MANANTIALES.....	16
3.3.1. Tipos de Manantiales.....	16
3.3.2. Características de los Manantiales	17
3.4. CONEXIÓN HIDRÁULICA ENTRE LOS ACUÍFEROS Y LAS SUPERFICIES DE AGUA LIBRE.....	18
3.4.1. Tipos de conexiones hidráulicas	18
3.5. LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.	19
3.5.1. Normas, directrices y estándares de calidad del agua subterránea para diferentes usos: humano, industrial y agrícola.	19
3.6. LOS USOS DE AGUA SUBTERRANEA.	20
3.7 LA VARIACION ESTACIONAL DEL AGUA SUBTERRANEA.....	28
3.8. EL MUNICIPIO DE POSOLTEGA.	32
IV. DISEÑO METODOLOGICO.....	34
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
5.1. AGUA PARA CONSUMO HUMANO.....	39
5.2. AGUA PARA USO EN LA INDUSTRIA QUIMICA.....	57

5.3. AGUA PARA USO AGRICOLA	72
VI. CONCLUSIONES	87
VII. BIBLIOGRAFIA	88
VIII. ANEXOS	95

I. INTRODUCCION

El agua subterránea representa uno de los recursos naturales más importantes para el abastecimiento humano, el desarrollo agrícola y las actividades industriales, especialmente en zonas rurales donde el acceso a fuentes superficiales es limitado. Su disponibilidad, calidad y sostenibilidad son factores clave para garantizar la salud pública, la seguridad alimentaria y el crecimiento económico. No obstante, la calidad de este recurso puede verse afectada por fenómenos naturales, como la variación estacional de las precipitaciones, así como por actividades antrópicas como la agricultura intensiva, el uso de agroquímicos, la deforestación y la ocupación del suelo sin planificación.

En el municipio de Posoltega, ubicado en el departamento de Chinandega, Nicaragua, el agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento para el consumo humano, así como para el riego de cultivos agrícolas como caña de azúcar y maní, y para ciertas actividades industriales emergentes. Sin embargo, a pesar de su relevancia estratégica, existe escasa información técnica actualizada sobre la calidad de este recurso en la zona, y sobre cómo varía en función de las condiciones estacionales. Esta carencia limita la capacidad de las autoridades locales y de los usuarios para tomar decisiones informadas respecto al uso y manejo sostenible del acuífero.

Ante esta situación, se hace necesario realizar una evaluación técnica detallada de la calidad del agua subterránea en la región, considerando parámetros fisicoquímicos clave y su comportamiento en distintas épocas del año. En particular, resulta fundamental conocer el grado de cumplimiento de la normativa nacional para consumo humano (CAPRE, 2010), así como de los estándares internacionales para usos agrícolas (Texas A&M, 2003) e industriales (EPA, 2004), con el fin de determinar la aptitud del recurso para los diferentes fines a los que se destina en la localidad.

Esta investigación se propone estudiar la calidad del agua subterránea en siete pozos del municipio de Posoltega durante las estaciones seca (marzo) y lluviosa (octubre) del año 2024. A través del análisis de parámetros como pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos, dureza, alcalinidad, nitratos, cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio, hierro y otros componentes relevantes.

II. OBJETIVOS

Estudiar la calidad del agua subterránea del municipio de Posoltega, Nicaragua, para usos Industriales, agrícolas y consumo humano.

2.1 Objeto específico.

- Determinar los valores de parámetros, incluyendo conductividad eléctrica, pH, turbidez, temperatura, sólidos disueltos, dureza, así como las concentraciones de calcio, magnesio y alcalinidad, en las aguas subterráneas del municipio de Posoltega durante el periodo de marzo y octubre de 2024., con el propósito de evaluar su idoneidad para consumo humano, uso industrial e irrigación agrícola.
- Realizar un análisis exhaustivo de la composición química de las aguas subterráneas en el municipio de Posoltega, abordando parámetros como el índice de saturación, concentraciones de sodio, calcio, magnesio, potasio, hierro, bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato, nitrito y flúor, durante el periodo de marzo y octubre de 2024.
- Realizar un análisis comparativo estacional (invierno y verano) de los parámetros fisicoquímicos de los pozos, identificando variaciones significativas que puedan afectar la calidad del agua subterránea durante distintas épocas del año.
- Valorar la aplicabilidad del agua subterránea del municipio de posoltega para usos Industriales, agrícolas y consumo Humano.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. AGUA SUBTERRÁNEA.

Las aguas subterráneas se refieren al conjunto de agua almacenada en el subsuelo, saturando completamente los poros y fisuras del terreno. Estas aguas se encuentran bajo la superficie terrestre, específicamente por debajo del nivel freático. El nivel freático es el punto superior de la zona saturada de un acuífero, donde el agua se encuentra a presión atmosférica.(Fernández Ferrer, 2011)

Según (Ordoñez, 2011) desde tiempos antiguos, el origen de las aguas subterráneas ha sido un enigma que ha inquietado a la humanidad. Aunque la teoría de la infiltración sugiere que estas aguas provienen directamente de las lluvias o nieves que se filtran en el suelo, o indirectamente de ríos y lagos, no fue ampliamente aceptada hasta tiempos más recientes

3.1.1. El ciclo hidrológico del agua subterránea.

El ciclo hidrológico es una secuencia de etapas que implica el movimiento del agua desde la tierra hacia la atmósfera y de regreso a la tierra. Estas etapas incluyen la evaporación desde el suelo, el mar o las aguas continentales, la condensación de nubes, la precipitación, la acumulación en el suelo o en masas de agua, y la reevaporación. Este proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente se debe principalmente a dos factores: la energía solar que provoca la evaporación y la gravedad terrestre que causa la condensación y el descenso del agua en forma de precipitación y escurrimiento.(Ordoñez, 2011)

3.1.2. La importancia del agua subterránea como recurso.

El agua subterránea es fácilmente accesible y de vital importancia para un tercio de los sistemas de riego y el abastecimiento de la población mundial. En las últimas décadas del siglo pasado, su uso ha experimentado un crecimiento espectacular. Los agricultores de países pobres en zonas áridas y semiáridas han aprovechado esta fuente sin ayuda técnica ni económica gubernamental, lo que ha sido muy eficaz para aliviar la pobreza.

La principal razón detrás de este fenómeno es que el costo del agua subterránea es significativamente menor en comparación con el desarrollo de embalses y canales. Además, su uso puede realizarse cerca del punto de extracción y proporciona un seguro contra las sequías, ya que la mayoría de los acuíferos tienen un almacenamiento de agua decenas o centenares de veces superior a su alimentación media anual. Es fundamental considerar las aguas subterráneas en conjunto con las aguas superficiales en planificación y gestión del agua para garantizar su disponibilidad a largo plazo y preservar la calidad de este recurso indispensable.(Sahuquillo et al., 2009)

3.1.3. Los problemas del agua subterránea.

Los factores de la degradación de las aguas subterráneas son cruciales debido a dos amenazas principales: la sobreexplotación y la contaminación. La urbanización, industrialización y prácticas agrícolas intensivas han aumentado la demanda de agua subterránea como fuente confiable. Sin embargo, este uso excesivo puede agotar los acuíferos. Además, la contaminación de las aguas subterráneas es un problema grave. Las descargas de aguas residuales y productos químicos industriales pueden afectar tanto el agua subterránea como los arroyos. El saneamiento inadecuado también puede causar contaminación severa. (Mark Smith & Laban, 2020)

3.1.4. Contaminación del agua subterránea

Existen diversos tipos de contaminación del agua subterránea, dependiendo del origen y la naturaleza de los contaminantes. Los principales tipos de contaminación incluyen la contaminación química y biológica. Cada una de estas formas de contaminación afecta de manera distinta la calidad del agua subterránea y tiene impactos específicos en el medio ambiente y la salud humana.

Contaminación química

La contaminación química es la forma más común y abarca una amplia gama de sustancias, tanto orgánicas como inorgánicas. Entre las principales fuentes se encuentran los productos agrícolas (pesticidas, herbicidas y fertilizantes), desechos industriales, productos químicos tóxicos y metales pesados. Estos contaminantes pueden infiltrar los suelos y llegar a los acuíferos a través de procesos de lixiviación o escorrentía superficial. Según (Shukla et al., 2021), el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura ha resultado en niveles peligrosamente altos de nitratos en el agua subterránea, lo que representa una amenaza para la salud pública.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV), que incluyen solventes, hidrocarburos y productos derivados del petróleo, también son una fuente importante de contaminación química. Los COV son comúnmente liberados por actividades industriales y pueden persistir en el agua subterránea durante largos períodos, ya que son difíciles de degradar. (Zhao et al., 2020)

Contaminación biológica

La contaminación biológica del agua subterránea ocurre cuando microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos, ingresan a los acuíferos. Este tipo de contaminación es frecuentemente el resultado de la infiltración de aguas residuales no tratadas o de sistemas sépticos mal mantenidos. En áreas rurales o en zonas con infraestructura de saneamiento deficiente, este tipo de contaminación es común. Los patógenos biológicos pueden causar enfermedades graves, como la diarrea, cólera y hepatitis. (Dong et al., 2024)

Además, la infiltración de residuos agrícolas, particularmente el estiércol, puede introducir bacterias como *Escherichia coli* en los acuíferos, contaminando el agua subterránea y representando un riesgo significativo para la salud humana, especialmente en áreas donde los acuíferos se utilizan para agua potable. (Dong et al., 2024)

Los coliformes fecales, también llamados coliformes termotolerantes, son un subgrupo de los coliformes totales que pueden crecer a temperaturas elevadas, específicamente alrededor de 44.5°C. Esta característica los convierte en indicadores más precisos de contaminación fecal reciente, ya que otras bacterias coliformes pueden estar presentes en el ambiente sin estar relacionadas con fuentes fecales. Su detección en agua subterránea puede señalar la infiltración de aguas residuales o desechos animales, lo que plantea riesgos significativos para la salud pública, particularmente en áreas que dependen de pozos o acuíferos para el suministro de agua.

Los coliformes totales, por otro lado, incluyen una variedad más amplia de bacterias que pueden encontrarse tanto en ambientes naturales como artificiales, como el suelo, la vegetación y los sistemas de distribución de agua. Aunque no todos los coliformes totales son de origen fecal, su presencia en agua subterránea sigue siendo un indicativo de una posible intrusión de contaminación ambiental que requiere atención. Diversos estudios han encontrado correlaciones entre la presencia de coliformes totales en acuíferos y prácticas agrícolas o el uso inadecuado de fertilizantes orgánicos. (Iván et al., 2015)

El análisis de coliformes en el agua subterránea generalmente sigue protocolos establecidos por la (CAPRE, 2010) los cuales recomiendan límites estrictos para la presencia de estas bacterias en agua potable. De acuerdo con la norma, cualquier presencia de coliformes fecales en agua potable se considera un incumplimiento sanitario y debe ser tratado de inmediato. Las investigaciones también han demostrado que la distribución de coliformes fecales y totales puede variar significativamente con las estaciones, siendo más prevalentes durante las épocas de lluvia cuando aumenta la infiltración de aguas superficiales contaminadas en los acuíferos

3.1.5. Gestión sostenible de las aguas subterránea

La gestión sostenible de las aguas subterráneas es crucial para preservar la biodiversidad en ecosistemas que dependen de este recurso. Los cambios en los niveles, la cantidad y la calidad del agua subterránea pueden afectar negativamente manantiales, ríos, lagos, humedales y bosques. La conservación de estos ecosistemas está estrechamente ligada a una gestión responsable del agua subterránea, que también contribuye a mantener su recarga. Trabajar en conjunto con la gestión de ecosistemas garantiza la disponibilidad continua del agua subterránea y los beneficios que brinda a estos sistemas naturales. (Mark Smith & Laban, 2020)

La gestión sostenible de las aguas subterráneas es fundamental para lograr un desarrollo resiliente al cambio climático. Además de contribuir al cumplimiento de objetivos como la seguridad alimentaria, el desarrollo energético y el acceso al agua potable, el agua subterránea abastece a ciudades sostenibles e industrias. Para lograr una gestión

sostenible, es crucial coordinar esfuerzos entre usuarios locales, especialistas técnicos y tomadores de decisiones en la gestión de aguas superficiales. Cada uno desempeña un papel, ya sea a nivel local, de cuenca, nacional o internacional, para implementar estrategias colaborativas y participativas que promuevan la gestión sostenible del agua subterránea. Esta gestión es esencial para enfrentar los desafíos del cambio climático y garantizar un futuro hídrico seguro y equitativo. (Mark Smith & Laban, 2020)

3.2. ACUIFEROS.

3.2.1. Definición y función de los acuíferos.

Los acuíferos son formaciones geológicas con propiedades hidráulicas que permiten el almacenamiento y la transmisión libre de agua a través de sus poros o grietas. Desde un punto de vista práctico, un acuífero debe ser capaz de retener y transportar agua en cantidades susceptibles de ser explotadas económicamente. Las formaciones arcillosas pueden almacenar grandes volúmenes de agua, pero no la transmiten con facilidad, por lo que no se consideran verdaderos acuíferos. (Fuentes, 2017)

Un acuífero se comporta como un embalse, donde es necesario considerar tres aspectos: el caudal de entrada, el caudal de salida y la capacidad de almacenamiento y regulación. El caudal de entrada, generalmente, proviene del agua infiltrada por precipitaciones, aguas superficiales, ríos y aguas residuales. En condiciones normales, el agua se descarga a través de manantiales, ríos, acuíferos vecinos o hacia el mar. Cuando los acuíferos son explotados por el ser humano, también se extrae agua mediante bombeo. La capacidad de almacenamiento del acuífero depende de su volumen (determinado por su extensión y espesor) y su porosidad. La reserva es la cantidad de agua almacenada en el acuífero, y se distingue entre una reserva variable, que fluctúa según las entradas y salidas de agua, y una reserva invariable, que no depende de estos cambios. La reserva variable puede explotarse indefinidamente, mientras que la reserva invariable solo se puede extraer una vez, a menos que se recargue con aguas superficiales. (Fuentes, 2017)

3.2.2. Tipos acuíferos según su estructura

Acuífero libre o freático

En los acuíferos freáticos, el agua satura los poros y fracturas de la formación, liberándose mediante drenaje (ya sea espontáneo o inducido por el hombre). Esto da lugar a una simple desaturación. Los acuíferos libres están en contacto directo con la superficie del terreno, y la superficie freática se encuentra sometida a la presión atmosférica. Estos acuíferos son comunes en terrazas y llanuras aluviales. (Villarroya, 2009)

Acuífero confinado o cautivo

Se refieren a aquellos que se encuentran completamente aislados en el subsuelo, rodeados por materiales impermeables en todas sus direcciones. El nivel de agua en

estos acuíferos está por encima del techo del material acuífero. En realidad, están bajo presión debido al peso de los materiales superiores. El agua que liberan proviene de la descompresión de estas capas superiores cuando se produce una depresión en el acuífero. En realidad, no existen acuíferos completamente aislados en la naturaleza, ya que no hay materiales absolutamente impermeables capaces de aislarlos por completo. Sin embargo, en la práctica, muchos pueden considerarse como tales. Por ejemplo, formaciones permeables que permanecen cautivas en una extensión considerable y emergen en la superficie en uno de sus extremos.(Iglesias López, 2006)

Acuífero Semiconfinado

En estos casos, los materiales circundantes no son completamente impermeables. Así, la capa superior o semiconfinante está formada por materiales semipermeables, que permiten el paso del agua desde otros acuíferos superiores hacia el acuífero inferior semiconfinado. Por lo tanto, la respuesta de estos acuíferos a un bombeo es más lenta que en los acuíferos confinados, y sus radios de influencia son intermedios entre los acuíferos libres y los confinados. En realidad, un acuífero semiconfinado es un sistema físico compuesto por un acuífero superior bien abastecido, una capa semipermeable o acuitardo, y un acuífero inferior semiconfinado. La diferencia de niveles entre el acuífero superior e inferior provoca una transferencia vertical de agua que alimenta al acuífero inferior.(Iglesias López, 2006)

3.2.3. Características y propiedades de los acuíferos.

Porosidad

La porosidad en los acuíferos es un factor clave en la capacidad de estos sistemas para almacenar y transmitir agua subterránea. Se refiere al volumen de espacios vacíos o poros presentes en el material geológico, en relación con el volumen total. La porosidad puede clasificarse en diferentes tipos dependiendo de su origen y naturaleza.

Tipos de porosidad en acuíferos

Porosidad primaria

Es aquella que se forma junto con el material geológico durante su deposición o formación. Esta porosidad está presente principalmente en sedimentos no consolidados, como arenas y gravas, que poseen un alto grado de espacios intergranulares. Este tipo de porosidad es esencial para los acuíferos no consolidados, ya que permite una gran capacidad de almacenamiento y transmisión de agua.(Solís-Carcaño & Moreno, 2006). En general, los acuíferos con alta porosidad primaria, como los formados por arenas y gravas, suelen ser acuíferos de alto rendimiento.

Porosidad Secundaria

Este tipo de porosidad se forma después de que el material geológico original ya se ha consolidado, debido a procesos geológicos como la fracturación, disolución o deformación. Es común en acuíferos de roca dura, como los formados en calizas o

areniscas cementadas, donde el agua crea nuevas vías de flujo a través de fracturas o disoluciones. (Net & Limarino, 2000). La porosidad secundaria puede ser clave en acuíferos kársticos, donde las cavernas y fisuras pueden almacenar grandes volúmenes de agua.

Porosidad total y porosidad efectiva

La porosidad total incluye todos los espacios vacíos en el material, tanto los que están conectados entre sí como los aislados. Sin embargo, no toda la porosidad total contribuye al almacenamiento y transmisión de agua. La porosidad efectiva, en cambio, se refiere únicamente a los poros que están interconectados y que permiten el movimiento del agua a través del acuífero. (Benavente, 2006). En el caso de las arcillas tienen una alta porosidad total debido a la gran cantidad de poros pequeños, pero su porosidad efectiva es baja porque estos poros no están bien conectados.

Porosidad Específica

La porosidad específica es la cantidad de agua que un material puede retener contra la gravedad, y está relacionada con el tamaño y la forma de los poros. Los poros más pequeños tienden a retener agua por acción capilar, mientras que los poros más grandes permiten un drenaje más fácil. Este tipo de porosidad es crucial para determinar la cantidad de agua que un acuífero puede proporcionar durante un periodo prolongado. (Gil et al., 2006)

Factores que Influyen en la Porosidad:

Forma y empaquetamiento de los granos

La porosidad de los acuíferos está influenciada por la forma y el empaquetamiento de los granos que componen las rocas. Un empaquetamiento más suelto y granos de forma irregular pueden aumentar la cantidad de espacio disponible entre los poros. Esto es crucial para la capacidad de almacenamiento de agua en los acuíferos, ya que los poros más grandes permiten una mayor retención de agua. (Trejo Corzo, 2022)

Compactación y cementación

El grado de compactación y cementación del material rocoso en los acuíferos influye significativamente en su porosidad. Los acuíferos con rocas muy compactadas tienden a tener una porosidad más baja, lo que reduce la cantidad de agua que pueden almacenar y transportar. Por el contrario, las rocas menos cementadas permiten una mayor porosidad y, por lo tanto, una mayor capacidad de almacenamiento de agua. (Ordoñez, 2011)

Influencia de los factores geológicos y ambientales

Los factores geológicos, como la edad del acuífero y los procesos de erosión o sedimentación, también juegan un papel importante en la porosidad. A medida que un acuífero envejece, los sedimentos tienden a compactarse, lo que disminuye su porosidad con el tiempo. Además, los cambios en el nivel freático y la presión ejercida sobre el

2025: 46/19 Siempre más allá ¡avanzamos en la revolución!

acuífero pueden alterar la porosidad y la capacidad del mismo para almacenar agua.(Perdomo & Rojas, 2017)

Permeabilidad

La permeabilidad de los acuíferos es una de las propiedades más importantes en hidrogeología, ya que determina la capacidad de los materiales geológicos para permitir el flujo de agua a través de ellos. Existen diversos tipos de permeabilidad que varían según la dirección del flujo y las características del material que forma el acuífero.

Permeabilidad Horizontal

La permeabilidad horizontal hace referencia a la capacidad de un acuífero para permitir el flujo de agua a lo largo de la extensión horizontal del material geológico. En muchos acuíferos, la permeabilidad horizontal tiende a ser mayor que la permeabilidad vertical debido a la disposición de los sedimentos o capas geológicas. Esto ocurre porque los estratos suelen estar más conectados horizontalmente, lo que facilita el movimiento del agua en esta dirección. Los acuíferos compuestos por materiales como gravas y arenas tienden a tener una alta permeabilidad horizontal, lo que los convierte en fuentes eficientes de agua subterránea para la extracción mediante pozos. (Villarroya, 2009)

Permeabilidad Vertical

Se refiere al movimiento del agua a través del acuífero en la dirección vertical, es decir, desde la superficie hacia el fondo o entre las distintas capas geológicas. En muchos acuíferos, la permeabilidad vertical es más baja que la horizontal debido a que las capas de sedimentos tienden a estar más compactadas en esa dirección, lo que reduce la conectividad entre los poros. Sin embargo, esta permeabilidad es crucial para la recarga de los acuíferos, ya que permite que el agua de la lluvia o de fuentes superficiales se infiltre hacia los acuíferos.(BIDNER et al., 1997)

Permeabilidad Intrínseca

La permeabilidad intrínseca es una medida de la capacidad del material que forma el acuífero para transmitir agua, sin considerar el tipo de fluido que está en movimiento. Esta propiedad es una característica inherente de los materiales porosos, como arenas, gravas, calizas y otros tipos de rocas sedimentarias. La permeabilidad intrínseca se mide en unidades de Darcy o milidarcy y depende de factores como el tamaño y la forma de los poros, así como la conectividad entre ellos.(MONTORO & FRANCISCA, 2011)

Permeabilidad Efectiva

La permeabilidad efectiva se refiere a la capacidad de un acuífero para transmitir agua cuando parte del espacio poroso está ocupado por otro fluido, como aire o gas. Esto ocurre cuando no todos los poros del acuífero están llenos de agua, lo que disminuye la permeabilidad total del sistema. La permeabilidad efectiva es especialmente relevante en acuíferos no saturados o en aquellos donde coexisten diferentes fluidos en los poros.(Castiblanco, 2017)

2025: 46/19 Siempre más allá ¡avanzamos en la revolución!

Permeabilidad Equivalente

La permeabilidad equivalente es una medida utilizada para describir el flujo de agua a través de medios porosos heterogéneos, como suelos o capas geológicas con diferentes permeabilidades. En el análisis de suelos o formaciones estratificadas, se considera que cada capa tiene una permeabilidad propia, pero se simplifica el sistema al calcular un valor promedio o global que representa el comportamiento del conjunto. (Osorio et al., 2012)

Recarga del Acuífero

La recarga de un acuífero se refiere al proceso mediante el cual el agua se infiltra desde la superficie del suelo hacia la zona saturada de un acuífero, donde se convierte en parte de las reservas subterráneas. Este fenómeno es fundamental para la reposición de los recursos hídricos subterráneos y tiene un papel crucial en la sostenibilidad de los acuíferos, especialmente en áreas donde el agua subterránea es una fuente primaria de abastecimiento. (HEATH, 1998)

La recarga puede proceder de diversas fuentes, como la precipitación directa, el flujo superficial de ríos y lagos, y el flujo subterráneo lateral proveniente de otras formaciones geológicas. En contextos urbanos o agrícolas, las actividades humanas también contribuyen a este proceso a través de la irrigación, fugas en los sistemas de abastecimiento de agua o incluso infiltraciones desde embalses y depósitos artificiales. Estos mecanismos permiten que el agua atraviese las capas del suelo hasta llegar a la zona saturada, donde comienza a alimentar las reservas subterráneas. (Vélez & Vásquez, 2004)

Tipos de recarga

Los tipos de recarga se clasifican principalmente en recarga natural y artificial, cada una con sus fuentes y mecanismos característicos.

Recarga natural

Este tipo de recarga ocurre de manera espontánea sin intervención humana y se debe principalmente a dos fuentes:

Precipitación

La lluvia que cae sobre la superficie del suelo se infiltra y desciende a través de las capas permeables del suelo hasta llegar a la zona saturada del acuífero. Esta es la forma más común de recarga en muchas regiones.

Aguas superficiales

Ríos, lagos y otros cuerpos de agua superficial también pueden contribuir a la recarga de un acuífero. Esto ocurre cuando el nivel de las aguas superficiales es más alto que el nivel del agua subterránea, permitiendo la infiltración hacia abajo.

Flujos laterales

En ciertas condiciones, el agua puede ser transferida lateralmente desde otras formaciones geológicas o acuíferos vecinos hacia el acuífero receptor.

Recarga artificial

Este tipo de recarga es inducido por la acción humana y puede provenir de varias fuentes, tales como:

Irrigación agrícola

El agua utilizada para riego que no es absorbida por los cultivos se infiltra en el suelo, contribuyendo a la recarga del acuífero. Esto es común en áreas agrícolas donde se practican técnicas intensivas de riego.

Fugas en sistemas de abastecimiento

En áreas urbanas, las fugas en las redes de distribución de agua potable o en los sistemas de alcantarillado pueden generar infiltración de agua al subsuelo, incrementando las reservas subterráneas.

Embalses y depósitos

Las filtraciones provenientes de embalses o depósitos artificiales de agua también pueden contribuir a la recarga subterránea. Esta es una estrategia utilizada en algunas regiones para aprovechar el exceso de agua en ciertas épocas del año y almacenarla en el subsuelo para su uso futuro. (Vélez & Vásquez, 2004)

Clasificaciones adicionales de recarga

Una clasificación más detallada fue propuesta por (LERNER et al., 1990), quien divide las fuentes de recarga en las siguientes categorías:

Recarga directa o difusa

Se refiere a la recarga que ocurre de manera directa desde la precipitación que se infiltra a través del suelo hasta el acuífero. Es el proceso más común en áreas donde las precipitaciones son frecuentes y el suelo es permeable.

Recarga concentrada o indirecta

Ocurre cuando el agua que recarga el acuífero proviene de cauces permanentes o temporales, como ríos o arroyos. Este tipo de recarga es más común en áreas donde los cuerpos de agua superficial cruzan regiones con suelos permeables o fracturados.

Flujos laterales

Se refiere al agua que migra de otros acuíferos o formaciones geológicas cercanas. Estos flujos laterales pueden ser una fuente significativa de recarga en sistemas acuíferos interconectados.

Retorno de riegos

El exceso de agua utilizada en la irrigación, así como las pérdidas en los canales de distribución, puede infiltrar el suelo y recargar el acuífero. Este proceso es especialmente relevante en áreas agrícolas donde se aplican grandes cantidades de agua.

Recarga urbana

Ocurre principalmente a partir de fugas en las redes de abastecimiento de agua y alcantarillado en entornos urbanos. Aunque no se planea, este tipo de recarga puede tener un impacto considerable en los acuíferos urbanos.

Variabilidad temporal de la recarga

El proceso de recarga también varía a lo largo del tiempo, dependiendo de las condiciones climáticas y las características geológicas. (BALEK, 1988) propuso una clasificación temporal de la recarga, que incluye:

Recarga a corto plazo

Ocurre esporádicamente, generalmente después de eventos de lluvia intensa. Este tipo de recarga es más común en regiones donde las estaciones húmedas y secas no están claramente definidas.

Recarga estacional

Se produce regularmente durante ciertas épocas del año, como la temporada de lluvias en climas húmedos y secos. Es una de las formas más previsibles de recarga.

Recarga histórica

Ocurrió en el pasado y contribuyó a la formación de los actuales recursos de agua subterránea. Este tipo de recarga está relacionada con el tiempo de residencia del agua en el acuífero, que puede ser de cientos o miles de años.

Importancia de la recarga en la gestión de los acuíferos

La adecuada estimación de la recarga de un acuífero es esencial para garantizar un manejo sostenible de los recursos hídricos subterráneos. Comprender la cantidad de agua que llega a un acuífero, su procedencia y las zonas específicas donde se produce la recarga o descarga es fundamental para planificar su uso a largo plazo. Esto también es relevante en estudios de transporte de contaminantes, donde se necesita conocer las áreas de recarga para evaluar la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. (Vélez & Vásquez, 2004)

Factores que Afectan la Recarga

La recarga de acuíferos es un proceso complejo que depende de una variedad de factores ambientales, geológicos y humanos. La comprensión de estos factores es crucial para la gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

Precipitación y su Variabilidad

La cantidad y distribución temporal de la precipitación es uno de los factores primarios que determinan la recarga de acuíferos. La infiltración de agua a través del suelo hacia los acuíferos depende directamente de la cantidad de lluvia disponible. Estudios sugieren que precipitaciones intensas pueden promover la recarga en ciertas condiciones geológicas, pero también pueden aumentar el riesgo de escorrentía superficial en lugar de infiltración efectiva, especialmente en suelos con baja permeabilidad o pendientes pronunciadas (HEALY, 2010). Asimismo, variaciones en el régimen de precipitaciones, como periodos de sequía prolongados, pueden reducir significativamente la recarga natural, comprometiendo la sostenibilidad de los acuíferos a largo plazo. (Sophocleous, 2002).

Características del Suelo y la Geología

La capacidad de un terreno para permitir la infiltración depende de las características geológicas y del suelo. Suelos con alta permeabilidad, como los suelos arenosos o las formaciones geológicas de grava y arena, facilitan el proceso de recarga. Por otro lado, suelos arcillosos o áreas con roca madre expuesta reducen significativamente la capacidad de infiltración, lo que limita la recarga (KONIKOW & KENDY, 2005). La estructura geológica del subsuelo, incluyendo la presencia de fracturas en rocas o la existencia de capas impermeables, también juega un papel importante en la cantidad de agua que puede alcanzar los acuíferos profundos. (Bouwer, 2002b)

Cobertura Vegetal

La vegetación tiene un papel doble en la recarga de acuíferos. Por un lado, las plantas facilitan la infiltración al mejorar la estructura del suelo y aumentar la porosidad mediante la acción de las raíces. (Jackson et al., 2005). Por otro lado, la vegetación también puede reducir la cantidad de agua disponible para la recarga debido a la transpiración. Estudios han demostrado que la presencia de bosques puede aumentar la recarga en áreas donde la precipitación es moderada y los suelos son permeables, pero en regiones áridas, los árboles pueden competir por el agua y reducir la infiltración. (FARLEY et al., 2005)

Uso de la tierra y actividades humanas

Las actividades humanas, como la agricultura, la urbanización y la deforestación, tienen un impacto considerable en la recarga de acuíferos. La urbanización, en particular, reduce la infiltración al aumentar la cantidad de superficies impermeables, como carreteras y edificios, lo que favorece la escorrentía en lugar de la recarga. (FOSTER & CHILTON, 2003). La agricultura intensiva puede tener un doble efecto: el riego artificial

puede aumentar la recarga, pero el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes puede contaminar los acuíferos, comprometiendo la calidad del agua subterránea disponible. (Scanlon et al., 2020)

Clima y cambio climático

El cambio climático está alterando los patrones de precipitación y aumentando la frecuencia de fenómenos extremos, como tormentas intensas o sequías prolongadas, lo que afecta directamente la recarga de los acuíferos. Las investigaciones indican que en muchas regiones del mundo, el aumento de la temperatura está acelerando la evaporación, lo que reduce la cantidad de agua que se infiltra en el suelo. (Taylor et al., 2013). Además, el deshielo de glaciares y la disminución de la cobertura de nieve en zonas montañosas, que actúan como reservorios naturales de agua, están reduciendo las fuentes de recarga para muchos acuíferos en áreas donde el agua de deshielo era una fuente crucial. (Barnett et al., 2005).

Regulación del agua subterránea en Nicaragua

Marco Legal y Político

Nicaragua ha desarrollado un marco legislativo para regular y proteger los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos. Este marco se fundamenta en varias leyes clave:

Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (Ley 217, 1996): Esta ley fue un punto de inflexión al declarar que el agua es un bien de dominio público. La ley reserva al Estado la propiedad de las fuentes de agua subterránea, así como las playas y los lechos de cuerpos de agua. Antes de esta ley, la regulación del agua estaba bajo el Código Civil de 1904, que priorizaba el manejo privado del recurso. (ASAMBLEA NACIONAL DE LA REPÚBLICA DE NICARAGUA, 1996)

Ley General de Aguas Nacionales (Ley 620, 2007): Esta ley establece un marco normativo integral para la administración, conservación y uso de los recursos hídricos. La Ley 620 introduce la creación de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), que es el órgano descentralizado encargado de la gestión técnica y operativa del agua en Nicaragua. ANA tiene la responsabilidad de proponer la conformación de Organismos de Cuenca y coordinar el Sistema de Información de Recursos Hídricos, encargado de monitorear la cantidad y calidad del agua subterránea y superficial. (Asamblea Nacional de la Republica de Nicaragua, 2007)

Política Nacional de los Recursos Hídricos (2001): Esta política establece el manejo integrado de los recursos hídricos basado en cuencas hidrográficas. Reconoce el agua como patrimonio nacional y enfatiza la importancia de su manejo sostenible para atender las necesidades básicas de la población, considerando factores de equidad social y de género. También aborda la vulnerabilidad ante el cambio climático, contemplando medidas preventivas para enfrentar desastres hidrológicos extremos. (FAO, 2007)

Regulación de la Extracción y Uso

La extracción de agua subterránea en Nicaragua está regulada mediante concesiones y permisos otorgados por la ANA. Para la extracción de agua con fines industriales, agrícolas o comerciales, es necesario obtener una concesión que especifique el volumen de agua a extraer y las condiciones del uso. Para el uso doméstico de pequeñas cantidades de agua, no se requiere concesión, pero se deben respetar ciertas normativas para evitar la contaminación. (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2021)

Recarga Artificial y Conservación

Aunque la recarga artificial de acuíferos no es una práctica común en Nicaragua, la ley promueve la conservación de las zonas de recarga natural, protegiendo cuencas hidrográficas y fomentando la reforestación en áreas críticas para la recarga de acuíferos. Estas medidas son fundamentales para asegurar la sostenibilidad del agua subterránea.

En las zonas del Pacífico, donde los acuíferos son más explotados, la sobreextracción ha causado una disminución de los niveles de agua subterránea. En algunas regiones, como la península de Chiltepe, se han observado problemas de intrusión salina debido a la explotación excesiva de los acuíferos costeros, lo que compromete la calidad del agua.

Los esfuerzos de conservación del agua subterránea se ven complicados por la falta de infraestructura adecuada para captar agua de lluvia y la deforestación. En la cuenca del Lago Cocibolca, la expansión de la agricultura y la ganadería han reducido la capacidad de recarga natural de los acuíferos, lo que agrava el problema de disponibilidad. (FAO, 2007)

Desafíos en la Regulación

Los desafíos en la regulación del agua subterránea en Nicaragua incluyen la falta de infraestructura adecuada para el monitoreo constante y preciso de los recursos hídricos subterráneos, especialmente en áreas rurales. Además, la contaminación por agroquímicos es una amenaza significativa para la calidad del agua subterránea, lo que requiere una mayor vigilancia y la implementación de mejores prácticas agrícolas. (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2021)

Impacto del Cambio Climático

El cambio climático está afectando gravemente la disponibilidad de agua subterránea en Nicaragua, con alteraciones en los patrones de precipitación y un aumento de la frecuencia de sequías, lo que reduce la recarga natural de los acuíferos. Esto pone en riesgo la sostenibilidad de este recurso vital y resalta la necesidad de enfoques más robustos para mitigar estos impactos. (FAO, 2007)

3.3. MANANTIALES

Un manantial es un punto de descarga natural de agua subterránea a la superficie terrestre, típicamente el resultado de la intersección de un acuífero con la topografía superficial. Esta descarga puede deberse a la presión hidráulica dentro del acuífero, que empuja el agua hacia la superficie sin intervención mecánica. Los manantiales son vitales en el ciclo hidrológico, actuando como puntos de salida del agua infiltrada en el subsuelo. (Fetter, 2018) La formación de un manantial está influenciada por factores geológicos como la permeabilidad de las rocas y la estructura del terreno. Los manantiales son una manifestación visible de los sistemas hidrogeológicos, cuyo estudio permite comprender mejor la dinámica de los acuíferos subterráneos y su interacción con el entorno superficial. (Younger, 2019)

3.3.1. Tipos de Manantiales

Existen varios tipos de manantiales que se diferencian por su origen y características geológicas:

Manantiales gravitacionales

Los manantiales gravitacionales se forman cuando el agua subterránea fluye hacia la superficie debido a la acción de la gravedad, generalmente en zonas donde las capas permeables de roca se encuentran con capas impermeables. Estos manantiales son comunes en regiones montañosas donde el agua subterránea se desplaza a través de acuíferos inclinados, hasta que emerge en la superficie debido a un cambio en la estructura geológica. La descarga de estos manantiales puede variar considerablemente en función de las precipitaciones y la topografía. La dirección y magnitud del flujo dependen de la diferencia de elevación entre el nivel freático y el punto de descarga en la superficie. (Doummar et al., 2018)

Manantiales de fisura

Estos manantiales se producen cuando el agua subterránea emerge a través de grietas o fracturas en formaciones rocosas, como resultado de la presión ejercida por el acuífero. Las fisuras actúan como conductos naturales que permiten la salida del agua. Este tipo de manantial es típico en regiones volcánicas o en áreas con intensa actividad tectónica, donde las fracturas son comunes. Los manantiales de fisura pueden tener un caudal intermitente o permanente, dependiendo de la recarga del acuífero y de las condiciones climáticas. El estudio de estos manantiales es crucial para entender la interacción entre las fallas geológicas y los sistemas acuíferos. (Bakalowicz, 2006)

Manantiales artesianos

Los manantiales artesianos surgen cuando el agua subterránea se encuentra atrapada entre dos capas de roca impermeable y se libera hacia la superficie a través de una perforación natural o artificial. La presión en el acuífero confinado es lo suficientemente alta como para que el agua fluya sin la necesidad de bombeo. Estos manantiales son característicos de acuíferos confinados, donde el agua está sometida a una presión

superior a la atmosférica. Los manantiales artesianos pueden ser permanentes si la recarga del acuífero es constante, o intermitentes si la presión disminuye por la extracción excesiva del recurso. (De la Hera-Portillo et al., 2021)

Manantiales termales

Los manantiales termales son aquellos cuya temperatura es superior a la del agua subterránea común, debido a la proximidad de fuentes de calor geotérmico, como cámaras magmáticas. Estos manantiales suelen estar asociados a zonas volcánicas activas o a áreas con actividad geotérmica significativa. El agua de estos manantiales, al circular a través de formaciones rocosas profundas, absorbe el calor de las rocas circundantes y emerge a la superficie con temperaturas elevadas. Los manantiales termales son objeto de estudio en el campo de la geotermia debido a su potencial como fuente de energía renovable. (Prasenjit et al., 2022)

Manantiales kársticos

Los manantiales kársticos se forman en terrenos compuestos por rocas carbonatadas, como calizas, que han sido disueltas por la acción del agua, creando sistemas de drenaje subterráneos. Estos manantiales tienen caudales muy variables y, en algunos casos, pueden dar lugar a ríos subterráneos. Los estudios sobre manantiales kársticos son fundamentales para la gestión de los recursos hídricos en regiones donde la recarga de los acuíferos depende de la disolución de la roca. (Bakalowicz, 2006)

3.3.2. Características de los Manantiales

Las características físicas y químicas de los manantiales están determinadas por varios factores, como el tipo de acuífero, la geología del terreno y la composición del agua subterránea.

Caudal

El caudal está influenciado por la recarga del acuífero, las condiciones climáticas y la permeabilidad del terreno. Los estudios hidrológicos del caudal de los manantiales son fundamentales para la planificación y gestión del uso del agua en comunidades dependientes de este recurso. (SPRINGER & STEVENS, 2009)

Composición Química

La calidad del agua de los manantiales está influenciada por los minerales presentes en las rocas a través de las cuales el agua subterránea se desplaza. El agua de los manantiales puede contener minerales como calcio, magnesio, sodio y potasio, y en algunos casos, trazas de elementos como hierro, manganeso y azufre. Los manantiales con alto contenido mineral a menudo se denominan aguas termales o minerales y se valoran por sus propiedades medicinales o terapéuticas. (López-Villanueva et al., 2022)

Temperatura

La temperatura del agua de un manantial depende de la profundidad y de las condiciones geotérmicas del acuífero que lo alimenta. Los manantiales termales son una excepción, con temperaturas que superan el promedio del agua subterránea. La temperatura constante de los manantiales no termales es un indicador de la profundidad y estabilidad del acuífero, y su estudio es clave para aplicaciones geotérmicas y la planificación de sistemas de enfriamiento natural. (Smith et al., 2021)

3.4. CONEXIÓN HIDRÁULICA ENTRE LOS ACUÍFEROS Y LAS SUPERFICIES DE AGUA LIBRE.

La conexión hidráulica entre acuíferos es un fenómeno que se refiere a la capacidad de intercambio de agua entre diferentes sistemas acuíferos a través de las formaciones geológicas que los separan. Esta conexión puede ser influenciada por diversos factores geológicos e hidrológicos, incluyendo la porosidad, la permeabilidad de los materiales geológicos, y las diferencias en la presión hidráulica. Entender la naturaleza de estas conexiones es fundamental para la gestión de recursos hídricos, ya que influye en la recarga de acuíferos, la dinámica de flujo subterráneo, y la disponibilidad de agua para usos humanos y ecosistemas. (Llamas & Custodio, 2002)

3.4.1. Tipos de conexiones hidráulicas

Conexión vertical: Este tipo de conexión ocurre cuando el agua se desplaza verticalmente entre un acuífero superior no confinado y un acuífero subyacente confinado. La conexión vertical es crucial en la dinámica de recarga de los acuíferos profundos, especialmente en áreas donde la capa confinante tiene una permeabilidad baja pero no nula, lo que permite un flujo lento pero continuo de agua hacia los acuíferos subyacentes. (Freeze, R. A., & Cherry, 1979)

Conexión lateral u horizontal: Las conexiones horizontales son aquellas en las que el agua fluye lateralmente entre acuíferos adyacentes. Este tipo de conexión es más común en acuíferos no confinados, donde la permeabilidad del material geológico es relativamente alta, permitiendo que el agua se mueva libremente entre diferentes partes del mismo acuífero o entre acuíferos cercanos. (Bouwer, 2002a)

Conexión a través de fallas geológicas: Las fallas geológicas pueden actuar como vías preferenciales para el flujo de agua entre acuíferos o, en algunos casos, como barreras impermeables. En regiones tectónicamente activas, las fallas pueden abrir caminos para la conexión hidráulica entre acuíferos que de otra manera estarían aislados, permitiendo el flujo de agua entre ellos. Sin embargo, estas mismas fallas pueden también actuar como trampas que retienen agua en ciertos estratos, lo que puede resultar en una alta presión hidráulica en áreas confinadas. (Fitts, 2002)

3.5. LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA.

La calidad del agua subterránea se refiere al conjunto de características físicas, químicas y microbiológicas que determinan su idoneidad para el consumo humano, agrícola o industrial. Está influenciada tanto por factores naturales, como la composición geológica del suelo y la presencia de minerales, como por actividades humanas, como la agricultura y la industria, que pueden introducir contaminantes. La calidad del agua subterránea se evalúa a través de la presencia de sustancias disueltas, microorganismos patógenos y compuestos tóxicos, y su protección depende de un monitoreo constante y un tratamiento adecuado para garantizar su seguridad y salubridad. (OMS, 2018)

3.5.1. Normas, directrices y estándares de calidad del agua subterránea para diferentes usos: humano, industrial y agrícola.

NORMA DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO

La Norma Regional de Calidad del Agua para Consumo Humano emitida por el Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (CAPRE) es aplicable en Nicaragua, al igual que en los demás países miembros de CAPRE, que incluyen Guatemala, Honduras, El Salvador, Costa Rica, Panamá y República Dominicana. Según el Artículo 1 de la norma, los países adscritos a esta normativa son aquellos que forman parte del comité, y Nicaragua se encuentra dentro de esta lista. Esto implica que Nicaragua debe cumplir con los estándares y parámetros establecidos en la normativa para garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano, en línea con los objetivos de protección de la salud pública que esta norma persigue. (CAPRE, 2010)

DIRECTRICES Y RECOMENDACIONES PARA EL USO DE AGUA REUTILIZADA EN LA INDUSTRIA QUIMICA COMO UNA FORMA DE CONSERVAR LOS RECURSOS DE AGUA DULCE.

La Guidelines for Water Reuse (EPA, 2004), no trata específicamente sobre el uso de agua subterránea en la industria, sino sobre la reutilización de aguas tratadas en diversos sectores. Sin embargo, con base en estas directrices, podemos hacer inferencias sobre los posibles requisitos, beneficios, riesgos y alternativas del uso de agua subterránea en la industria, aplicada en el contexto de reúso de agua.

ESTÁNDARES DE CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN DE LA SALINIDAD.

En Nicaragua, actualmente no existe una normativa específica que regule la calidad del agua para su uso en riego agrícola, lo que genera la necesidad de referirse a guías y estándares internacionales. Una de las fuentes más utilizadas en este contexto es Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies (University Texas, 2003), ya que ofrece parámetros claros y ampliamente aceptados para evaluar la

calidad del agua de riego, incluyendo el control de la salinidad, la relación de adsorción de sodio (SAR) y la concentración de elementos traza.

Este documento es una referencia confiable debido a su enfoque integral, que abarca no solo los límites aceptables de diversas sustancias químicas, sino también las estrategias de manejo para prevenir la degradación del suelo y la productividad agrícola. En ausencia de regulaciones locales, la adopción de estos estándares internacionales permite a los agricultores nicaragüenses asegurar que el agua utilizada no afecte negativamente los cultivos, optimizando la sostenibilidad y eficiencia del uso del agua en la producción agrícola.

3.6. LOS USOS DE AGUA SUBTERRANEA.

Uso Industrial del agua subterránea:

El uso de agua reutilizada en la industria química se ha convertido en una práctica esencial para optimizar la gestión de recursos hídricos y reducir el impacto ambiental. Esta práctica no solo ayuda a conservar agua dulce, sino que también puede reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad en los procesos industriales. Sin embargo, en Nicaragua no existe una normativa específica que regule la calidad del agua para uso industrial. Esta situación obliga a las empresas a basarse en directrices internacionales, como las Guidelines for Water Reuse de la (EPA, 2004), que proporciona un marco para garantizar que el agua reutilizada sea adecuada para los procesos industriales.

Requisitos para el uso de agua subterránea en la industria química

El agua subterránea utilizada en la industria química debe cumplir con varios requisitos de calidad para evitar dañar los equipos y garantizar que los procesos industriales funcionen de manera óptima. La calidad del agua es esencial, ya que una composición inadecuada puede interferir con los procesos de producción y reducir la eficiencia de las instalaciones.

En el caso de la industria química, el agua subterránea puede requerir tratamiento adicional para ajustarse a parámetros específicos que aseguren su adecuación para procesos como la disolución de productos químicos, el enfriamiento de equipos, y la limpieza de sistemas. En la **Tabla 1** se presenta los parámetros y los rangos máximos permisibles para el agua destinada a la industria química, basada en los criterios establecidos para el reúso de agua. (EPA, 2004).

Tabla 1. Parámetros y rangos máximos permisibles para el agua destinada a la industria química

Parámetro	Criterio (mg/L)	Observaciones
Hierro (Fe)	0.1	Puede causar corrosión en equipos metálicos.
Manganeso (Mn)	0.1	Formar incrustaciones en tuberías y equipos.
Calcio (Ca)	68	Genera depósitos en tuberías y reactores.

Magnesio (Mg)	19	Contribuye a la dureza del agua e incrustaciones.
Cloruros (Cl)	500	Provoca corrosión en equipos.
Bicarbonato (HCO ₃)	128	Influye en la estabilidad del pH.
Nitratos (NO ₃)	5	Afecta la pureza de los productos.
Sulfatos (SO ₄)	100	Genera corrosión en sistemas de ácidos y bases.
Dureza Total	250	Provoca incrustaciones en intercambiadores de calor.
Alcalinidad	125	Estabiliza el pH en procesos con ácidos/álcalis.
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	1000	Afecta la conductividad y eficiencia.
Sólidos Suspendidos Totales (TSS)	5	Causa obstrucciones en filtros y reactores.
Color	20	Indica compuestos orgánicos no deseados.
pH	6.2-8.3	Afecta las reacciones químicas y la corrosión.

Beneficios para el uso de agua subterránea en la industria química

El uso de agua subterránea en la industria química presenta diversos beneficios que lo convierten en una opción viable y eficiente para satisfacer las demandas de agua industrial, sobre todo en regiones donde las fuentes superficiales o el agua potable son limitadas o costosas. Estos beneficios incluyen:

Disponibilidad Estable

El agua subterránea ofrece una fuente más confiable que las superficiales, siendo menos afectada por fluctuaciones estacionales o cambios climáticos, lo que garantiza un suministro continuo para los procesos industriales (Gleeson et al., 2012)

Mejor Calidad Inicial

Al filtrarse naturalmente a través del suelo, el agua subterránea suele contener menos sólidos y contaminantes, lo que reduce los costos y esfuerzos de tratamiento para la industria química. (Custodio & Llamas, 2016)

Costos Bajos de Captación

Aunque perforar pozos implica una inversión inicial, los costos operativos de extraer agua subterránea son generalmente bajos en comparación con otras fuentes, como la desalinización o el tratamiento de aguas residuales. (Zektser & Everett, 2004)

Disponibilidad Local

El agua subterránea está disponible cerca de las plantas industriales, lo que reduce costos de transporte y emisiones de carbono, mejorando la eficiencia operativa.(Custodio, 2010)

Sostenibilidad

Con una gestión adecuada, el uso de agua subterránea puede ser sostenible, permitiendo a las industrias cumplir con normativas ambientales y reducir su impacto en los recursos hídricos (Foster & Chilton, 2020)

Riesgos para el uso de agua subterránea en la industria química

Sobreexplotación de Acuíferos

La extracción excesiva de agua subterránea puede llevar a la sobreexplotación de los acuíferos, disminuyendo su capacidad de recarga natural. Esto puede generar un agotamiento progresivo del recurso, lo que afecta tanto a la industria química como a otras actividades que dependen de este suministro. (Wada et al., 2010)

Contaminación del Acuífero

El uso industrial del agua subterránea presenta el riesgo de contaminación del acuífero por el vertido de residuos químicos. En particular, si los sistemas de protección o tratamiento no son adecuados, las filtraciones o derrames pueden contaminar fuentes de agua que tardan décadas en recuperarse. (Barlow & Leake, 2012)

Incremento en los Costos de Bombeo

A medida que se reduce el nivel freático por la sobreexplotación, los costos de extracción aumentan debido a la mayor energía necesaria para bombear el agua desde mayores profundidades. Esto incrementa los costos operativos de la industria química a largo plazo. (KONIKOW & KENDY, 2005)

Conflictos por el Uso del Recurso

En áreas con alta demanda de agua subterránea, puede haber conflictos entre la industria química y otros usuarios, como la agricultura o el consumo humano. La competencia por un recurso limitado puede generar tensiones sociales y regulaciones más estrictas (Gleeson et al., 2012)

Uso agrícola del agua subterránea

Requisitos para el uso agrícola del agua subterránea

(University Texas, 2003) El uso de agua subterránea para fines agrícolas presenta ciertos requisitos según que son esenciales para garantizar su efectividad y sostenibilidad. A continuación, se enumeran los principales requisitos que deben cumplirse para el uso adecuado de este recurso:

El análisis de la calidad del agua subterránea es el primer paso esencial para determinar su idoneidad para el riego agrícola. Entre los principales parámetros a considerar, encontramos:

Conductividad Eléctrica (EC)

La conductividad eléctrica mide el total de sales disueltas en el agua. Valores de EC superiores a 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indican la presencia de sales que pueden afectar los cultivos. En niveles más altos, el agua podría contribuir a la salinización del suelo, limitando la capacidad de las plantas para absorber agua, incluso cuando el suelo parezca húmedo.

Relación de Adsorción de Sodio (SAR)

La SAR evalúa la proporción de sodio en el agua en comparación con otros cationes, como calcio y magnesio. Un alto SAR (> 18) puede llevar a la sodificación del suelo, deteriorando su estructura física y dificultando la infiltración de agua. En estos casos, es necesario utilizar enmiendas como el yeso para reducir los efectos del sodio.

Concentraciones de Cloruros, Nitratos y Bicarbonatos

Los niveles elevados de cloruros pueden causar toxicidad directa a los cultivos sensibles, como los cítricos y las hortalizas. Los nitratos en concentraciones superiores a 10 mg/L pueden representar un riesgo de contaminación del suelo, y los bicarbonatos pueden interferir en la absorción de calcio y magnesio por las plantas.

Infraestructura para la Extracción y Distribución

La eficiencia en el uso del agua subterránea depende en gran medida de la infraestructura utilizada para su extracción y distribución. Los sistemas de riego deben estar diseñados para minimizar las pérdidas de agua y maximizar su aprovechamiento:

Pozos y Bombas

La extracción de agua subterránea requiere el uso de pozos perforados con bombas adecuadas que permitan el acceso eficiente a los acuíferos. Las bombas deben ser energéticamente eficientes y dimensionadas correctamente para evitar una sobreextracción del acuífero.

Sistemas de riego eficientes

El uso de tecnologías como el riego por goteo o aspersión puede optimizar la aplicación del agua, reduciendo la evaporación y el escurrimiento. El riego por goteo, en particular, permite una aplicación precisa y controlada, entregando el agua directamente a las raíces de las plantas, lo que mejora significativamente la eficiencia.

Prácticas Agrícolas Sostenibles

El manejo adecuado del agua subterránea implica ajustar las prácticas agrícolas para maximizar su eficiencia y sostenibilidad:

Selección de cultivos

Es esencial elegir cultivos que sean compatibles con la calidad del agua subterránea disponible. Algunos cultivos tienen mayor tolerancia a la salinidad o a elementos traza específicos, lo que permite un uso más eficiente del recurso hídrico sin comprometer la productividad.

Riego deficitario controlado

Esta técnica consiste en aplicar cantidades de agua inferiores a las necesidades hídricas totales del cultivo, aprovechando la capacidad de algunas plantas para tolerar déficits moderados sin que esto afecte significativamente el rendimiento. El riego deficitario permite ahorrar agua y mejorar la eficiencia en su uso.(Rodríguez-Correa et al., 2022)

Tabla 2. Parámetros y criterios de calidad del agua subterránea para uso agrícola.(University Texas, 2003)

Parámetro	Unidad	Criterio/Límite	Comentarios
Conductividad Eléctrica (EC)	μS/cm	< 750 (Excelente), 750-1500 (Aceptable), >1500 (Peligroso)	La EC mide el total de sales disueltas. Un valor alto puede indicar riesgos de salinidad para cultivos sensibles.
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	mg/L	< 500 (Excelente), 500-2000 (Aceptable), >2000 (No recomendado)	Relacionado con la salinidad. Valores altos pueden afectar la absorción de agua por las plantas y el rendimiento de los cultivos.
Relación de Adsorción de Sodio (SAR)	-	< 10 (Bajo riesgo), 10-18 (Riesgo moderado), >18 (Alto riesgo)	El SAR mide la proporción de sodio respecto a calcio y magnesio. Un SAR alto puede causar problemas de sodicidad en el suelo, afectando su estructura.
Porcentaje de Sodio Soluble (SSP)	%	< 60% (Aceptable), >60% (No recomendado)	A valores altos, el sodio puede acumularse en el suelo y dañar su estructura.
Cloruros (Cl)	mg/L	< 350 (Para cultivos sensibles)	Niveles altos pueden causar toxicidad en cultivos sensibles como la cebolla o la lechuga.
Bicarbonatos (HCO ₃)	mg/L	No especificado, pero debe analizarse en relación con Ca y Mg	Los bicarbonatos pueden afectar la absorción de nutrientes y aumentar el riesgo de acumulación de sodio en suelos con alto SAR.
Nitratos (NO ₃)	mg/L	< 10 mg/L (Para riego)	Altas concentraciones pueden causar problemas de crecimiento en ciertos cultivos y contaminación del suelo.

Hierro (Fe)	mg/L	< 5 (Recomendado)	No es tóxico en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo y la pérdida de nutrientes esenciales como el fósforo.
Fluor (F)	mg/L	< 1 (Recomendado)	Inactivado por suelos neutros y alcalinos.

Beneficios para el uso agrícola del agua subterránea.

Disponibilidad Constante

Suministro durante Sequías.

El agua subterránea está disponible de manera más constante en comparación con las fuentes de agua superficial. Durante períodos de sequía, los acuíferos pueden proporcionar una fuente fiable de agua para el riego, lo que permite a los agricultores mantener la producción agrícola sin interrupciones.

Estabilidad del Recurso.

Los acuíferos suelen tener un volumen significativo de agua almacenada, lo que reduce la vulnerabilidad a las fluctuaciones climáticas. Esta estabilidad permite la planificación a largo plazo de las actividades agrícolas, incluyendo la selección de cultivos y la programación de siembras y cosechas.

Aumento de la Productividad Agrícola

Mayor Rendimiento de Cultivos.

El acceso a agua subterránea de calidad permite aumentar significativamente los rendimientos de cultivos. En regiones áridas y semiáridas, donde el riego es esencial, el uso de agua subterránea se traduce en un incremento de la producción agrícola.

Diversificación de Cultivos.

El acceso a agua subterránea permite a los agricultores cultivar una gama más amplia de cultivos, incluidos aquellos que requieren mayor cantidad de agua o son más sensibles a condiciones de sequía. Esto contribuye a mejorar la seguridad alimentaria y a diversificar las fuentes de ingresos.

Menor Evaporación

Reducción de Pérdidas por Evaporación.

Dado que el agua subterránea está menos expuesta a la evaporación en comparación con el agua superficial, su uso puede resultar en una mayor retención de humedad en el suelo. Esto es particularmente beneficioso en climas cálidos, donde las tasas de evaporación son elevadas.

2025: 46/19 Siempre más allá ¡avanzamos en la revolución!

Impacto Positivo en el Suelo

Mejora de la Fertilidad del Suelo.

El riego con agua subterránea puede contribuir a mantener la humedad del suelo, mejorando su estructura y promoviendo la actividad biológica. Esto, a su vez, puede aumentar la fertilidad del suelo, permitiendo un crecimiento más robusto de los cultivos.

Control de Salinidad.

El uso de agua subterránea de buena calidad puede ayudar a prevenir la acumulación de sales en el suelo, evitando la salinización y sus efectos adversos sobre los cultivos. La salinidad del agua subterránea puede ser monitorizada para asegurar que no exceda los niveles críticos.

Uso humano del agua subterránea

El uso humano del agua subterránea, tal como se contempla en la Norma (CAPRE, 2010), está sujeto a varios requisitos para asegurar la calidad del agua destinada al consumo humano. La norma establece parámetros específicos que deben seguirse para garantizar que el agua subterránea sea apta para el consumo, así como los beneficios, riesgos y posibles alternativas al uso de este recurso.

Requisitos para el uso humano del agua subterránea según la Norma CAPRE

Según la Norma (CAPRE, 2010), el agua subterránea destinada al consumo humano debe cumplir con ciertos parámetros de calidad, los cuales se dividen en tres etapas de análisis que cubren aspectos físicos, químicos y biológicos:

Calidad del agua: La norma establece que el agua subterránea, ya sea tratada o sin tratar, debe cumplir con los estándares de calidad para garantizar que no represente riesgos para la salud pública (CAPRE, Art. 5). Los parámetros básicos que se deben controlar incluyen coliformes fecales, olor, sabor, color, turbidez, temperatura, pH, conductividad y cloro residual (CAPRE, Art. 8.1).

Tratamiento: La Norma CAPRE especifica que, en caso de detectar la presencia de contaminantes, el agua subterránea debe ser tratada para cumplir con los valores máximos admisibles. Estos tratamientos pueden incluir procesos de desinfección y eliminación de contaminantes químicos como metales pesados o plaguicidas (CAPRE, Art. 8.2 y 8.3).

Control y vigilancia: Es imperativo que las instituciones responsables realicen monitoreos periódicos y tomen muestras del agua en puntos establecidos para verificar su calidad. Además, la norma indica que cualquier desviación en los parámetros debe ser reportada a las autoridades para aplicar las medidas correctivas necesarias (CAPRE, Art. 9).

En la **Tabla 3** , se muestran los Parámetros de calidad del agua para uso humano, basados en los criterios establecidos por la Norma Regional (CAPRE, 2010) y otros estándares relacionados.

Tabla 3. Parámetros de calidad del agua para uso humano

Parámetro	Criterio
Aspecto	Transparente
Color Verdadero UC	15
Turbidez UNT	5
Sólidos Disueltos mg/L	1000
Temperatura °C	18 - 32
pH	6.5 - 8.5
Conductividad Eléctrica $\mu\text{S}/\text{cm}$	No Especifica
Alcalinidad Total (CaCO_3) mg/L	No Especifica
Dureza Total (CaCO_3) mg/L	400
Índice Saturación	-0.5 - +0.5
Sodio (Na) mg/L	200
Calcio (Ca) mg/L	100
Magnesio (Mg) mg/L	50
Potasio (K) mg/L	10
Hierro (Fe^{2+}) mg/L	0.3
Bicarbonatos (HCO_3) mg/L	No Especifica
Carbonatos (CO_3) mg/L	No Especifica
Hidroxilo (H) mg/L	No Especifica
Cloruros (Cl) mg/L	250.0
Sulfatos (SO_4) mg/L	250.0
Nitratos (NO_3) mg/L	50
Nitritos (NO_2) mg/L	0.1
Flúor (F) mg/L	0.7-1.5
% Balance Iónico	10.0

Beneficios del uso de agua subterránea según la Norma CAPRE

El uso de agua subterránea presenta varios beneficios, de acuerdo con las disposiciones de la Norma (CAPRE, 2010):

Disponibilidad constante: En muchos casos, los acuíferos subterráneos ofrecen una fuente confiable de agua que no está tan sujeta a las fluctuaciones estacionales como las fuentes de agua superficiales.

Protección natural: Los acuíferos subterráneos actúan como filtros naturales, lo que reduce la exposición del agua a contaminantes superficiales como bacterias y residuos industriales. Esto asegura que, en condiciones normales, el agua subterránea tenga menos necesidad de tratamiento.

Importancia para zonas rurales: En áreas donde la infraestructura para el tratamiento y distribución de agua superficial es limitada, los acuíferos subterráneos son una fuente vital de agua potable, lo que garantiza la continuidad del suministro de agua para comunidades remotas (CAPRE, Art. 7).

Riesgos del uso de agua subterránea según la Norma CAPRE

La Norma CAPRE también subraya varios riesgos asociados al uso del agua subterránea:

Contaminación: Aunque los acuíferos están protegidos por capas de suelo y roca, pueden estar expuestos a la infiltración de contaminantes, como nitratos provenientes de la agricultura o productos industriales. La presencia de coliformes fecales o de contaminantes químicos en el agua subterránea es un riesgo para la salud pública, y cuando se exceden los límites establecidos, la norma establece que se deben tomar medidas correctivas inmediatas (CAPRE, Art. 12).

Sobreexplotación: La extracción excesiva de agua subterránea puede causar la disminución de los niveles freáticos, lo que no solo compromete la disponibilidad futura del recurso, sino que también puede dar lugar a problemas como la subsidencia del suelo o la intrusión salina en zonas costeras (CAPRE, Art. 11).

Variaciones temporales en la calidad: La norma permite que, en situaciones excepcionales, los valores máximos permisibles de algunos parámetros sean excedidos temporalmente, siempre que se tomen medidas inmediatas para mitigar los riesgos y asegurar que no se comprometa la salud pública (CAPRE, Art. 14).

3.7 LA VARIACION ESTACIONAL DEL AGUA SUBTERRANEA.

La variación estacional del agua subterránea se refiere a los cambios en los niveles de los acuíferos que ocurren durante las diferentes estaciones del año. Estos cambios están principalmente influenciados por factores como las precipitaciones, la evapotranspiración, el uso agrícola, industrial y el clima de la región.

Recarga durante la Temporada de Lluvias

En muchas regiones, la recarga de los acuíferos subterráneos se produce principalmente durante la temporada de lluvias. Las precipitaciones permiten que el agua se infiltre en el suelo, alimentando los acuíferos. Este proceso es esencial para mantener los niveles de agua subterránea, ya que gran parte del agua capturada proviene de las lluvias. (Healy & Cook, 2002)

Descenso en la Temporada Seca

Durante la temporada seca, los niveles de agua subterránea tienden a disminuir debido a una menor recarga y un mayor uso del recurso para el riego, las actividades industriales y el consumo humano. La falta de lluvias reduce significativamente el volumen de agua que llega al acuífero, lo que puede llevar a un descenso crítico si la extracción supera la recarga. (Sophocleous, 2004)

Impacto de la Agricultura

En zonas agrícolas, la variación estacional es más pronunciada, ya que la demanda de agua subterránea aumenta durante las estaciones de cultivo. En muchas regiones del mundo, la extracción de agua subterránea para el riego es considerable durante la temporada seca, lo que contribuye a una caída acelerada en los niveles de los acuíferos. (Scanlon et al., 2012)

Efectos del Cambio Climático

El cambio climático puede exacerbar la variación estacional de los acuíferos, alterando los patrones de precipitación y aumentando la frecuencia de sequías o eventos climáticos extremos. Estos factores afectan tanto la cantidad de agua disponible para la recarga como la tasa de evapotranspiración, impactando los niveles de agua subterránea en cada temporada. (Taylor et al., 2013)

Recuperación Parcial en Acuíferos sobreexplotados

En regiones donde los acuíferos están sobreexplotados, la recarga estacional puede ser insuficiente para recuperar los niveles de agua subterránea. En estas zonas, incluso durante la temporada de lluvias, los acuíferos no logran reponerse por completo debido a la extracción continua para usos industriales y agrícolas. (Alley & Konikow, 2005)

3.7.1 Variación de los Parámetros Químicos del Agua Subterránea

La calidad química del agua subterránea presenta variaciones significativas entre las dos principales temporadas del año: lluviosa y seca. Estas variaciones son influenciadas por la recarga hídrica, la disolución de minerales, y los cambios en la concentración de contaminantes. A continuación, se presenta un análisis sobre cómo cada uno de estos parámetros puede variar estacionalmente (Barrera & Aguirre, 2011):

Alcalinidad Total (CaCO_3)

La alcalinidad total es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos, y se expresa comúnmente en mg/L de CaCO_3 . En la temporada de lluvias, la alcalinidad puede aumentar debido a la entrada de agua superficial cargada de bicarbonatos y carbonatos, especialmente en áreas donde el agua de lluvia interfiere con el suelo y la roca caliza. Durante la estación seca, la alcalinidad puede disminuir, ya que la evaporación y la concentración de solutos pueden alterar la química del agua.

Dureza Total (CaCO_3)

La dureza total, que también se mide en mg/L de CaCO_3 , puede experimentar un incremento en la temporada seca debido a la concentración de minerales en el agua subterránea. La falta de recarga puede llevar a un aumento en las concentraciones de calcio y magnesio, elementos clave que contribuyen a la dureza del agua. En cambio, durante la temporada de lluvias, la dilución de estos minerales por la recarga puede resultar en una disminución temporal de la dureza total.

Índice de Saturación

El índice de saturación se utiliza para determinar la corrosividad o la formación de incrustaciones del agua. Este índice puede ser negativo durante la temporada de lluvias, indicando una mayor corrosividad debido a la dilución de sales y mayor contenido de CO_2 . En la estación seca, puede volverse positivo, sugiriendo que el agua es más propensa a formar depósitos minerales.

Sodio (Na)

Los niveles de sodio en mg/L pueden fluctuar dependiendo de la actividad agrícola y el uso de fertilizantes. Durante la temporada de lluvias, los niveles pueden ser más bajos debido a la dilución, mientras que en la estación seca, el sodio puede concentrarse, especialmente en áreas donde se utilizan prácticas de riego inadecuadas.

Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)

Las concentraciones de calcio y magnesio generalmente aumentan en la temporada seca, ya que el agua subterránea se vuelve más concentrada. Durante las lluvias, estos minerales pueden diluirse, lo que podría dar lugar a una reducción de la dureza.

Potasio (K)

El potasio puede ser variable, pero tiende a aumentar en la estación de lluvias si hay aportes de fertilizantes o escorrentía que arrastra potasio desde la superficie. En la estación seca, su concentración puede estabilizarse o disminuir si no hay aportes externos.

Hierro (Fe^{2+})

El hierro generalmente se encuentra en niveles más altos en el agua subterránea debido a la reducción en condiciones anaeróbicas. Durante la temporada de lluvias, la aireación

del acuífero puede reducir temporalmente la concentración de hierro, mientras que en la temporada seca, la concentración puede aumentar.

Bicarbonatos (HCO_3)

Los bicarbonatos pueden aumentar en la temporada de lluvias debido a la disolución de minerales y la mayor actividad biológica. Durante la estación seca, la concentración puede disminuir a medida que el agua se evapora y se concentra.

Carbonatos (CO_3)

Los carbonatos tienden a ser más estables, pero su concentración puede verse afectada por cambios en el pH y la actividad de la biomasa. En la temporada de lluvias, pueden aumentar debido a la entrada de agua superficial, mientras que en la estación seca pueden ser más bajos.

Cloruros (Cl)

Los niveles de cloruros pueden ser más altos durante la temporada seca debido a la concentración de sales en el agua. En la temporada de lluvias, estos niveles tienden a diluirse por la recarga de agua fresca.

Sulfatos (SO_4)

Los **sulfatos** pueden variar dependiendo de las fuentes de contaminación, como aguas residuales o escorrentía agrícola. En la temporada de lluvias, la dilución puede reducir su concentración, mientras que en la estación seca puede aumentar.

Nitratos (NO_3) y Nitritos (NO_2)

Los niveles de nitratos y nitritos pueden aumentar significativamente durante la temporada de lluvias debido a la escorrentía agrícola y la infiltración de fertilizantes. En la estación seca, estos niveles pueden estabilizarse o disminuir, dependiendo de la actividad agrícola.

Flúor (F)

El flúor puede presentarse en diversas concentraciones dependiendo de las fuentes geológicas locales. En general, su variación puede no ser tan pronunciada como en otros iones, pero puede aumentar en la temporada de lluvias si hay recarga desde fuentes ricas en flúor.

% Balance iónico

El **balance iónico** es un indicador importante de la calidad del agua. Se espera que durante la temporada de lluvias, este porcentaje se acerque más al equilibrio debido a la dilución. En la estación seca, los desequilibrios pueden aumentar debido a la concentración de solutos.

3.8. EL MUNICIPIO DE POSOLTEGA.

Ubicación, geografía e hidrología del municipio de posoltega.

El municipio de Posoltega está ubicado en el departamento de Chinandega, al noroeste de Nicaragua, con coordenadas aproximadas de 12°33' latitud norte y 87°21' longitud oeste. Su geografía está caracterizada por su cercanía a la Cordillera de los Maribios, un sistema montañoso volcánico que incluye el Volcán Casita, cuya actividad volcánica ha sido relevante tanto en términos geológicos como históricos. La región presenta una combinación de llanuras aluviales y terrenos volcánicos, lo que influye tanto en la composición del suelo como en la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos. (Flores et al., 2019)

Desde el punto de vista climático, Posoltega experimenta un clima tropical de sabana, con una temporada seca marcada de noviembre a abril, y una temporada lluviosa de mayo a octubre. Las precipitaciones anuales varían entre los 1,200 y 1,800 mm, con una temperatura promedio anual de 28°C. Este tipo de clima favorece la agricultura, siendo uno de los principales motores económicos del municipio. Sin embargo, el municipio también enfrenta desafíos relacionados con la variabilidad climática y los riesgos naturales asociados a las lluvias intensas, como deslizamientos y la erosión de suelos (Herrera, 2020)

En cuanto a la hidrología, el municipio depende en gran medida de aguas subterráneas, las cuales se extraen de acuíferos volcánicos. Estos acuíferos están formados principalmente por depósitos piroclásticos y lavas basálticas, que tienen una alta capacidad de infiltración y almacenamiento de agua. Sin embargo, la calidad de estas aguas puede verse afectada por la actividad volcánica y la proximidad a áreas de cultivo, que incrementan la concentración de ciertos minerales y contaminantes en el agua subterránea. (Rodríguez & Solano, 2021) Además, el sistema de drenaje superficial está compuesto por ríos intermitentes que fluyen principalmente durante la temporada lluviosa, con los ríos Acome y Telica siendo los más destacados en la región.

Economía

Posoltega es un municipio mayormente agrícola, cuya economía depende principalmente de la producción de granos básicos, como maíz, frijoles y sorgo, así como de la ganadería. La ubicación de Posoltega en el departamento de Chinandega, una de las principales regiones agrícolas de Nicaragua, ha facilitado el acceso a mercados locales y nacionales. Además, el municipio ha visto un incremento en el cultivo de caña de azúcar y el procesamiento de productos derivados, lo que ha proporcionado oportunidades de empleo, aunque también ha generado presión sobre los recursos hídricos debido al uso intensivo de agua en estos cultivos

Población

Posoltega, según el (III CENAGRO, 2001), tenía una población estimada de 16,771 habitantes, de los cuales una gran mayoría reside en áreas rurales. La densidad poblacional es baja en comparación con otras regiones de Nicaragua, lo que refleja el carácter rural del municipio. Según el último censo, el crecimiento poblacional en Posoltega ha sido lento debido a la migración hacia áreas urbanas en busca de mejores oportunidades laborales y acceso a servicios básicos.

La población de Posoltega se enfrenta a varios problemas sociales y económicos, como la pobreza, el acceso limitado a servicios de salud y educación, y la falta de infraestructura adecuada. La mayoría de los habitantes se dedica a actividades agrícolas, lo que hace que su bienestar económico esté estrechamente ligado a las condiciones climáticas y la disponibilidad de recursos naturales, en particular el agua. La población está distribuida de manera desigual entre los diferentes barrios y comarcas, con la mayoría concentrándose en las áreas rurales. Los niveles de analfabetismo varían entre 19.5% en mujeres y 23.3% en hombres, lo que sugiere desafíos en cuanto al acceso a la educación. (López & Vega, 2008)

Problemática del Agua Subterránea

En cuanto a la problemática del agua subterránea, Posoltega enfrenta desafíos significativos. El acceso a agua potable es limitado, y muchas viviendas dependen de pozos o fuentes no tratadas. La calidad del agua subterránea es una preocupación, especialmente por la presencia de contaminantes biológicos como coliformes fecales, los cuales afectan la potabilidad del agua y la salud pública (Cabecera municipal de posoltega, 2017) Este problema se ve exacerbado por la falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas residuales, lo que contribuye a la contaminación de los acuíferos. El 80.4% de los hogares en el municipio utiliza agua de pozos artesanales sin tratamiento adecuado, lo que aumenta los riesgos de salud asociados al consumo de agua contaminada.

IV. DISEÑO METODOLOGICO

TIPO DE ESTUDIO: Experimental

SITIO DE MUESTREO.

Se ha determinado realizar el muestreo en un total de siete pozos, los cuales fueron seleccionados estratégicamente en el municipio de Posoltega, considerando su proximidad a los cultivos de caña y maní.

MUESTREO.

- **Tipo de Muestreo:** No Probabilístico por Conveniencia del Investigador.
- **Frecuencia de Muestreo:** Una sola muestra por sesión estacional climática (seco y lluvioso).
- **Horario de Muestreo:** Por la mañana.
- **Duración del Muestreo:** En un único día.
- **Número de Pozos Muestreados:** Siete.

En la figura No.1, se muestran los sitios de muestreo y las rutas trazadas.

Figura 1. Sitios de muestreo para el análisis de la variación de los parámetros fisicoquímicos de las aguas subterránea del municipio de Posoltega.



Tabla 4. Ubicaciones y coordenadas de pozos de muestreo en Posoltega, Nicaragua

Pozos	Nombre	Coordenadas (Latitud, Longitud)	Referencia Local
Pozo 1	Bosque 1, entrada a Conagra	12.566372, - 86.969135	H28J+JJ9, Filiberto Morales, Nicaragua
Pozo 2	Bosque 2, Celin	12.5637121, - 86.9627092	CA-3, Nicaragua
Pozo 3	Nueva España, iglesia apostólica unida.	12.5718176, - 86.9663715	H298+746, Nicaragua
Pozo 4	El valle, Iglesia ermita San Antonio de Padua	12.567812, - 86.9846567	H2C6+48R, Valle Las Mayorgas, Nicaragua
Pozo 5	Fito Galeano, Adrián Flores.	12.5782759, - 86.983515	H2H8+9F, Tololar 1, Nicaragua
Pozo 6	Fe y Esperanza, Antonio Fernández Ibáñez.	12.5700708, - 86.9890628	H2C6+48R, Valle Las Mayorgas, Nicaragua
Pozo 7	El valle, colegio Lucrecia Martínez.	12.5671848, - 86.9885436	H286+RF9, Valle Las Mayorgas, Nicaragua

Descripción De Procedimientos

Procedimientos Generales:

Lavado de recipiente de toma de muestra (galón de fuente pura) para los siguientes parámetros:

1. Lavar con agua hervida 3 veces.
2. Dejar escurrir sobre papel toalla.

Lavado de frasco de polipropileno de 100 ml para la determinación de hierro.

1. Lavar con jabón neutro
2. Enjuagar con agua de grifo
3. Lavar con HCl 10 %.
4. Enjuagar con abundante agua destilada
5. Dejar escurrir sobre papel toalla

Recolección de muestra

Parámetros: temperatura, pH, conductividad, turbidez, sólidos disueltos, alcalinidad, dureza, índice de saturación, sodio, calcio, magnesio, potasio, bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato, nitrito y flúor

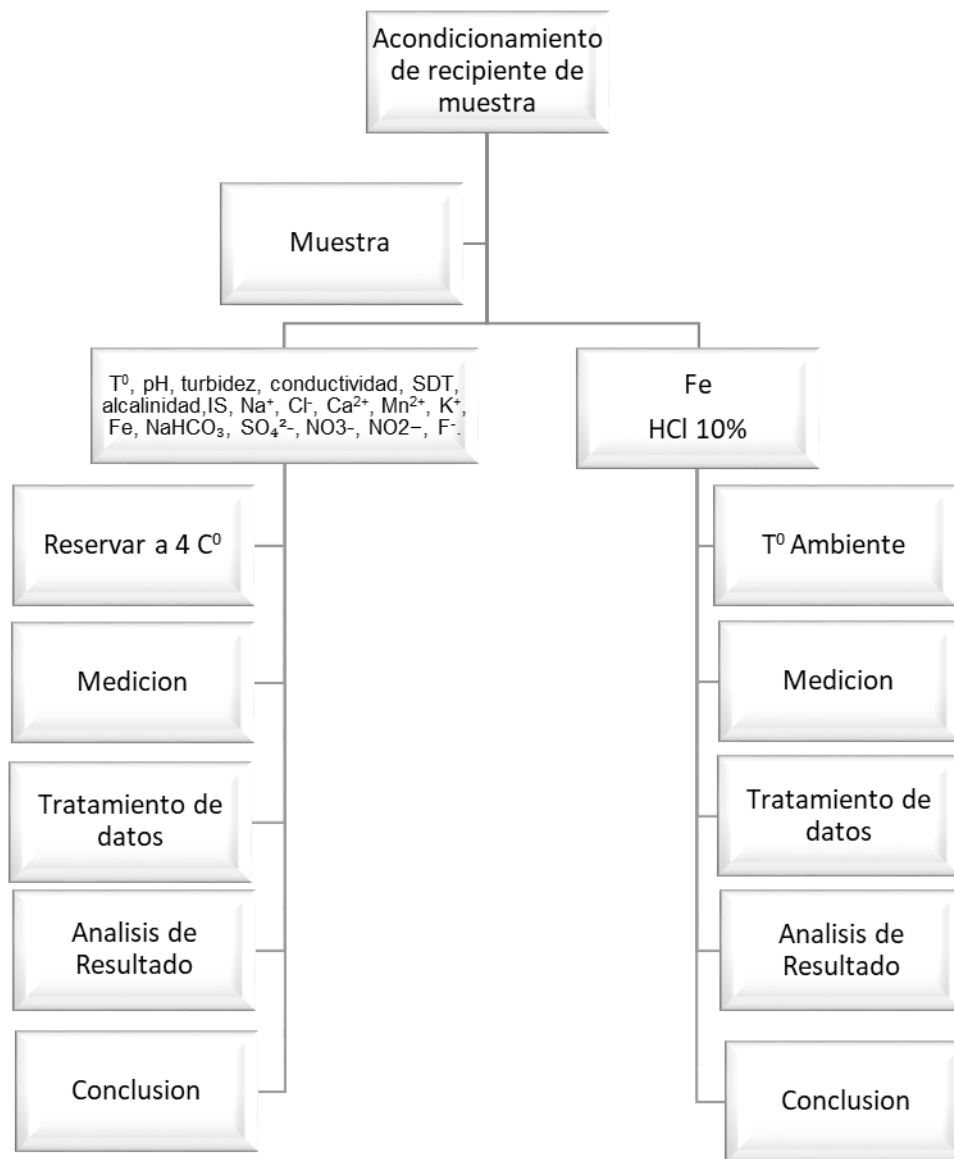
En cada pozo se bombeo durante dos minutos para desalojar el agua superficial. Después, se enjuago tres veces el recipiente recolector de la muestra con el agua del pozo. Finalmente, se tomó un galón de muestra de agua a contracorriente de viento en el sitio. Tapando el recipiente y rotulándolo con el número del pozo. Colocándolos en un termo con hielo a una temperatura de 4 °C.

Parámetros: Hierro

En cada pozo se bombeo durante dos minutos para desalojar el agua superficial. Después, se enjuago tres veces el recipiente recolector de la muestra con el agua del pozo. Finalmente, se tomaron 100 ml con un frasco de plástico de polipropileno de muestra de agua a contracorriente de viento en el sitio, **adicionándole 10 gotas de HCl**

10%. Tapando el recipiente y rotulándolo con el número del pozo. Colocándolos en un termo con hielo a una temperatura de ambiente.

Diagrama de flujo del análisis de una muestra de agua



Parámetro	Método	Código
Turbidez	Nefelométrico	2130 A.
Alcalinidad	Volumétrico	2320-B.
Dureza	Volumétrico	2340-C.
Conductividad	Laboratorio	2510-B.
Temperatura	Laboratorio y Campo	2550 B.
Calcio	Volumétrico	3500-Ca B.
Hierro	Fenantrolina	3500-Fe B.
Magnesio	Cálculo	3500-Mg B.
Potasio	Fotométrico de Llama	3500-K B.
Sodio	Fotométrico de Emisión De Llama	3500-Na B.
Cloruro	Argentométrico	4500-Cl ⁻ B.
Fluoruro	SFADNS	4500-F ⁻ D.
pH	Electrométrico	4500-H ⁺ B.
Nitrito	Colorimétrico	4500-NO ₂ ⁻ B.
Nitrato	Espectrométrico Ultravioleta Selectivo	4500-NO ₃ ⁻ B.
Sulfato	Turbidimétrico	4500-SO ₄ ²⁻ E.
Coliformes	Fermentacion en Tubo Multiple (NMP)	9221

Tabla 5. Métodos normalizados (APHA, AWWA, 2017)

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. AGUA PARA CONSUMO HUMANO

El análisis de los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua subterránea en siete pozos del municipio de Posoltega, durante los meses de marzo (estación seca) y octubre (estación lluviosa), reveló variaciones estacionales importantes, influenciadas por procesos naturales como la recarga hídrica y la evaporación, así como por fuentes antrópicas como la actividad agrícola. A continuación, se discuten los resultados obtenidos por parámetro, en relación con los límites máximos permisibles establecidos por la Norma CAPRE para consumo humano.

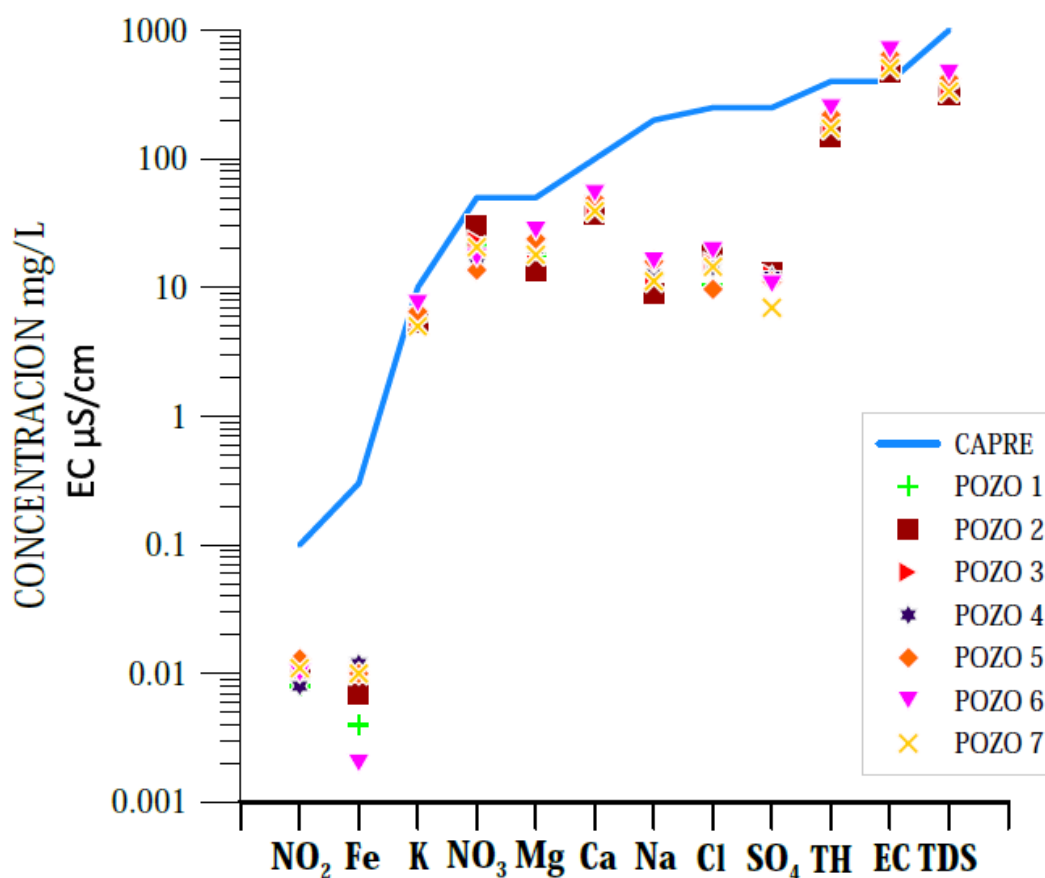


Figura 2. Concentración de parámetros regulados por la Norma CAPRE en los siete pozos durante la estación seca (marzo).

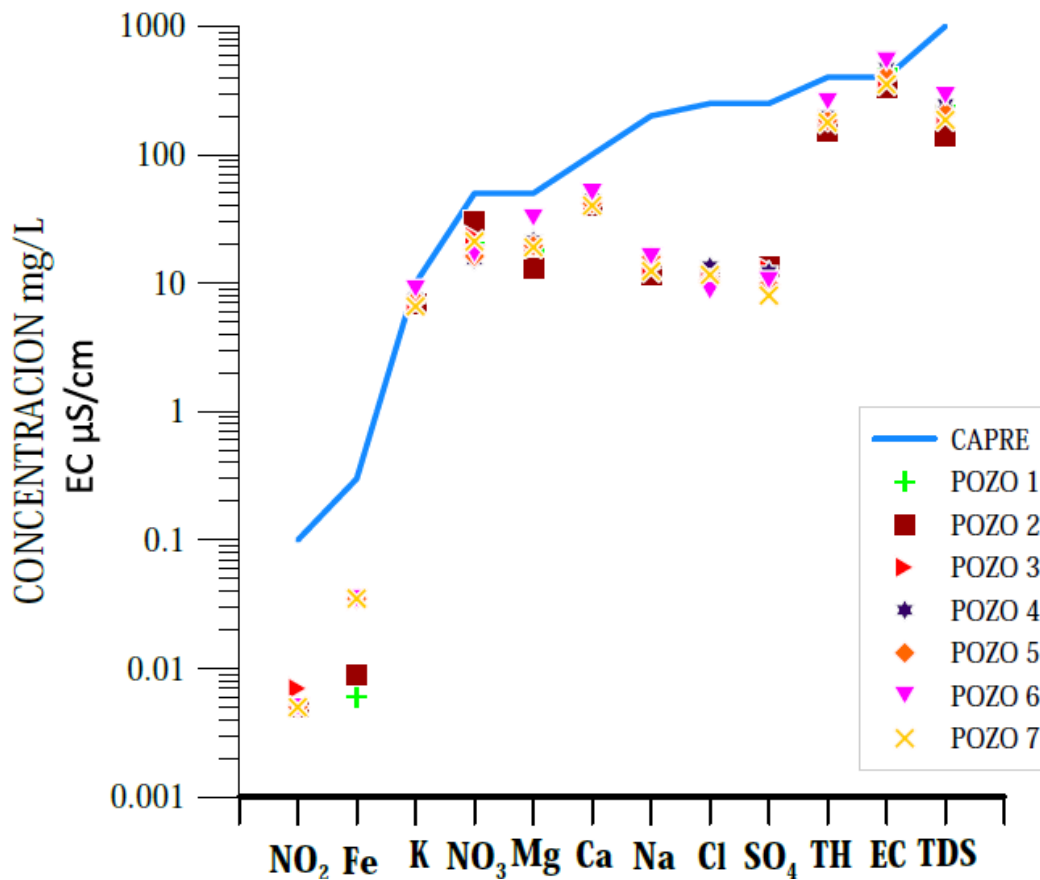


Figura 3. Concentración de parámetros regulados por la Norma CAPRE en los siete pozos durante la estación lluviosa (octubre).

5.1.1. Nitrato (NO_3^-)

Las concentraciones de nitrato (NO_3^-) en los siete pozos durante verano oscilaron entre 13.65 y 30.03 mg/L, y en invierno entre 15.22 y 30.44 mg/L. En todos los casos, los valores se encuentran por debajo del límite máximo de 50 mg/L establecido por la (CAPRE, 2010) para agua destinada al consumo humano.

Desde un enfoque técnico, estos valores indican que no hay riesgo inmediato para la salud asociado a la exposición al nitrato, el cual en concentraciones elevadas puede causar efectos adversos.

El comportamiento estacional muestra ligeros aumentos en algunos pozos durante la época lluviosa, lo que puede estar relacionado con la lixiviación de fertilizantes nitrogenados aplicados en suelos agrícolas. Este fenómeno ocurre cuando el agua de lluvia transporta el nitrato desde la zona no saturada hacia el acuífero (Navarrete et al., 2017). Aun así, los valores observados no indican contaminación aguda, pero sí podrían señalar una presión agrícola moderada sobre el recurso subterráneo, especialmente en los Pozos 2 y 3, que presentan los niveles más altos en ambas estaciones (>30 mg/L).

5.1.2. Nitrito (NO_2^-)

Las concentraciones de nitrito (NO_2^-) encontradas en los siete pozos durante verano e invierno se mantuvieron entre 0.005 y 0.013 mg/L, estando muy por debajo del límite máximo permitido de 0.1 mg/L según la (CAPRE, 2010). Esto indica que el agua es apta para consumo humano respecto a este parámetro y no presenta riesgos sanitarios.

El nitrito es un compuesto intermedio en el ciclo del nitrógeno, generado principalmente por la oxidación parcial del amonio (NH_4^+) o la reducción del nitrato (NO_3^-). Su presencia en aguas subterráneas suele asociarse a contaminación reciente por materia orgánica o aguas residuales bajo condiciones reductoras o con baja concentración de oxígeno (Fewtrell, 2004; WHO, 2011).

Los valores bajos observados en ambos periodos estacionales reflejan un acuífero bien oxigenado y sin procesos de contaminación activa. Además, la ligera disminución de los niveles en invierno puede explicarse por una mayor recarga del acuífero, lo cual favorece la oxidación del nitrito a nitrato, un comportamiento coherente con ambientes aeróbicos estables (Rowe et al., 2019).

5.1.3. Hierro (Fe)

Los valores de hierro total (Fe^{2+}) registrados en los siete pozos oscilaron entre 0.002 y 0.038 mg/L en ambas estaciones, muy por debajo del límite establecido. Aunque se observaron ligeros aumentos en algunos pozos durante el invierno, todos los valores permanecieron dentro de rangos aceptables.

Este comportamiento puede explicarse por la mayor movilización de hierro desde el suelo hacia el acuífero durante la recarga pluvial, ya que el agua meteórica puede disolver óxidos de hierro en el perfil edáfico. Sin embargo, la ausencia de concentraciones elevadas sugiere condiciones oxigenadas en el acuífero, donde el Fe^{2+} es rápidamente oxidado y precipitado como Fe^{3+} (Appelo & Postma, 2005).

5.1.4. Potasio (K^+):

Los valores de potasio oscilaron entre 5.0 y 9.0 mg/L, con un aumento sistemático en todos los pozos durante la época lluviosa (octubre). Este comportamiento contradice la tendencia típica esperada de concentración por evaporación en la estación seca, lo que sugiere que el potasio proviene de una fuente externa que se moviliza con las lluvias, muy probablemente relacionada con la infiltración de fertilizantes potásicos aplicados en zonas agrícolas cercanas.

Este patrón ha sido descrito por Navarrete et al. (2017), quienes relacionaron incrementos de K^+ en agua subterránea con el uso intensivo de fertilizantes y prácticas de cultivo no controladas. Aunque las concentraciones no exceden el límite de CAPRE, el hecho de que el Pozo 6 alcance 9.0 mg/L en invierno implica una posible presión agrícola directa sobre ese punto del acuífero. El potasio, por su parte, no suele encontrarse en concentraciones altas de forma natural debido a su baja movilidad geoquímica (Drever, 1997), lo que refuerza la hipótesis de su origen antropogénico reciente.

5.1.5. Magnesio (Mg^{2+}):

En cuanto al magnesio, los valores registrados fluctuaron entre 13.1 y 32.1 mg/L, con aumentos notables en algunos pozos durante el invierno, como el Pozo 6 y Pozo 4. A diferencia del potasio, el magnesio tiene un origen claramente geológico, derivado de la disolución de rocas carbonatadas como dolomita y magnesita, especialmente en zonas con formaciones calcáreas o volcánicas alteradas (Custodio & Llamas, 2001; Appelo & Postma, 2005).

Las variaciones estacionales pueden atribuirse a la recarga pluvial que modifica el equilibrio entre el agua y la matriz rocosa, favoreciendo la disolución de Mg^{2+} en pozos con mayor interacción con formaciones ricas en este elemento. El magnesio no representa un riesgo sanitario directo a estas concentraciones, pero incrementa la dureza del agua, lo que puede afectar sistemas domésticos e industriales (WHO, 2011).

5.1.6. Calcio (Ca^{2+})

Las concentraciones de calcio (Ca^{2+}) en los siete pozos durante verano e invierno oscilaron entre 36.9 y 53.7 mg/L, cumpliendo con el límite de 100 mg/L establecido por la (CAPRE, 2010). Este comportamiento indica que no existe riesgo sanitario ni técnico asociado a este parámetro.

El origen del calcio es natural, derivado de la disolución de minerales carbonatados como la calcita y la dolomita presentes en la matriz del acuífero (Appelo & Postma, 2005). Las leves variaciones estacionales reflejan un sistema hidrogeoquímico estable y sin influencia antrópica significativa (Custodio & Llamas, 2001).

El calcio contribuye a la dureza del agua, pero los valores encontrados corresponden a aguas moderadamente duras, sin afectar la potabilidad ni generar incrustaciones en redes hidráulicas (WHO, 2011).

5.1.7. Sodio (Na^+)

Las concentraciones de sodio variaron entre 9 y 16 mg/L, muy inferiores al valor guía de 200 mg/L. No se detectaron incrementos significativos entre estaciones, y todos los valores indican que el agua es baja en salinidad y adecuada incluso para personas con dietas restringidas en sodio. Su origen es geogénico, con posible leve influencia de sales residuales por evaporación en época seca.

5.1.8. Cloruros (Cl^-)

Los cloruros se mantuvieron entre 9 y 19 mg/L, muy por debajo del límite de 250 mg/L. Se observó un aumento en la estación seca, especialmente en los pozos 5 y 6, atribuible a evaporación y falta de recarga, lo cual es un comportamiento esperado en aguas

subterráneas de zonas semiáridas. No hay riesgos para la potabilidad, pero los cloruros actúan como indicadores de salinidad creciente.

5.1.9. Sulfatos (SO_4^{2-})

Los sulfatos oscilaron entre 7 y 13 mg/L, lejos del límite de 250 mg/L. No se identificó una tendencia estacional significativa. Estos bajos niveles reflejan una composición geológica sin aporte de yeso ni fuentes antropogénicas relevantes. No implican efectos en la salud ni en el sabor.

5.1.10. Dureza Total (como CaCO_3)

La dureza total varió entre 150 y 260 mg/L como CaCO_3 , cumpliendo con el máximo recomendado de 400 mg/L. Estos valores clasifican el agua como moderadamente dura, lo que puede provocar formación de sarro en tuberías pero no representa riesgo sanitario. Esta dureza es común en zonas con acuíferos carbonatados.

5.1.11. Conductividad Eléctrica (EC)

La conductividad eléctrica osciló entre 471 y 701 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en verano, y entre 350 y 562 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en invierno. Aunque varios pozos superan el valor guía de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CAPRE en verano, esto no implica una restricción sanitaria directa, ya que la OMS considera aceptable hasta 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por razones de palatabilidad. El aumento en verano confirma el efecto de evaporación y concentración iónica, con reducción por dilución en la estación lluviosa.

5.1.12. Sólidos Totales Disueltos (TDS)

Las concentraciones de TDS en los siete pozos variaron entre 178 y 287 mg/L en invierno y entre 311 y 463 mg/L en verano. Todos los valores están muy por debajo del límite máximo de 1000 mg/L establecido, indicando que el agua es químicamente apta para consumo humano. Durante el verano, se observó un aumento generalizado de TDS, atribuido a la evaporación y baja recarga, lo que concentra las sales disueltas. En invierno, las concentraciones disminuyeron por efecto de la recarga meteórica, que diluye los iones presentes en el acuífero.(Appelo, C. A. J., & Postma, 2005)

5.1.13. ANÁLISIS INDIVIDUALIZADO POR POZO PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO

Con el fin de identificar las variaciones espaciales y estacionales en la calidad del agua subterránea del municipio de Posoltega, se realizó un análisis individualizado por pozo, comparando las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos durante la estación seca (marzo) y la estación lluviosa (octubre).

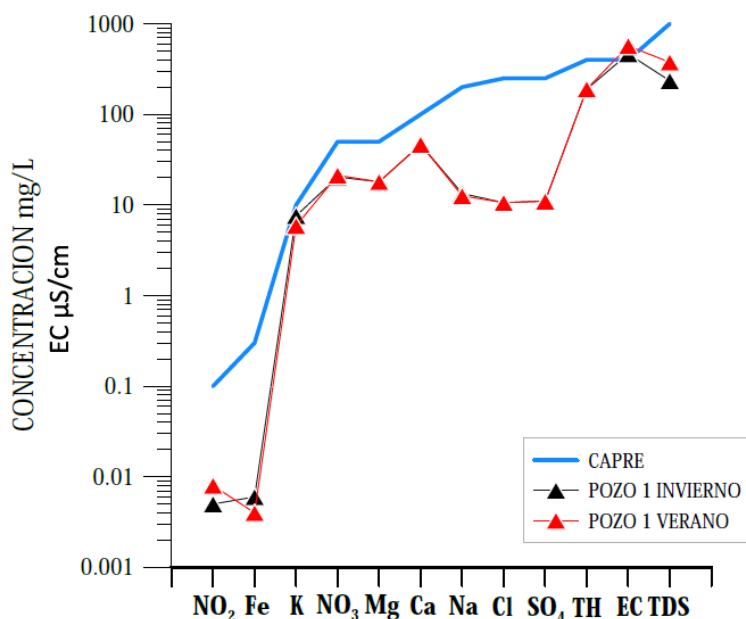


Figura 4. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo1 según la CAPRE.

El Pozo 1 presenta una mineralización baja a moderada, con valores de conductividad eléctrica (464–570 $\mu\text{S/cm}$) que superan ligeramente el límite (400 $\mu\text{S/cm}$), especialmente en verano. Este aumento está relacionado con la evaporación y baja recarga estacional, que elevan la concentración de sales disueltas.

Los demás parámetros analizados, se mantienen muy por debajo de los límites normativos y no presentan variaciones significativas entre estaciones. Esto indica una composición química estable y segura para consumo humano, con la EC como único parámetro fuera de norma, aunque sin implicaciones sanitarias directas.

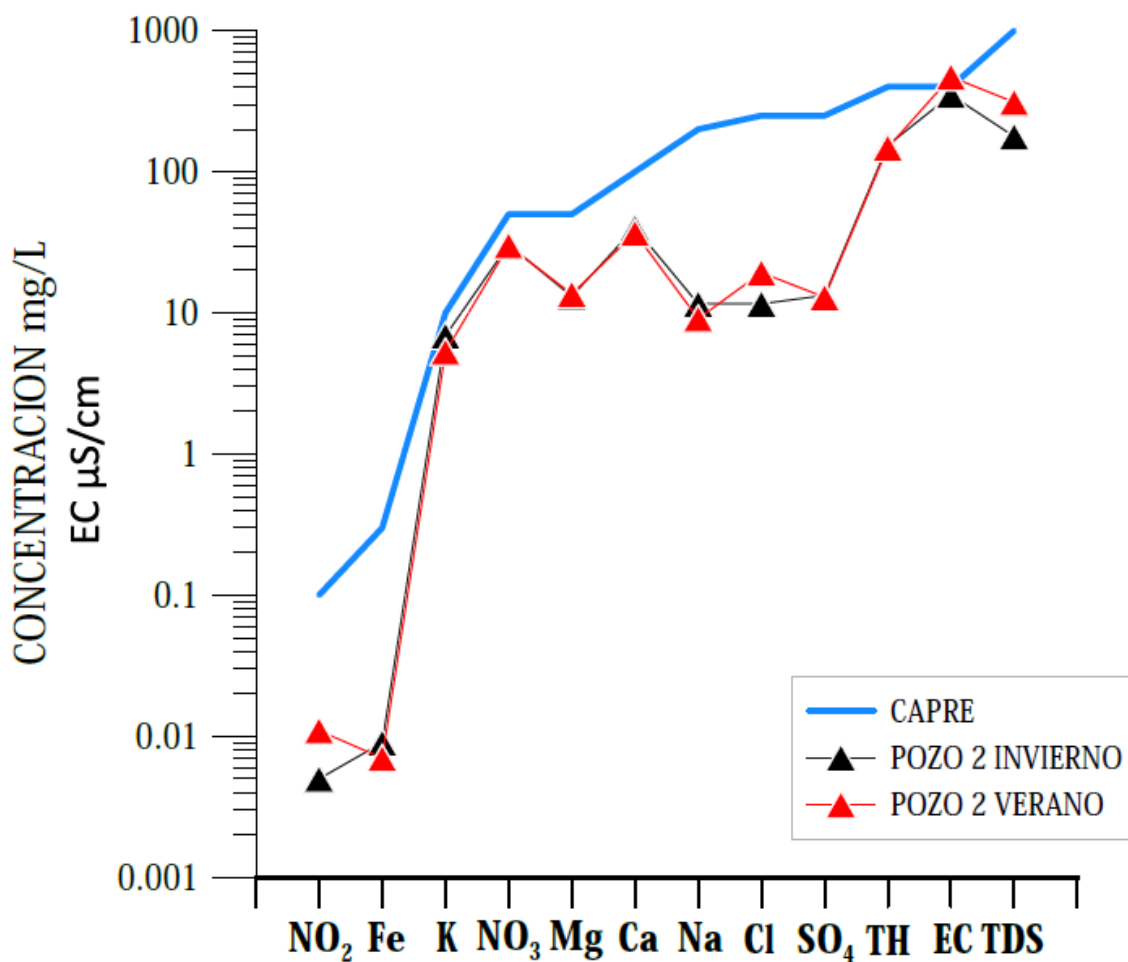


Figura 5. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 2 según la CAPRE.

El Pozo 2 presenta la concentración más alta de nitrato del conjunto, con valores de aproximadamente 30 mg/L en ambas estaciones, lo que representa un 60 % del límite permitido. Aunque cumple con la norma, esta concentración sugiere posible influencia agrícola, especialmente por uso de fertilizantes nitrogenados.

En verano, la conductividad eléctrica supera el límite (471 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mientras que en invierno desciende a 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual indica dilución por recarga hídrica. El resto de los parámetros se mantiene estable y dentro del rango normativo. **Este pozo requiere monitoreo continuo**, especialmente por su cercanía al límite de nitrato y el comportamiento estacional de la EC.

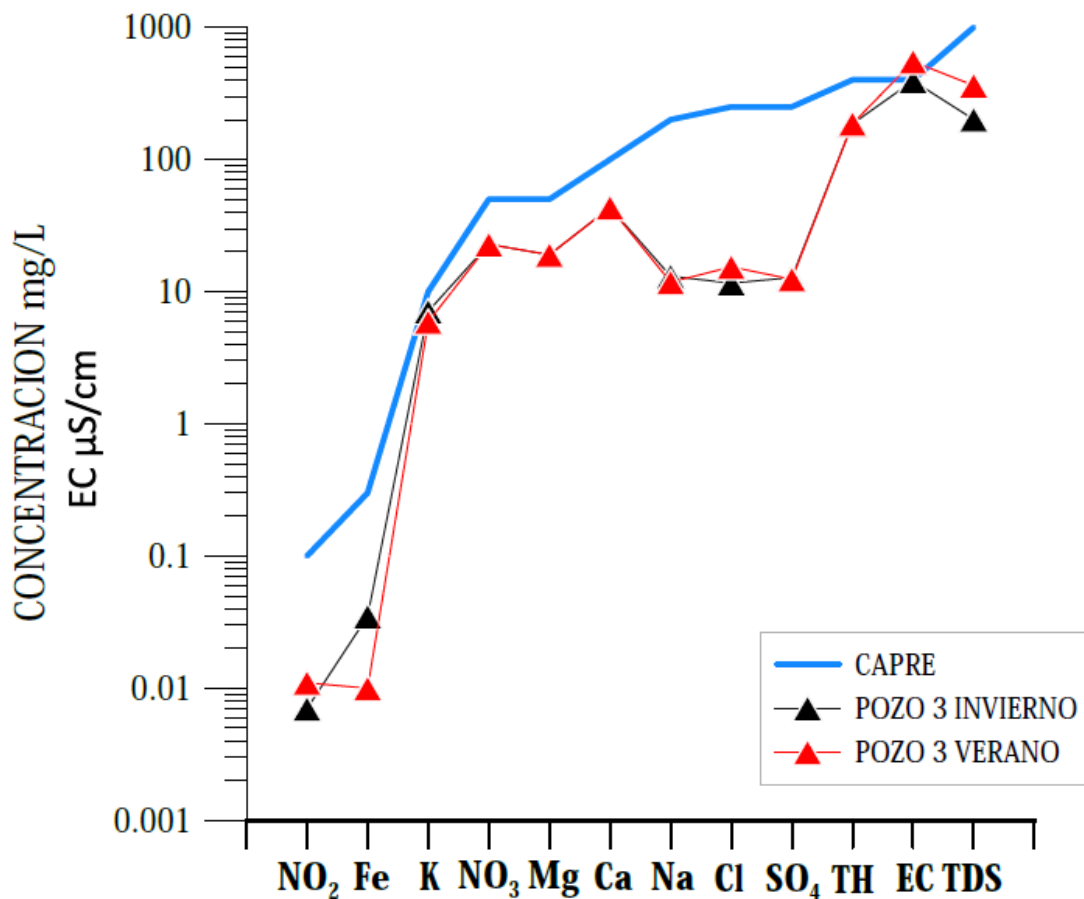


Figura 6. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 3 según la CAPRE.

El Pozo 3 se distingue por su estabilidad hidroquímica estacional, con valores bajos y constantes de nitrato y TDS en ambas estaciones. La mayoría de parámetros analizados se mantienen dentro de los límites establecidos, y no se registra superación normativa en ninguna variable, salvo un ligero aumento de EC en verano (550 $\mu\text{S/cm}$) que excede el valor de referencia, pero sin implicaciones sanitarias.

La mínima variabilidad entre estaciones y la ausencia de concentraciones elevadas de nutrientes o sales sugieren que se trata de un acuífero bien protegido, sin evidencia de impacto antrópico significativo, como infiltración agrícola o contaminación urbana.

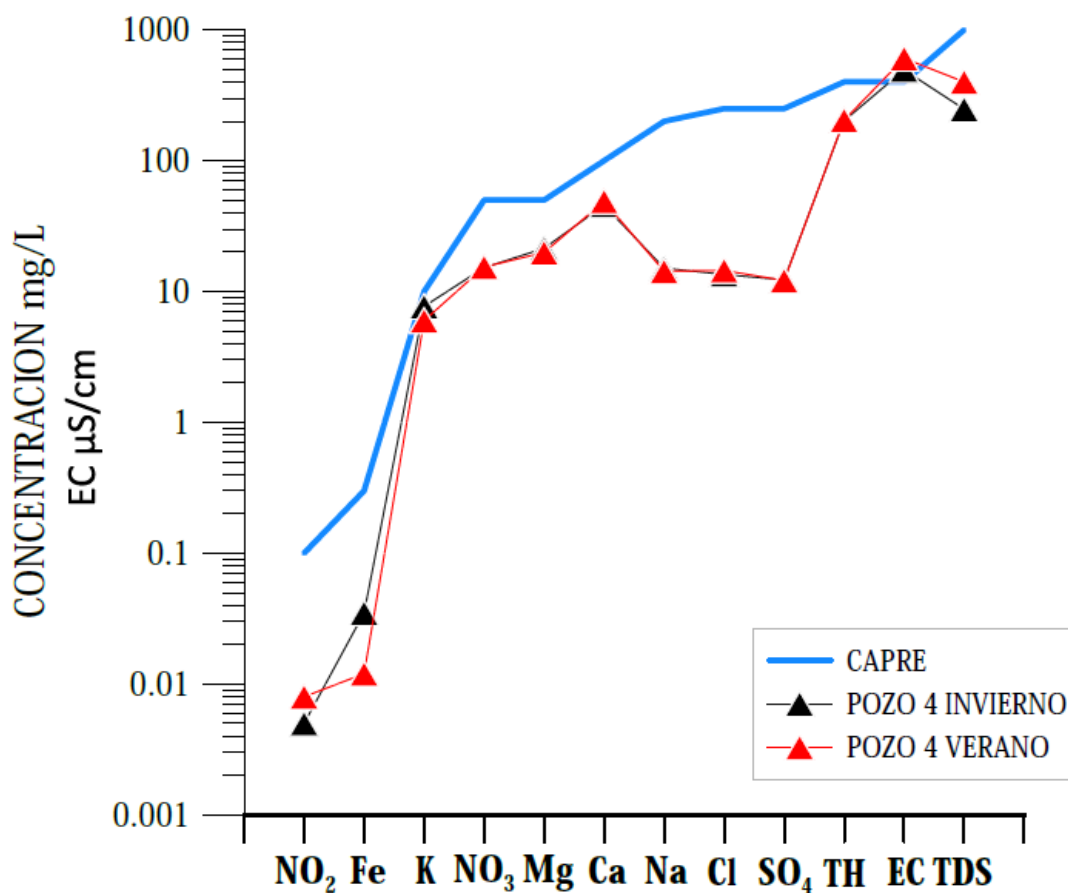


Figura 7. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 4 según la CAPRE.

En el Pozo 4 se observa un ligero aumento estacional de nitrito (NO₂), TDS y conductividad eléctrica (EC) durante el verano, atribuible a la concentración de sales por efecto de evaporación y menor recarga. La EC alcanza 606 µS/cm en verano, superando el límite de 400 µS/cm establecido, lo que refleja una mineralización moderada en época seca. Asimismo, durante el invierno se registra un incremento puntual en la concentración de hierro (Fe), aunque dentro del rango permitido.

Pese a estas variaciones, todos los demás parámetros permanecen muy por debajo de los límites normativos, y el nitrato se mantiene en niveles bajos en ambas estaciones.

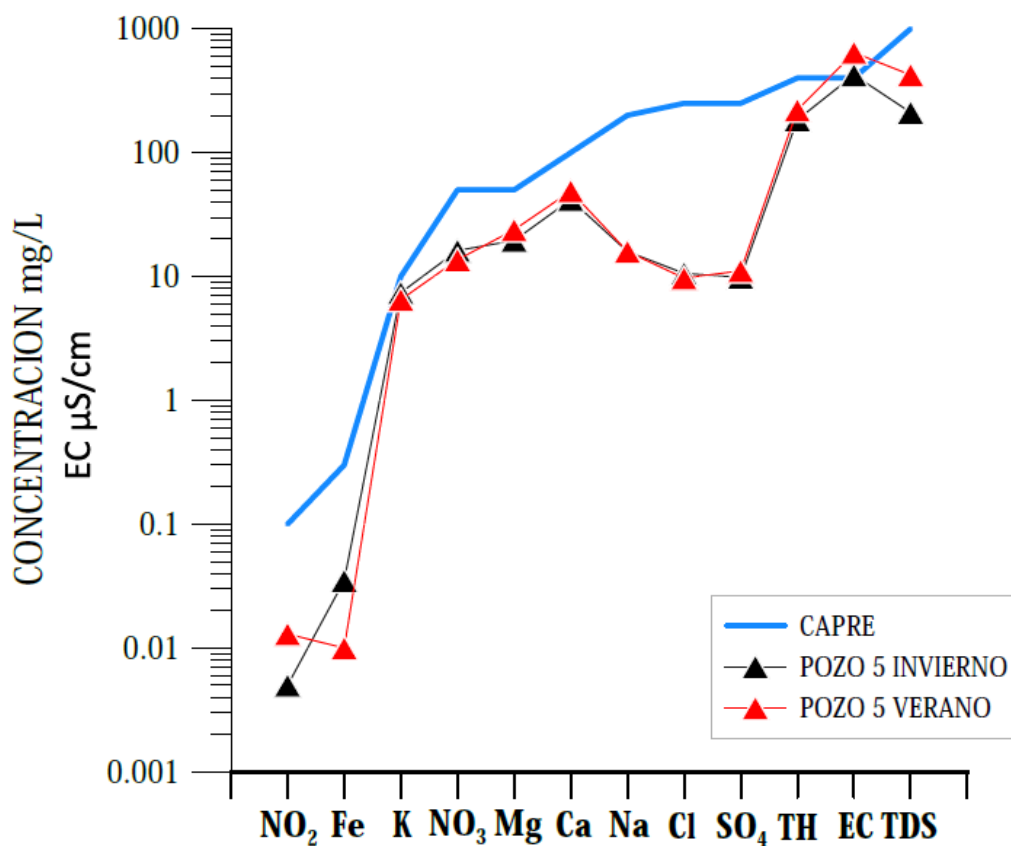


Figura 8. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 5 según la CAPRE.

El Pozo 5 muestra una elevación clara de la conductividad eléctrica (EC) durante el verano (642 $\mu\text{S}/\text{cm}$), superando significativamente el límite de 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ establecido. También se observan incrementos estacionales en TDS y en algunos cationes como Ca^{2+} y Na^{+} , asociados a la concentración de sales por evaporación y menor recarga hídrica.

Durante el invierno, aunque la EC disminuye a 424 $\mu\text{S}/\text{cm}$, permanece por encima del valor normativo, lo que sugiere una mineralización sostenida del acuífero en este punto. El resto de los parámetros se mantiene dentro de los límites permisibles, sin cambios críticos. Este pozo tiene una calidad aceptable, pero con una conductividad elevada de forma permanente, lo que indica mayor carga iónica y justifica un monitoreo continuo de su estabilidad química, especialmente si se considera para consumo prolongado.

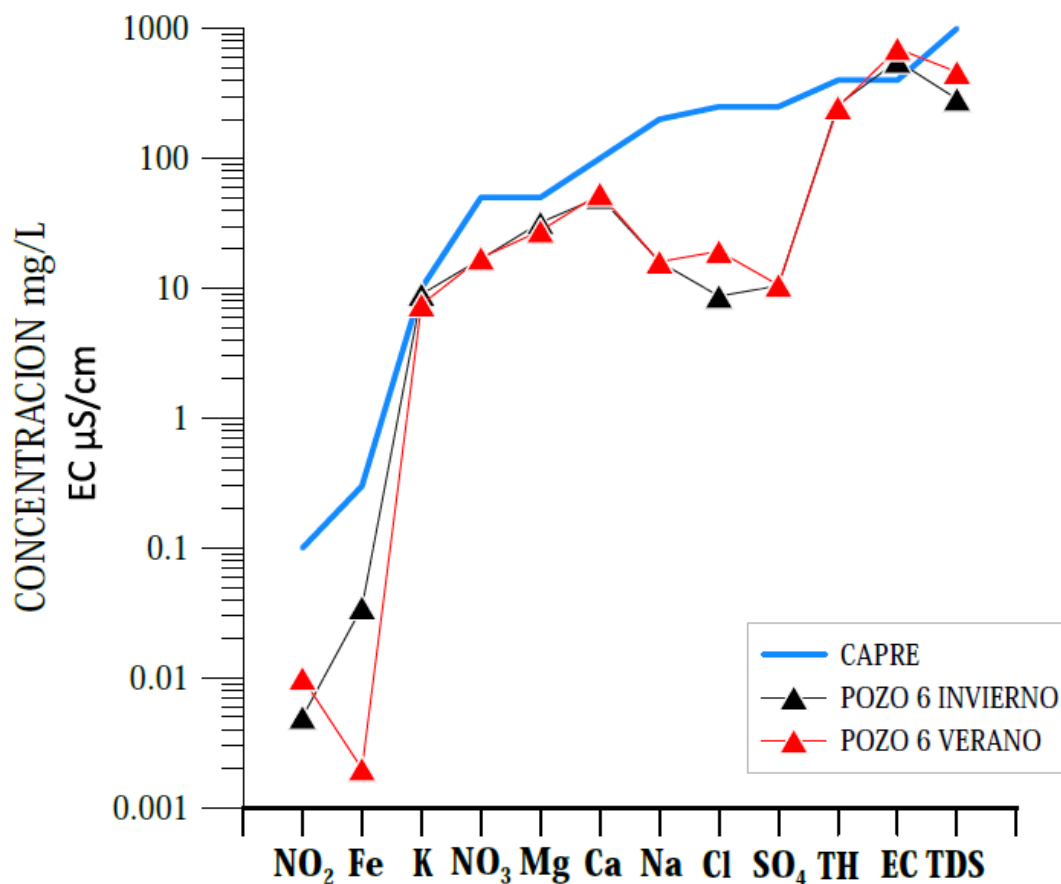


Figura 9. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 6 según la CAPRE.

El Pozo 6 presenta la conductividad eléctrica (EC) más alta de todos los pozos, con valores de 701 $\mu\text{S/cm}$ en verano y 535 $\mu\text{S/cm}$ en invierno, ambos muy por encima del límite máximo permitido (400 $\mu\text{S/cm}$). Esta condición sugiere una alta mineralización natural del acuífero, posiblemente relacionada con una mayor interacción agua-roca o características litológicas específicas.

Aunque el agua es **químicamente estable** y no representa un riesgo sanitario inmediato, la **conductividad fuera de norma en ambas estaciones** requiere **vigilancia continua**, particularmente si se prevé su uso para consumo humano o redes de distribución sensibles a incrustaciones o corrosión.

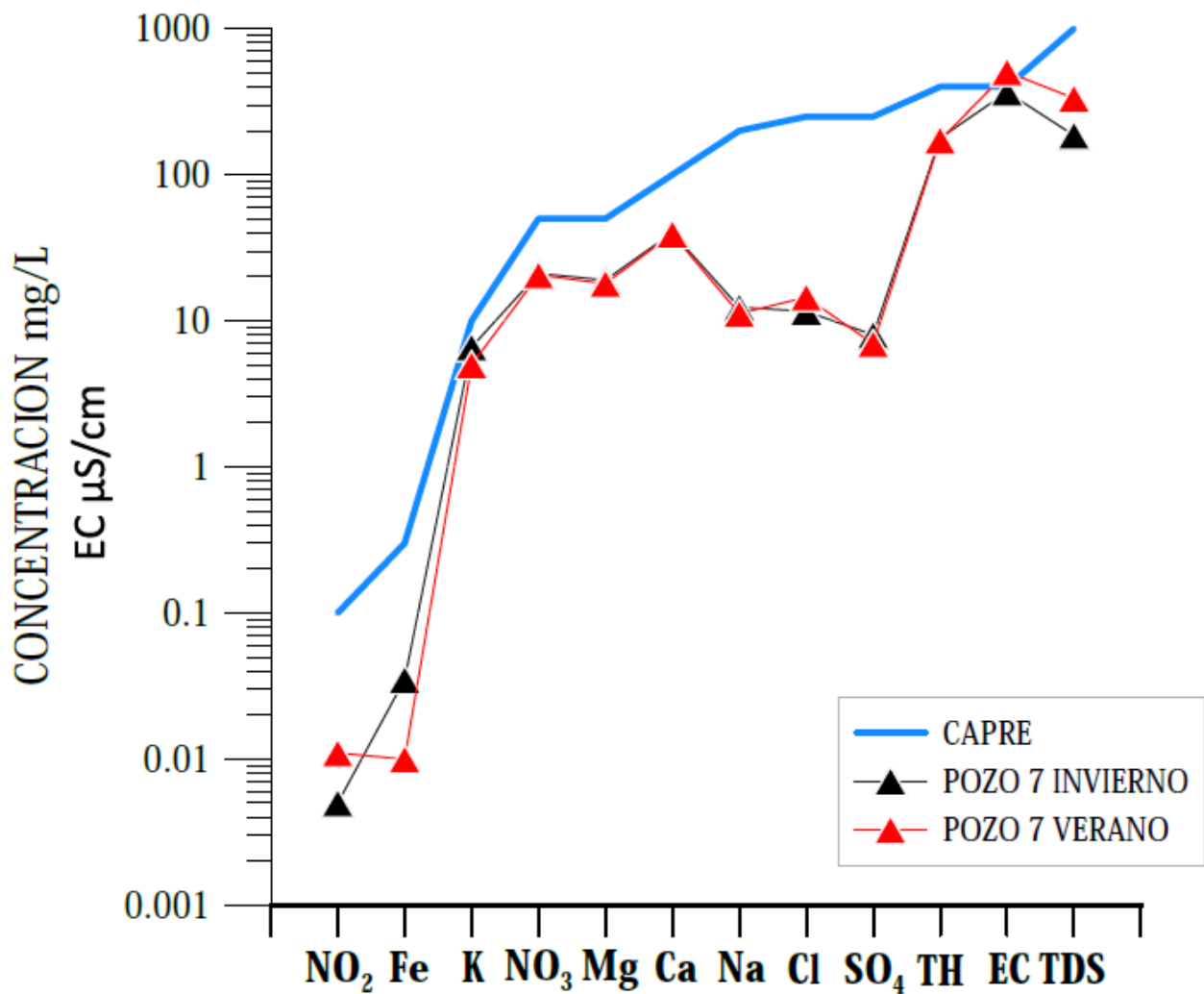


Figura 10. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 7 según la CAPRE.

El Pozo 7 presenta la mineralización más alta del conjunto. Se observa aumento en EC, TDS y dureza en época seca, acompañado de valores relativamente altos de Na, Mg y Cl. Aunque todos dentro de norma, son cercanos al umbral en algunos casos. Interpretación: El agua de este pozo es potable, pero con señales de concentración iónica que deben seguirse en años futuros, especialmente si disminuye la recarga.

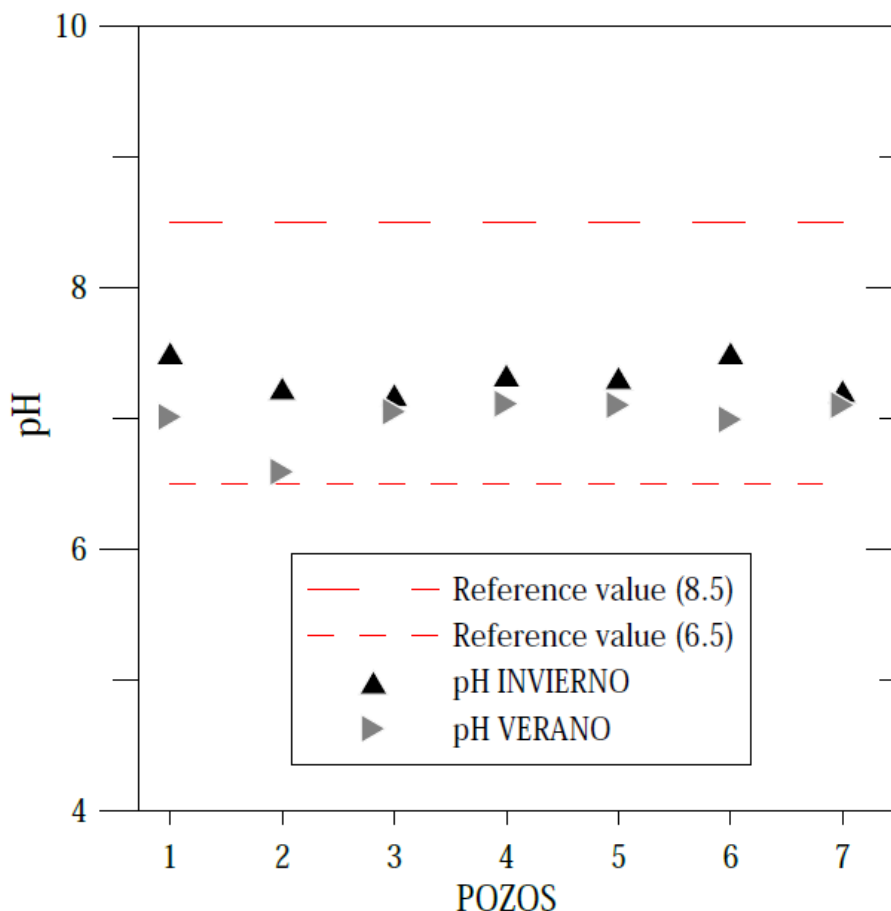


Figura 11. Comportamiento del pH en aguas subterráneas durante verano e invierno en los pozos evaluados según Norma CAPRE.

El análisis del pH en los siete pozos de agua subterránea durante las estaciones seca (verano) y lluviosa (invierno) reveló valores comprendidos entre 6.59 y 7.50, lo cual indica que todas las muestras se encuentran dentro del rango aceptable establecido por la Norma CAPRE (6.5–8.5) para agua destinada al consumo humano.

Durante la estación seca, se registraron valores ligeramente más cercanos al límite inferior de la norma, siendo el valor mínimo 6.59 en el Pozo 2. Esta leve tendencia hacia la acidez puede asociarse a una mayor concentración de dióxido de carbono (CO_2) disuelto en el agua subterránea, producto de la limitada recarga hídrica y menor

renovación del acuífero, lo cual intensifica la formación de ácido carbónico (H_2CO_3), responsable de la disminución del pH (Appelo & Postma, 2005).

En cambio, durante la época lluviosa, los valores de pH aumentaron de forma sistemática en todos los pozos, alcanzando un valor máximo de 7.50 (Pozo 1). Este comportamiento es característico de la dilución de CO_2 y aporte de bicarbonatos (HCO_3^-) procedentes de la recarga pluvial, lo que favorece un ligero desplazamiento del equilibrio ácido-base hacia condiciones más alcalinas. Este fenómeno es típico de acuíferos tamponados por el sistema carbonato–bicarbonato, y refleja un entorno geoquímico estable y sin perturbaciones externas significativas (Custodio & Llamas, 2001).

La baja variabilidad estacional y la ausencia de valores extremos permiten concluir que el pH del agua subterránea evaluada es químicamente equilibrado, y no muestra indicios de alteración por actividades antrópicas, intrusión salina ni procesos de oxidación-reducción intensos. Además, se descarta la necesidad de tratamientos correctivos para este parámetro, dado que los valores se encuentran dentro de los límites óptimos para potabilidad y no comprometen procesos como la desinfección, transporte ni distribución del recurso (WHO, 2011).

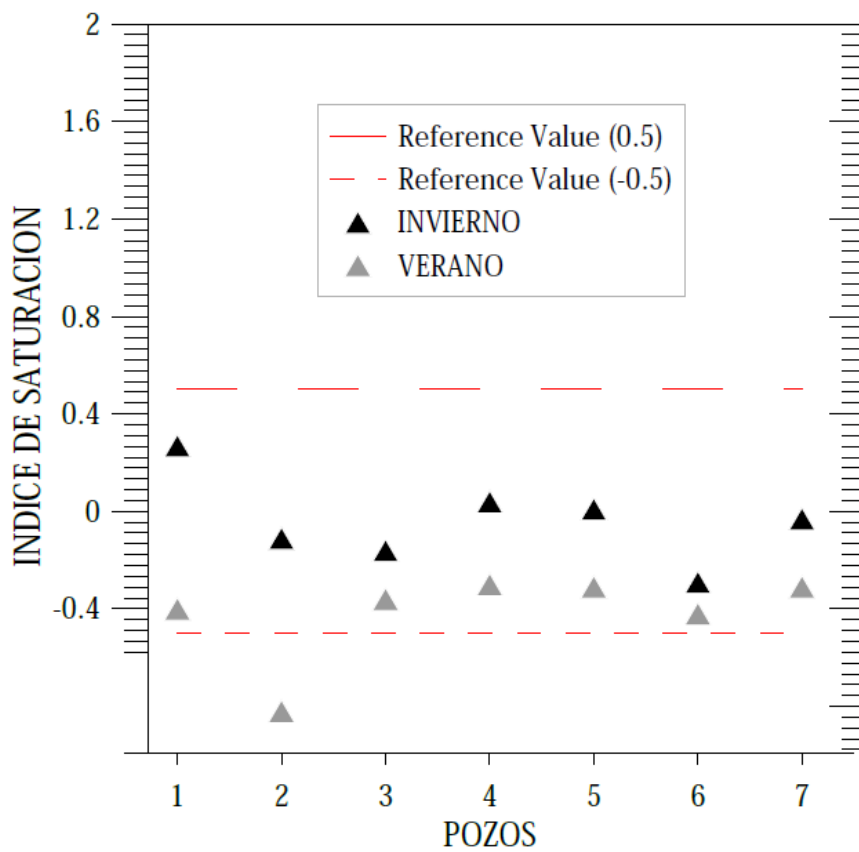


Figura 11. Comportamiento estacional del índice de saturación en pozos evaluados según Norma CAPRE.

Los valores del índice de saturación (IS) en las aguas subterráneas evaluadas se mantuvieron dentro del rango aceptable de -0.5 a $+0.5$, definido por la Norma, en la mayoría de los pozos tanto en verano como en invierno, con algunas excepciones durante el periodo seco.

Durante el verano, todos los pozos presentaron valores negativos, oscilando entre -0.820 y -0.300 , destacando el Pozo 2 con un valor por debajo del límite normativo (-0.820), lo cual indica una ligera tendencia a la corrosividad. Esto es atribuible a condiciones hidrogeoquímicas asociadas a la baja recarga, temperaturas más altas y mayor contenido de CO_2 disuelto, factores que favorecen una menor saturación de carbonatos y, por tanto, una mayor agresividad química del agua (Appelo & Postma, 2005).

En contraste, durante el invierno, todos los pozos registraron valores entre -0.290 y $+0.270$, lo que indica que el agua en esta estación se encuentra químicamente equilibrada, sin tendencia a incrustación ni a corrosión. Este comportamiento está asociado al efecto de dilución por recarga meteórica, que incrementa la alcalinidad y ajusta el equilibrio de carbonato-calcio en el sistema acuífero, estabilizando el IS dentro del rango ideal (Custodio & Llamas, 2001).

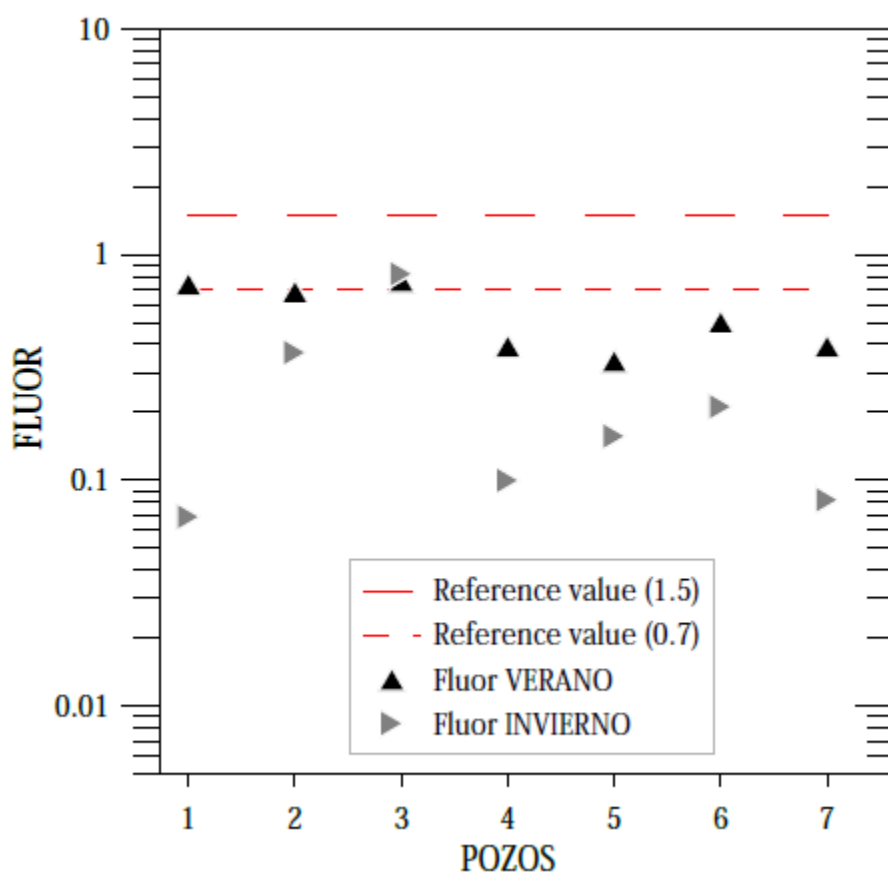


Figura 12. Comportamiento estacional del Flúor en pozos evaluados según Norma CAPRE.

Las concentraciones de flúor en los siete pozos de agua subterránea analizados mostraron un comportamiento estacional definido. En verano, los valores variaron entre 0.338 y 0.765 mg/L, mientras que en invierno oscilaron entre 0.069 y 0.820 mg/L. Según la Norma CAPRE 2010, el rango óptimo de flúor para agua de consumo humano es de 0.7 a 1.5 mg/L.

Durante la estación seca, algunos pozos alcanzaron el valor mínimo recomendado (como el Pozo 3 y Pozo 1), lo cual está relacionado con mayor tiempo de residencia del agua en el acuífero y menor dilución, lo que favorece la disolución de minerales fluorados, especialmente fluorita (CaF_2), presente en formaciones geológicas comunes en zonas volcánicas o sedimentarias (Appelo, C. A. J., & Postma, 2005)

En cambio, en invierno se observó una disminución generalizada del flúor en casi todos los pozos, atribuida a la recarga meteórica. El ingreso de agua superficial más fresca y con menor tiempo de contacto con la roca provoca una dilución de los iones presentes en el acuífero, incluyendo el flúor. Esto es un comportamiento típico en acuíferos con régimen dinámico, y ha sido ampliamente documentado en estudios hidrogeoquímicos regionales (Custodio, E., & Llamas, 2001)

Desde el punto de vista de la salud pública, ninguna muestra supera el límite superior de 1.5 mg/L, por lo tanto, no existe riesgo de fluorosis dental o esquelética. Sin embargo, la mayoría de los pozos no alcanzan el valor mínimo recomendado, especialmente en la estación lluviosa, lo cual puede comprometer los beneficios profilácticos del flúor frente a caries dentales (World Health Organization (WHO), 2011). En regiones donde esta agua constituye la fuente principal de consumo, se recomienda evaluar la posibilidad de suplementación externa o programas de fluoración alternativa.

5.2. AGUA PARA USO EN LA INDUSTRIA QUIMICA

Con el fin de evaluar la aptitud del agua subterránea para su reutilización en la industria química, se analizaron diez parámetros fisicoquímicos en muestras provenientes de siete pozos del municipio de Posoltega, durante la estación seca (marzo) e invernal (octubre). Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores de referencia establecidos por la Environmental Protection Agency (EPA, 2004) en su documento “*Guidelines for Water Reuse*”, el cual propone límites orientativos de calidad del agua reutilizada para procesos industriales, incluyendo el sector químico. A continuación, se presenta la discusión de cada parámetro.

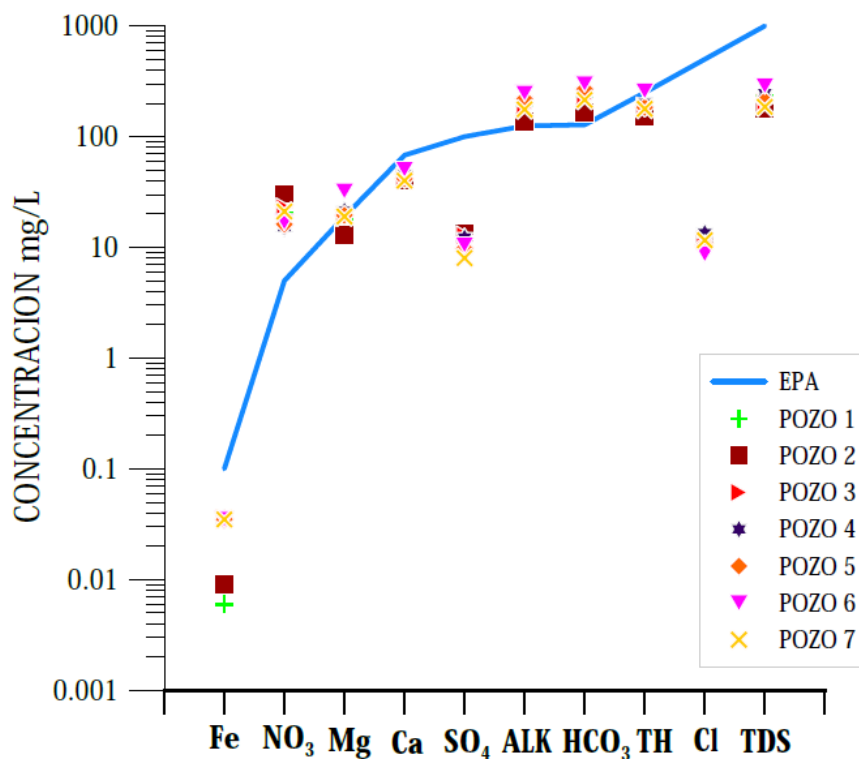


Figura 13. Comparación de calidad del agua subterránea con estándares EPA para industria química – Invierno

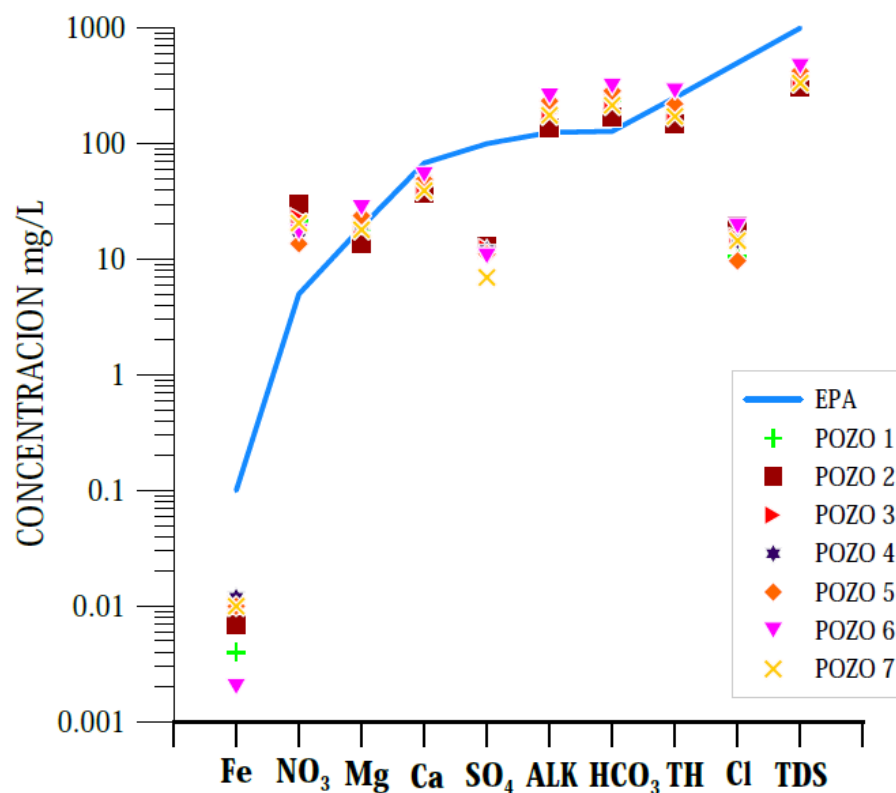


Figura 14. Comparación de calidad del agua subterránea con estándares EPA para industria química – Verano

5.2.1. Hierro (Fe)

Los resultados obtenidos indican que, durante ambas estaciones del año, las concentraciones registradas en los siete pozos evaluados se mantienen por debajo del valor máximo de 0.1 mg/L establecido por la EPA. Este límite está diseñado para evitar complicaciones técnicas relacionadas con la precipitación de hierro, la formación de incrustaciones, y el deterioro de equipos por acumulación metálica.

Durante la estación lluviosa, se registraron las concentraciones más elevadas, con valores que oscilaron entre 0.035 mg/L, presentes en los pozos 3 al 7, y un mínimo de 0.006 mg/L en el pozo 1. En cambio, en la estación seca, los valores fueron menores y se mantuvieron entre 0.002 y 0.012 mg/L, siendo el pozo 6 el que reportó la concentración más baja. Este comportamiento muestra que, si bien los niveles de hierro aumentan en época lluviosa, todas las concentraciones permanecen dentro del límite

permitido por la EPA, lo que garantiza la compatibilidad técnica de este recurso con los requerimientos de la industria química.

Desde el enfoque de calidad de agua para usos industriales, las concentraciones obtenidas no representan una limitante significativa. La presencia de hierro en niveles moderados, como los observados, no afecta negativamente procesos de síntesis química ni genera riesgos relevantes para la integridad de los equipos. Además, este nivel de concentración no requiere la implementación de tratamientos de remoción de hierro, como la oxidación-filtración, lo que favorece la eficiencia operativa en términos de costos y mantenimiento. Es importante destacar que, en los procesos industriales donde el agua es utilizada como medio de enfriamiento o transporte, mantener el hierro por debajo del umbral EPA reduce significativamente el riesgo de incrustaciones metálicas y de interferencias con catalizadores o procesos sensibles.

5.2.2. Nitratos (NO_3^-)

Los resultados obtenidos evidencian que, durante ambas estaciones del año, las concentraciones registradas en los siete pozos evaluados superan ampliamente el límite máximo de **5 mg/L**. Este valor de referencia tiene como propósito asegurar condiciones de calidad adecuadas que permitan la operación eficiente y segura de sistemas industriales donde el agua actúa como insumo, medio de enfriamiento o vehículo de reacción.

Durante la estación seca, las concentraciones de nitratos oscilaron entre 13.65 mg/L y 30.03 mg/L, mientras que en la estación lluviosa se registraron valores comprendidos entre 15.22 mg/L y 30.44 mg/L. Los pozos 2, 3 y 1 presentaron los niveles más altos en ambas temporadas, superando en algunos casos hasta seis veces el límite permitido. La escasa variación estacional entre los valores sugiere un incumplimiento sostenido e independiente del periodo climático, lo cual afecta de forma estructural la calidad del recurso para fines industriales.

Desde la perspectiva técnico-industrial, estas concentraciones de nitratos representan una limitante relevante para su uso en la industria química. La presencia de este anión en el agua puede interferir en reacciones químicas sensibles, particularmente aquellas

que dependen de condiciones redox estrictamente controladas. Además, su presencia contribuye a la proliferación microbiológica en sistemas de enfriamiento y almacenamiento, lo que reduce la eficiencia térmica, aumenta la formación de biopelículas y eleva los requerimientos de mantenimiento. Adicionalmente, el contenido elevado de nitratos incrementa el potencial corrosivo del agua, sobre todo en presencia de otros iones agresivos como cloruros y sulfatos, afectando negativamente la durabilidad de los equipos metálicos utilizados en procesos industriales.

5.2.3. Magnesio (Mg)

Las concentraciones registradas en ambas estaciones de los pozos evaluados superan el valor guía de 19 mg/L establecido por la EPA como límite máximo. Este umbral busca prevenir efectos adversos en sistemas donde el magnesio puede contribuir a la formación de incrustaciones, aumento de la dureza total y deterioro de la eficiencia operativa de calderas e intercambiadores de calor.

Durante la estación seca, las concentraciones oscilaron entre 13.1 y 32.1 mg/L, siendo el pozo 6 el que presentó el valor más elevado, seguido por los pozos 4, 5 y 7, los cuales también se ubicaron en o por encima del límite permitido. En la estación lluviosa, los valores estuvieron entre 13.6 y 27.7 mg/L, y nuevamente el pozo 6 mostró la mayor concentración, acompañado por el pozo 5. En ambas estaciones, los pozos 1, 2 y 3 se mantuvieron dentro del rango permitido, mientras que los demás excedieron el límite establecido, aunque sin presentar diferencias marcadas entre periodos.

Desde el punto de vista del uso del agua en la industria química, la presencia de magnesio por encima del valor guía representa una limitación técnica parcial, ya que este parámetro está estrechamente relacionado con la dureza del agua y puede influir negativamente en procesos donde la acumulación de sales representa un riesgo. Su presencia elevada favorece la formación de depósitos en líneas de conducción y en superficies de transferencia de calor, lo cual reduce la eficiencia térmica y aumenta la necesidad de mantenimiento. Además, puede interferir con la operación de sistemas de tratamiento que emplean intercambio iónico o membranas, disminuyendo su capacidad de remoción de otros iones críticos.

5.2.4. Calcio (Ca) y Sulfato (SO₄)

Las concentraciones de calcio (Ca) y sulfatos (SO₄²⁻) obtenidas en ambos periodos de muestreo se mantuvieron por debajo de los valores guía establecidos por la **EPA** para reutilización de agua en la industria química, que son de **68 mg/L para Ca** y **100 mg/L para SO₄**. Durante la estación seca, el calcio varió entre **36.9 y 53.7 mg/L**, y en la lluviosa entre **40.1 y 50.5 mg/L**, siendo el pozo 6 el que presentó las concentraciones más altas en ambas estaciones. En cuanto a los sulfatos, los valores oscilaron entre **6.97 y 13.31 mg/L** en ambos periodos, sin diferencias estacionales marcadas.

Ambos parámetros se encuentran dentro de los rangos aceptables para procesos industriales. El calcio no alcanza niveles que representen un riesgo significativo de incrustaciones o interferencias térmicas, y los bajos niveles de sulfatos no comprometen la estabilidad química del agua ni incrementan su potencial corrosivo. En conjunto, los resultados indican que el agua subterránea evaluada **cumple con los criterios de calidad para su uso en la industria química** en relación con estos dos parámetros, sin requerir tratamiento adicional.

5.2.5. Alcalinidad, Bicarbonatos (HCO₃⁻) y Dureza Total

Las concentraciones obtenidas para alcalinidad, bicarbonatos y dureza total superan de forma consistente los valores guía propuestos por la EPA para procesos industriales en el sector químico, que establecen límites de 125 mg/L para alcalinidad, 128 mg/L para HCO₃⁻, y 250 mg/L para dureza total. Durante ambas estaciones del año, todos los pozos registraron valores de alcalinidad y bicarbonatos superiores al umbral permitido, con concentraciones que oscilaron entre 136.1 y 256.2 mg/L para alcalinidad, y entre 166.0 y 312.4 mg/L para HCO₃⁻. En contraste, la dureza total se mantuvo dentro del límite en la mayoría de los pozos, con valores entre 148.1 y 248.2 mg/L, aunque el pozo 6 en invierno presentó un valor que excedió ligeramente el límite establecido.

Desde el punto de vista técnico-industrial, el exceso de alcalinidad y bicarbonatos representa una condición desfavorable para ciertos procesos químicos, ya que puede provocar inestabilidad del pH, interferencias en procesos de neutralización, y aumento del riesgo de incrustaciones cuando coexisten con iones como calcio y magnesio.

Aunque la dureza total permanece mayormente dentro de los límites, sus valores cercanos al umbral máximo indican una condición de dureza elevada, especialmente en pozos como el 6 y el 5, que podrían requerir pretratamiento si el agua se utiliza en sistemas térmicos o de enfriamiento.

En conjunto, los resultados sugieren que el agua subterránea analizada no cumple con los criterios de calidad para alcalinidad y HCO_3^- establecidos por la EPA para la industria química, y que la dureza total se mantiene en el límite aceptable, aunque requiere vigilancia en pozos específicos. Su uso en procesos industriales estaría condicionado a una evaluación del impacto operativo y, en caso necesario, al empleo de tecnologías de ablandamiento o estabilización química del agua.

5.2.6. Cloruros (Cl^-) y Sólidos Disueltos Totales (TDS)

Los resultados obtenidos para cloruros (Cl^-) y sólidos disueltos totales (TDS) en los siete pozos evaluados durante ambas estaciones del año muestran cumplimiento generalizado con los límites establecidos por la EPA (2004) para procesos industriales en la industria química, los cuales son de 500 mg/L para cloruros y 1000 mg/L para TDS.

En el caso de los cloruros, las concentraciones oscilaron entre **8.7 y 13.5 mg/L** durante la estación lluviosa, y entre **9.7 y 19.3 mg/L** en la estación seca. Aunque se observó un ligero aumento en verano, especialmente en los pozos 2, 3 y 6, **todos los valores se mantuvieron por debajo del umbral normativo**, sin representar un riesgo técnico desde el punto de vista de corrosión o interferencias químicas en los procesos industriales.

Respecto a los sólidos disueltos totales, en invierno las concentraciones variaron entre **178 y 287 mg/L**, mientras que en verano se registraron valores más altos, entre **311 y 463 mg/L**. Si bien se evidencia un incremento estacional atribuible a fenómenos de concentración por evaporación, **ningún pozo superó el límite máximo de 1000 mg/L**, lo cual indica que el agua conserva una calidad aceptable para su reutilización industrial sin comprometer la operación de sistemas térmicos, membranas o procesos químicos sensibles a la carga salina.

En conjunto, los valores obtenidos para cloruros y TDS se encuentran **dentro del rango aceptable para la industria química según la EPA**, lo que permite considerar que el agua subterránea analizada es técnicamente adecuada para este tipo de aplicación sin requerir tratamiento adicional para estos dos parámetros. No obstante, se recomienda mantener un control estacional sobre el contenido de sales totales en los pozos con mayor concentración, particularmente durante la época seca.

5.2.7. ANÁLISIS INDIVIDUALIZADO POR POZO PARA LA INDUSTRIA QUIMICA

Con el fin de identificar las variaciones espaciales y estacionales en la calidad del agua subterránea del municipio de Posoltega, se realizó un análisis individualizado por pozo, comparando las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos durante la estación seca (marzo) y la estación lluviosa (octubre).

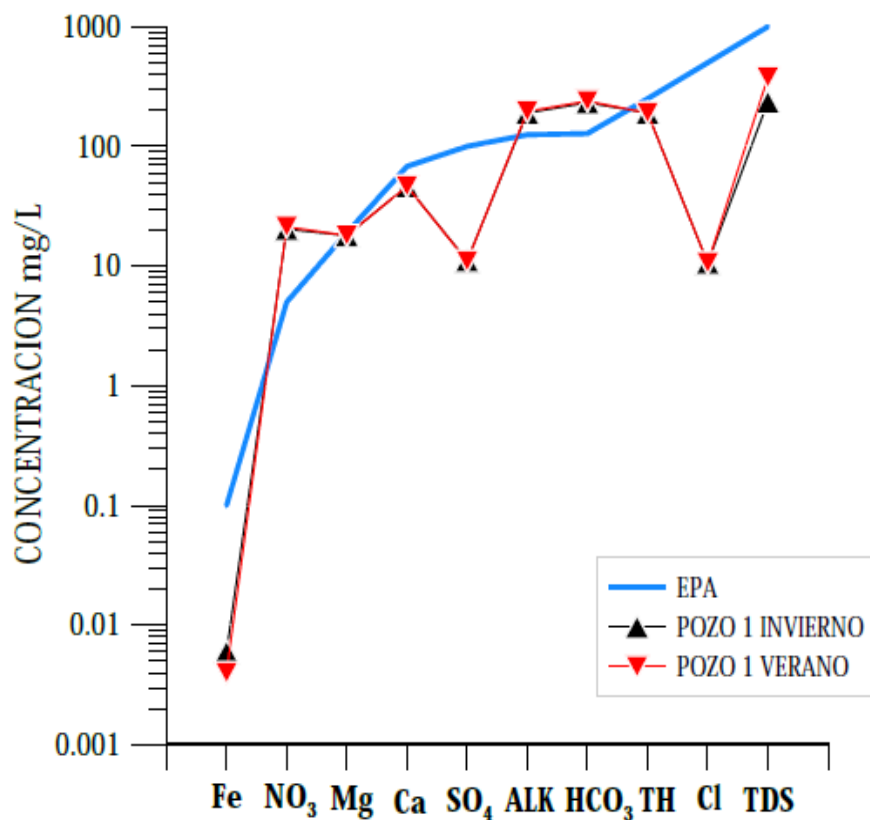


Figura 15. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 1 Según criterios EPA.

El análisis del Pozo 1, muestra una composición química estable entre invierno y verano. El nitrato, la alcalinidad y los bicarbonatos superan los límites recomendados, representando las principales restricciones para su uso industrial. El resto de los parámetros, como magnesio, calcio, sulfatos, cloruros, dureza total, TDS y hierro, permanecen dentro de los valores aceptables, sin cambios críticos entre estaciones.

Interpretación: El pozo 1 es químicamente estable para la mayoría de los parámetros, pero el alto contenido de **nitratos**, **alcalinidad** y **bicarbonatos** limita su uso directo en la industria química. Se requiere tratamiento previo para garantizar su compatibilidad con procesos industriales.

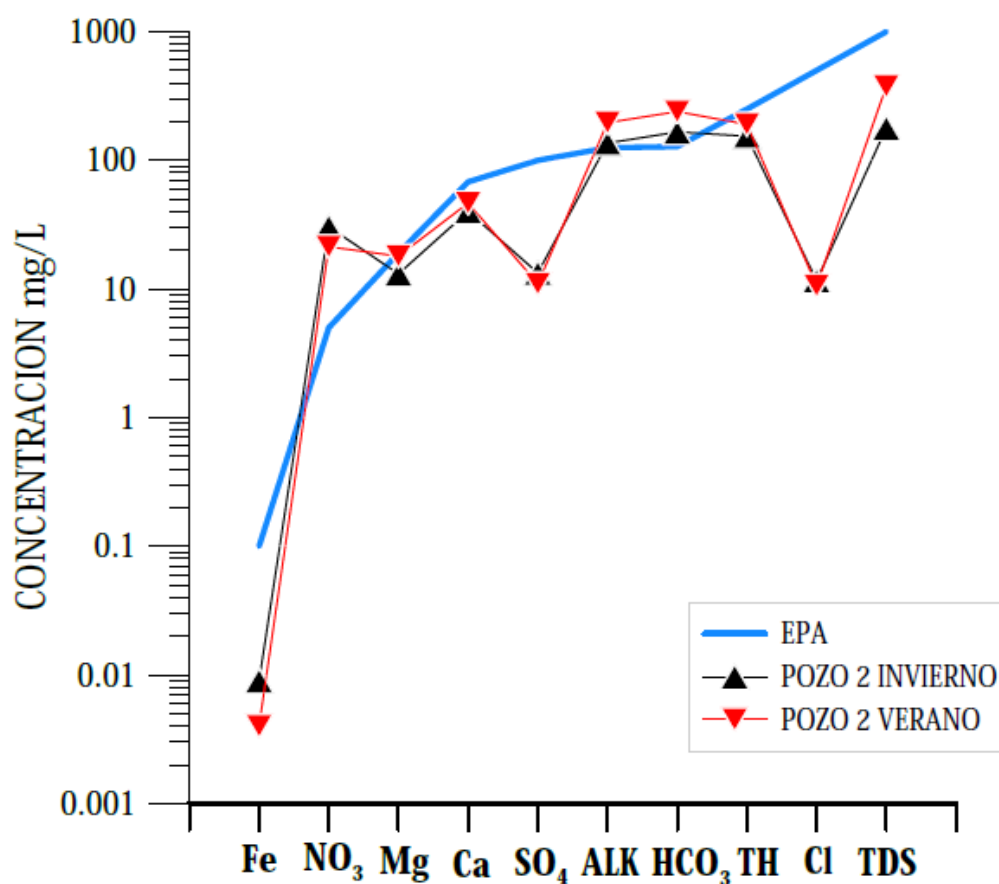


Figura 16. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 2 Según criterios EPA.

El Pozo 2 muestra variaciones visibles en hierro, cloruros y TDS entre invierno y verano. Durante la estación seca, se observa un aumento en cloruros y TDS, mientras que el hierro disminuye. Esta tendencia indica una mayor concentración salina en verano. El resto de los parámetros, como magnesio, calcio, sulfatos, alcalinidad, bicarbonatos y dureza total, se mantienen más estables.

Interpretación: El Pozo 2 presenta variaciones entre estaciones, con exceso de nitratos, aumento de alcalinidad y bicarbonatos en verano, lo que requiere tratamiento previo para su uso en la industria química.

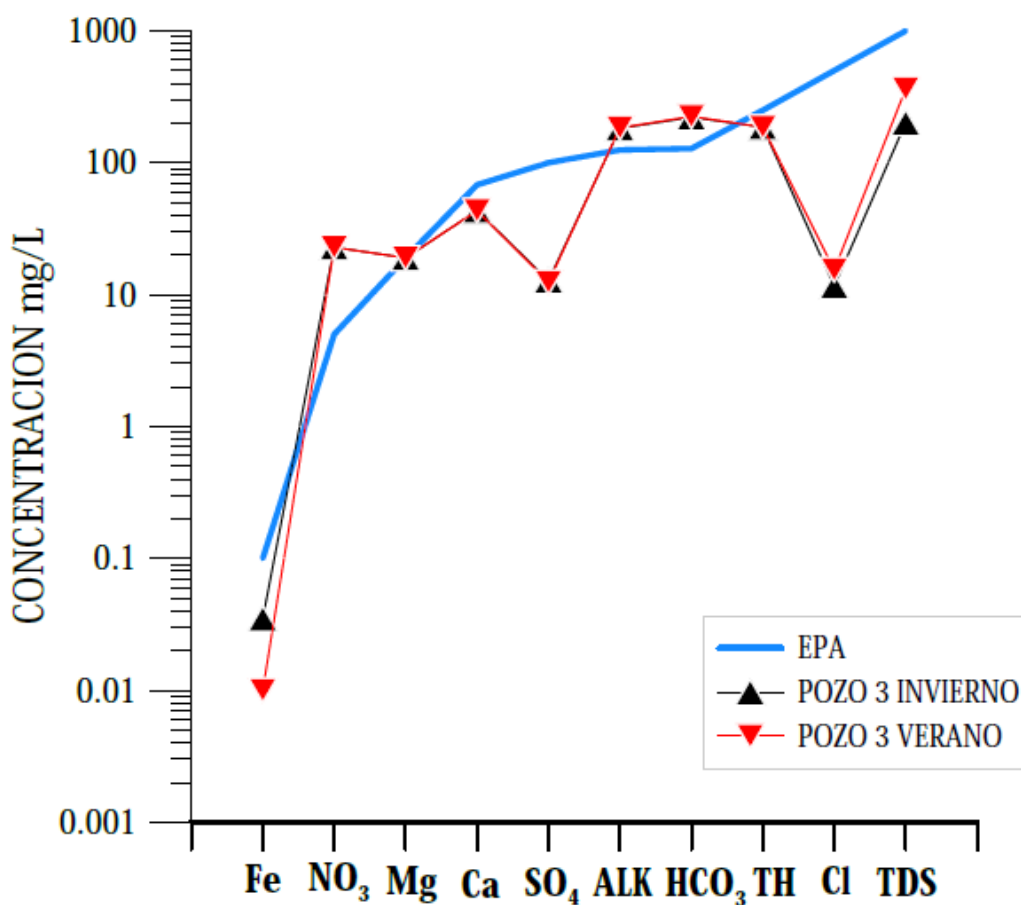


Figura 17. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 3 Según criterios EPA.

En el Pozo 3 se observa disminución del hierro y aumento de cloruros y TDS en verano, mientras que el resto de los parámetros se mantiene estable entre estaciones. Frente a los límites de la EPA, el agua presenta incumplimiento en nitratos, alcalinidad y bicarbonatos en ambas temporadas

Interpretación:

El agua muestra un ligero deterioro en verano por mayor concentración salina, y su uso industrial requiere tratamiento para ajustar los parámetros fuera de norma.

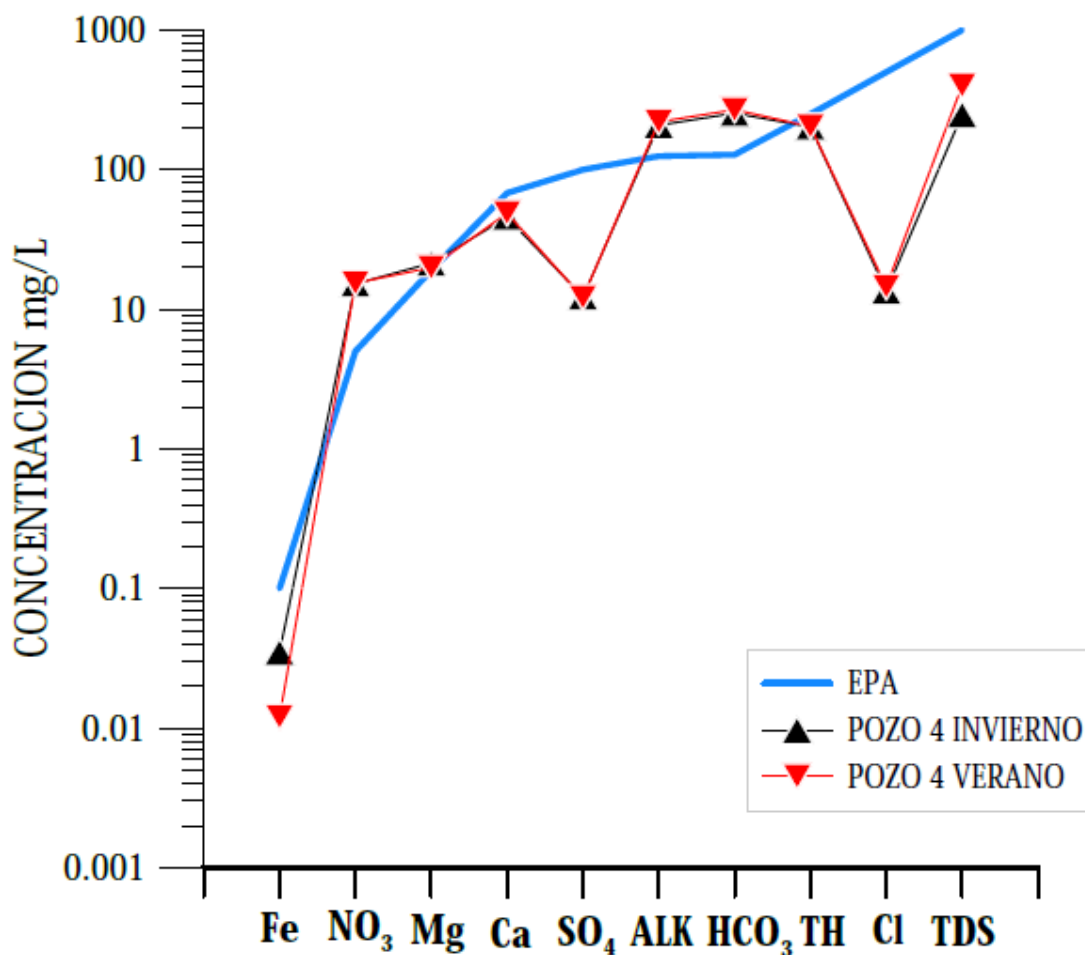


Figura 18. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 4 Según criterios EPA.

El Pozo 4 presenta variaciones estacionales marcadas en hierro, cloruros y TDS. En verano, se observa una disminución significativa del hierro, mientras que los cloruros y TDS aumentan, reflejando una mayor concentración salina durante la estación seca. El resto de los parámetros se mantiene relativamente estable entre estaciones.

Interpretación: La calidad del agua del Pozo 4 se ve afectada por el incremento de sales en verano y por parámetros que exceden los valores permitidos, por lo que requiere tratamiento previo para su uso en la industria química.

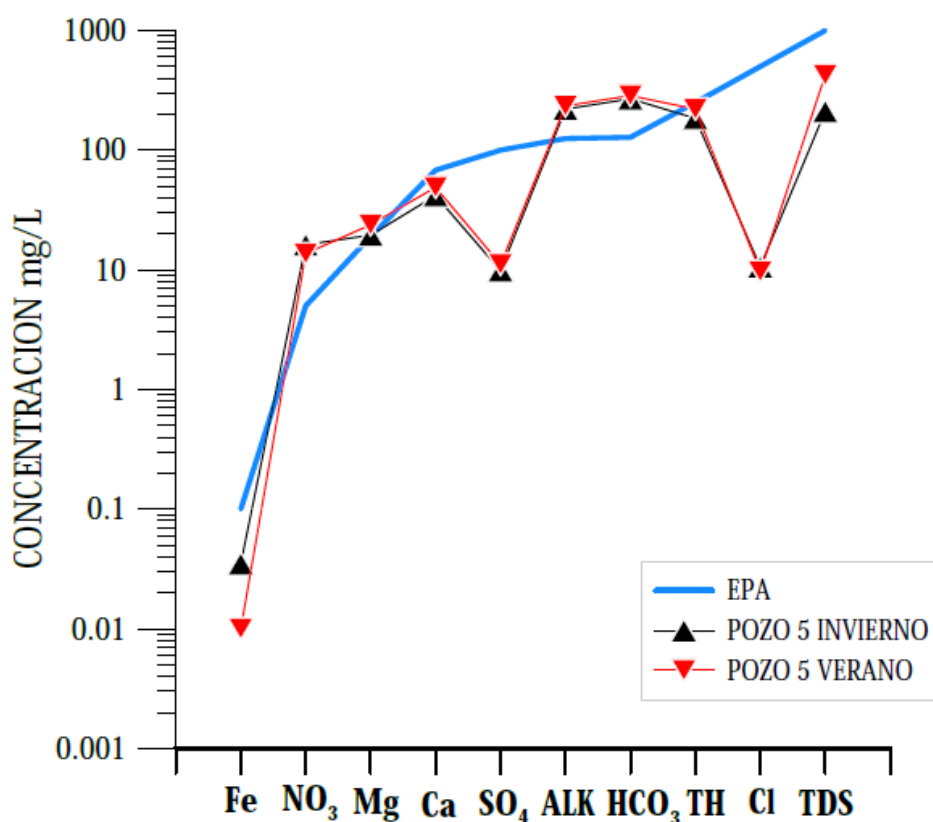


Figura 19. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 5 Según criterios EPA.

En el Pozo 5 se observan variaciones marcadas en hierro, cloruros y TDS entre estaciones. En verano, el gráfico muestra un aumento significativo en TDS y cloruros, lo que refleja una mayor concentración salina durante la estación seca. Por el contrario, el hierro disminuye visiblemente. El resto de los parámetros se mantiene relativamente constante.

Interpretación: La calidad del agua del Pozo 5 se deteriora en verano por el aumento de sales disueltas. Se requiere tratamiento previo debido a los niveles elevados de nitratos y compuestos alcalinos para ser apta en la industria química.

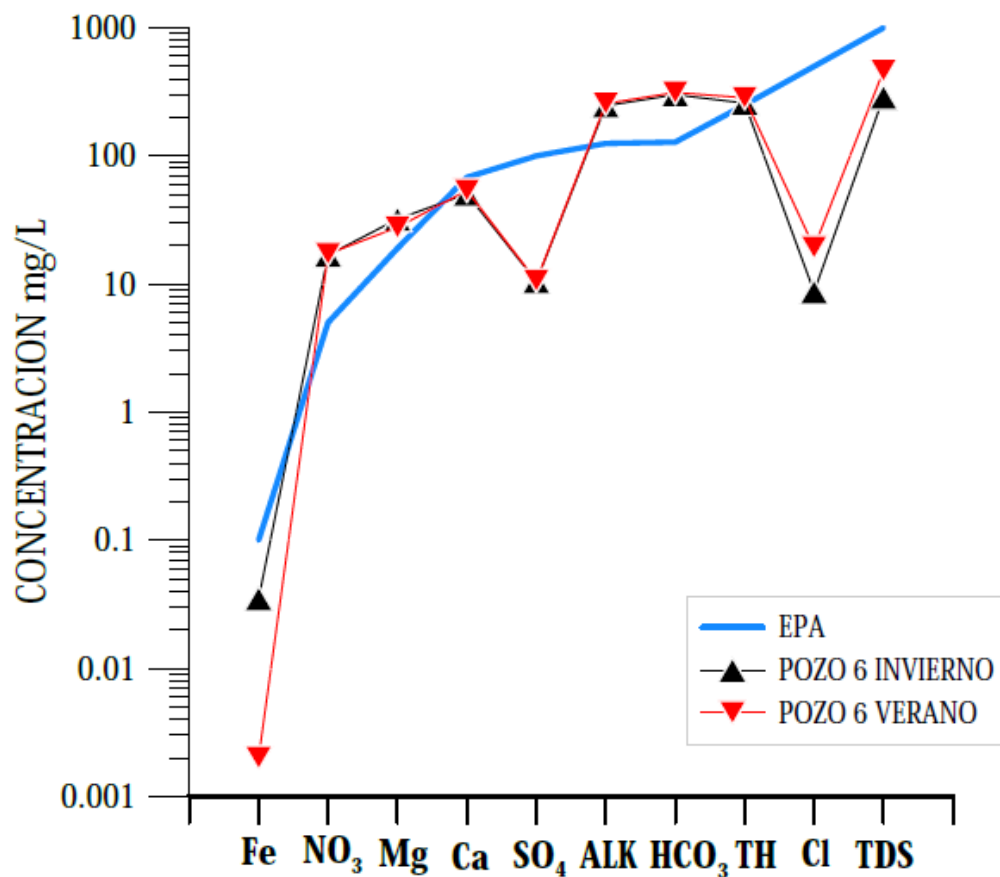


Figura 20. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 6 Según criterios EPA.

En el Pozo 6 se observan variaciones significativas en hierro, cloruros y TDS entre estaciones. El gráfico muestra un aumento marcado en cloruros y TDS durante el verano, lo que indica una acumulación de sales en la estación seca. A su vez, el hierro disminuye considerablemente en esa misma temporada.

Interpretación: El Pozo 6 presenta alta carga iónica sostenida y mayor concentración salina en verano, lo que lo convierte en una fuente de agua no apta para uso industrial sin un tratamiento integral previo.

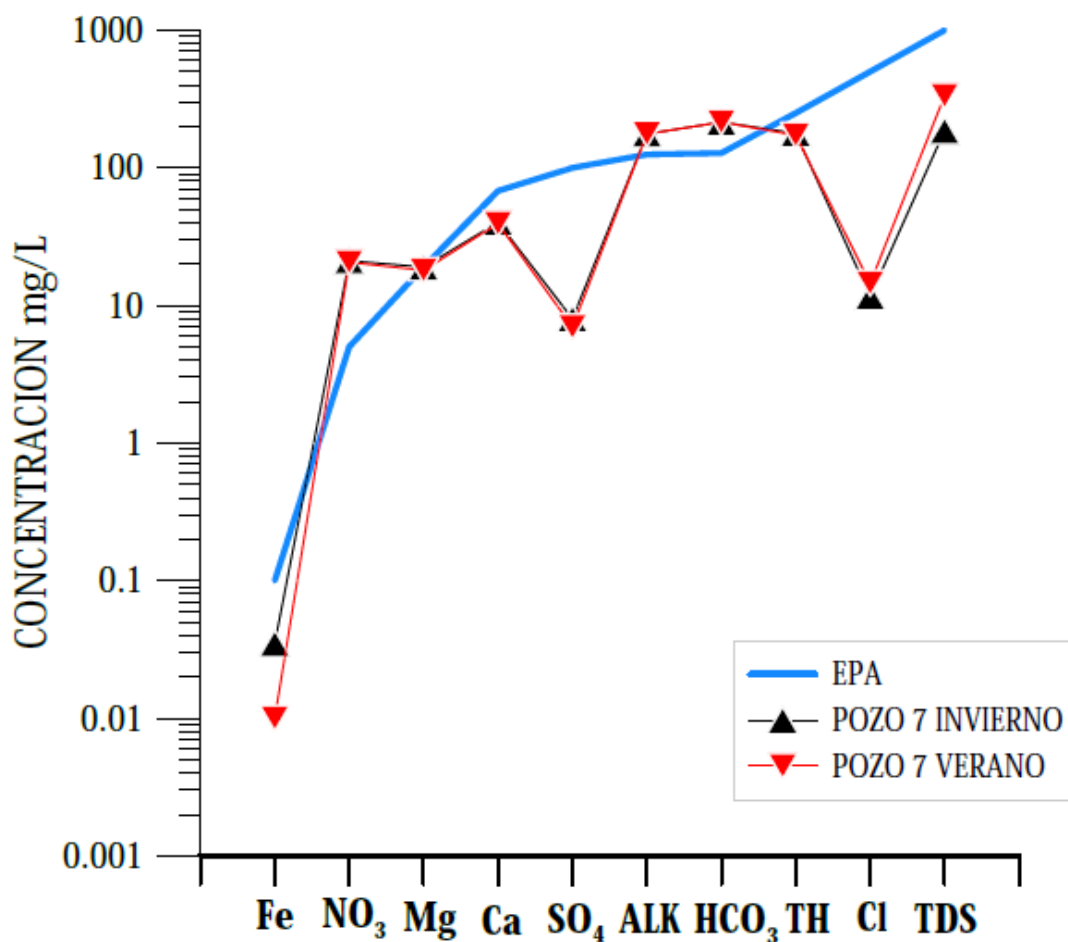


Figura 21. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 7 Según criterios EPA.

En el Pozo 7 se observan variaciones visibles entre estaciones en hierro, cloruros y TDS. Durante el verano, el gráfico muestra un aumento en cloruros y TDS, lo que indica una mayor concentración de sales disueltas en la estación seca. El hierro disminuye de forma notable, mientras que el resto de los parámetros, como nitratos, magnesio, calcio, sulfatos, alcalinidad, bicarbonatos y dureza total, se mantienen prácticamente constantes entre invierno y verano.

Interpretación: El Pozo 7 mantiene una composición química relativamente estable, aunque el aumento de sales en verano y los parámetros fuera de norma hacen necesario un tratamiento previo para su aplicación en la industria química.

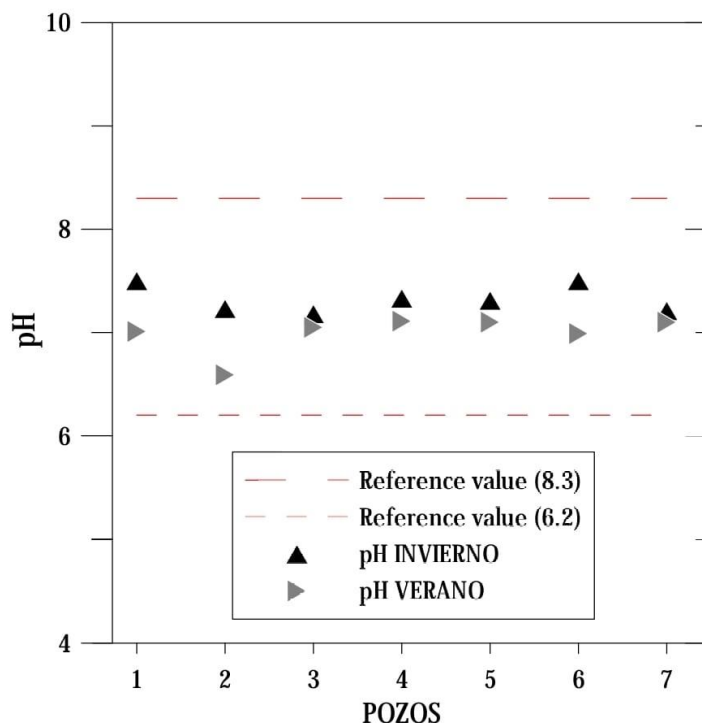


Figura 22. Comportamiento estacional del pH en pozos evaluados según los criterios de EPA.

Los valores de pH obtenidos en los siete pozos, tanto en la estación seca como en la lluviosa, se mantienen dentro de un intervalo ligeramente ácido a neutro, con registros entre 6.59 y 7.50. Aunque no se exceden rangos críticos, se evidencia una tendencia a valores más bajos en verano, principalmente en los pozos 2 y 6, donde el pH desciende cerca del límite inferior.

Para la industria química, la estabilidad del pH es un aspecto crucial, ya que muchas operaciones requieren condiciones de pH controladas para evitar interferencias en procesos de reacción, corrosión de equipos o alteraciones en la eficacia de tratamientos químicos. Si bien los valores registrados no presentan riesgos extremos, los descensos en la estación seca podrían comprometer procesos sensibles, especialmente aquellos que operan en rangos estrictamente neutros o levemente alcalinos.

Interpretación:

El pH del agua subterránea es aceptable para su uso en la industria química, pero se recomienda monitoreo y ajuste en procesos sensibles, especialmente durante el verano, debido a la tendencia a valores más cercanos a la acidez en algunos pozos,

5.3. AGUA PARA USO AGRICOLA

Se evaluaron los parámetros fisicoquímicos fluoruro, hierro, nitratos y cloruros en muestras de agua subterránea de siete pozos del municipio de Posoltega, durante las estaciones seca (marzo) y lluviosa (octubre). Las concentraciones obtenidas se compararon con los valores de referencia establecidos en los "Estándares de Calidad del Agua de Riego y Estrategias de Gestión de la Salinidad" de Texas A&M. El análisis consideró que las variaciones estacionales, el comportamiento entre pozos y la conformidad con los límites recomendados para riego agrícola, poniendo énfasis en los posibles efectos sobre la salinidad del suelo y la calidad del agua para el desarrollo de los cultivos.

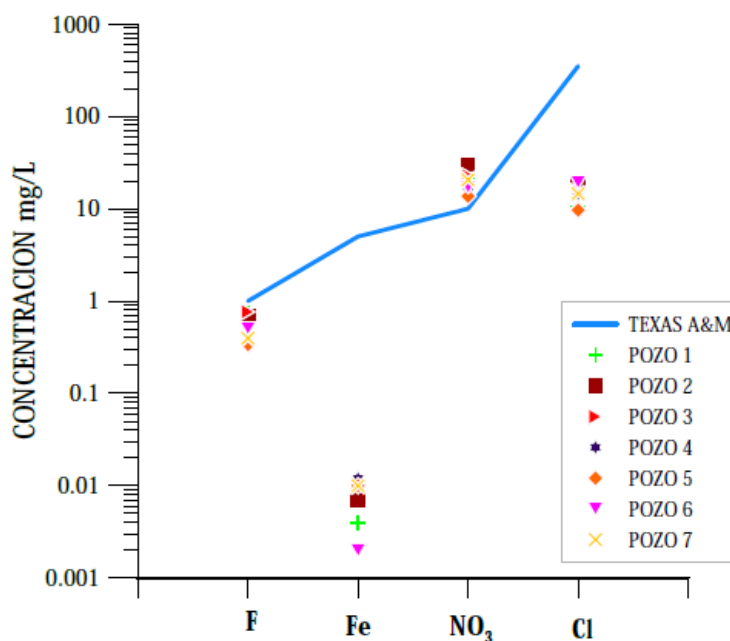


Figura 23. Concentración de parámetros recomendado por los estándares de calidad de agua de riego en los siete pozos durante verano.

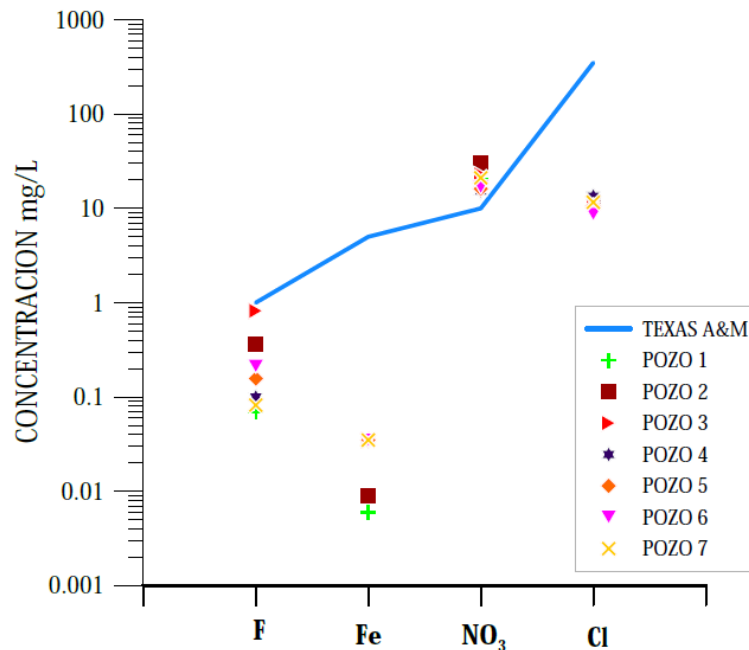


Figura 24. Concentración de parámetros recomendado por los estándares de calidad de agua de riego en los siete pozos durante invierno.

5.3.1. Flúor (F⁻)

El análisis de las concentraciones de fluoruro en los siete pozos de Posoltega durante las estaciones seca y lluviosa muestra que este parámetro se mantiene consistentemente por debajo del límite de 1 mg/L establecido para el uso de agua en riego agrícola. Los gráficos de dispersión permiten observar que, en verano, algunos pozos presentan concentraciones de fluoruro ligeramente superiores en comparación con el invierno, aunque sin superar en ningún caso el valor de referencia.

El comportamiento entre los diferentes pozos no revela grandes diferencias en la concentración de fluoruro, manteniéndose todos dentro de rangos aceptables para el riego. Esto sugiere que la composición geológica del área de estudio aporta de forma homogénea este ion al agua subterránea y que no existen fuentes puntuales significativas de enriquecimiento de fluoruro en el acuífero.

Desde el punto de vista de la gestión de la salinidad y la aptitud para riego, las concentraciones de fluoruro encontradas no representan un riesgo para los cultivos ni

para la estructura del suelo. Además, dado que el fluoruro es inactivado en suelos de pH neutro o alcalino, su presencia en los niveles detectados no implicaría restricciones adicionales para el uso agrícola del recurso hídrico en el municipio de Posoltega.

5.3.2. Hierro (Fe)

El análisis de las concentraciones de hierro (Fe) en los siete pozos del municipio de Posoltega, durante las estaciones seca y lluviosa, muestra valores significativamente por debajo del límite máximo recomendado de 5 mg/L para el uso en riego agrícola. En la estación seca (marzo), las concentraciones de hierro se mantienen en niveles mínimos, inferiores a 0.015 mg/L, reflejando condiciones hidrodinámicas estables y una baja presencia de hierro disuelto en el acuífero. Este comportamiento sugiere una buena calidad del agua en términos de disponibilidad y movilidad del hierro, sin generar riesgos de precipitación ni toxicidad para los cultivos.

Durante la estación lluviosa (octubre), se observa un incremento generalizado de las concentraciones, alcanzando hasta 0.035 mg/L en varios pozos. Aunque este aumento puede atribuirse al arrastre de partículas finas y a la movilización de hierro asociado a procesos de lixiviación o reducción de óxidos en suelos saturados, las concentraciones siguen siendo muy inferiores al umbral permitido, lo que indica que no existe una amenaza para la calidad del agua destinada al riego.

Desde el punto de vista agronómico, estas concentraciones de hierro no representan ningún riesgo para los cultivos ni afectan la estructura del suelo. Valores por debajo de 5 mg/L no generan efectos adversos ni requieren acciones de mitigación, ya que el hierro en estas condiciones no interfiere con la absorción de nutrientes ni contribuye a la formación de incrustaciones en sistemas de riego. En consecuencia, se concluye que el hierro, en ambas estaciones, se encuentra dentro de los rangos aceptables definidos por los estándares de calidad para riego, lo que respalda la aptitud del agua subterránea de estos pozos para su uso agrícola sin restricciones en cuanto a este parámetro.

5.3.3. Nitratos (NO₃)

Las concentraciones de nitrato (NO₃⁻) registradas en el agua subterránea de los siete pozos, tanto en la estación seca como en la lluviosa, se encuentran muy por encima del

2025: 46/19 Siempre más allá ¡avanzamos en la revolución!

valor guía de 10 mg/L establecido en los estándares de calidad del agua para riego agrícola. Esta situación representa un factor de atención relevante para el manejo agronómico, especialmente considerando los cultivos predominantes en la zona como la caña de azúcar y el maní.

En el caso de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), se trata de un cultivo con alta demanda de nitrógeno, capaz de tolerar concentraciones moderadamente elevadas de nitrato en el agua de riego. Sin embargo, diversos estudios han señalado que un suministro excesivo de nitrato puede reducir la eficiencia del uso del nitrógeno, generar lixiviación hacia capas profundas del suelo y favorecer la contaminación de acuíferos. Además, la caña de azúcar muestra mayor eficiencia cuando el nitrógeno se encuentra en forma de amonio en lugar de nitrato (Robinson et al., 2011; Thorburn et al., 2005).

Por otro lado, el maní (*Arachis hypogaea*) es una leguminosa fijadora de nitrógeno atmosférico mediante simbiosis con bacterias del género *Rhizobium*. Altas concentraciones de nitrato en el agua de riego pueden inhibir esta fijación biológica, alterando el metabolismo del cultivo y provocando un menor rendimiento. Investigaciones agronómicas han documentado que la disponibilidad externa de nitratos suprime la nodulación y la actividad nitrogenasa, comprometiendo la eficiencia del cultivo y aumentando la susceptibilidad a enfermedades fúngicas y bacterianas (Boote et al., 1982; Faircloth & Prostko, 2007).

En función de lo anterior, el uso de esta agua en sistemas de riego agrícola, particularmente en cultivos como el maní, no es recomendable sin una estrategia de manejo adecuada. Para mitigar los efectos adversos, se sugiere implementar prácticas como el mezclado con agua de menor concentración de nitratos, uso de riegos alternos según el ciclo fenológico del cultivo, y monitoreo regular del contenido de nitrógeno en suelo y agua (Fipps, 2003; Faircloth & Prostko, 2007). Aunque la caña de azúcar puede tolerar parcialmente estas condiciones, el uso prolongado de agua con alto contenido de nitrato podría deteriorar la salud del suelo y la sostenibilidad productiva a largo plazo si no se toman medidas correctivas.

5.3.4. Cloruro (Cl⁻)

Las concentraciones de cloruro (Cl^-), durante las estaciones seca y lluviosa, se encuentran muy por debajo del límite máximo recomendado de 350 mg/L para riego agrícola. En verano, los valores oscilaron aproximadamente entre 9 y 19 mg/L, mientras que en invierno se mantuvieron aún más bajos, entre 8 y 14 mg/L.

Desde el enfoque de calidad del agua para riego, estos niveles indican que el agua subterránea evaluada presenta baja salinidad por cloruros, lo que representa una condición favorable para su uso agrícola. De acuerdo con Fipps (2003), concentraciones por debajo de 140 mg/L se consideran seguras para la mayoría de los cultivos, ya que no afectan el crecimiento ni la absorción de agua, y no requieren medidas de manejo especiales. En este caso, los valores observados están sustancialmente por debajo incluso de ese umbral intermedio, lo que posiciona a esta agua dentro de la categoría de uso sin restricciones por cloruros.

Específicamente en relación con los cultivos predominantes de la zona, como la caña de azúcar y el maní, los niveles medidos no suponen riesgo alguno. La caña de azúcar, como cultivo moderadamente tolerante, puede soportar concentraciones de cloruros en el agua de riego de hasta 500 mg/L sin que se produzcan efectos negativos relevantes en el rendimiento o la calidad del cultivo (Maas & Hoffman, 1977). El maní, aunque más sensible a la salinidad, puede desarrollarse adecuadamente con niveles de cloruros por debajo de 100–150 mg/L (MDBA, 2014), lo cual se cumple ampliamente en las condiciones observadas en los pozos de Posoltega.

Por tanto, con base en los datos analizados y los estándares técnicos de referencia, se concluye que el agua subterránea evaluada cumple con los requisitos de calidad establecidos por Texas A&M para riego agrícola en lo que respecta al contenido de cloruros. No se requiere tratamiento ni dilución, y el agua puede utilizarse de manera segura para el riego de cultivos locales como caña y maní, siempre que se mantenga un monitoreo periódico para prevenir acumulaciones a largo plazo.

5.3.5. ANÁLISIS INDIVIDUALIZADO POR POZO PARA AGUA DE USO AGRICOLA

Considerando la importancia de evaluar la aptitud del recurso hídrico para uso en riego agrícola, a continuación, se presenta un análisis individualizado por pozo, que permite identificar las variaciones hidroquímicas más relevantes entre estaciones y su relación con los estándares de calidad del agua para riego. Este enfoque permite reconocer pozos con condiciones más favorables o restrictivas, y establecer criterios técnicos para su manejo en función de la sensibilidad de los cultivos predominantes en la zona.

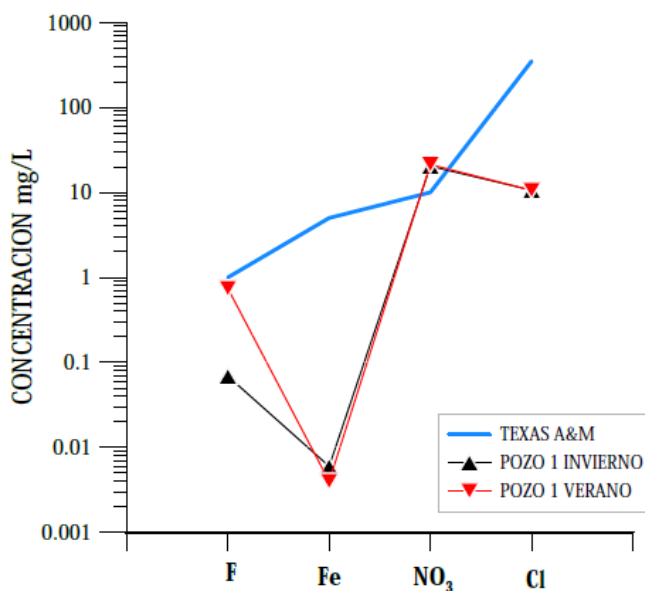


Figura 25. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 1 Según los estándares de calidad para agua de riego.

Se observan niveles elevados de nitrato en ambas estaciones, con una ligera diferencia entre verano e invierno, pero sin que descienda a niveles aceptables (<10 mg/L). Este parámetro representa el principal factor limitante. El fluoruro presenta un aumento en verano, sin implicaciones agronómicas negativas.

Interpretación: La calidad general del agua es buena desde el punto de vista salino y metálico, pero el exceso de nitrato la hace no apta para cultivos sensibles como el maní. Es apta para caña de azúcar, considerando su tolerancia al nitrógeno y la posibilidad de ajustar la fertilización.

2025: 46/19 Siempre más allá ¡avanzamos en la revolución!

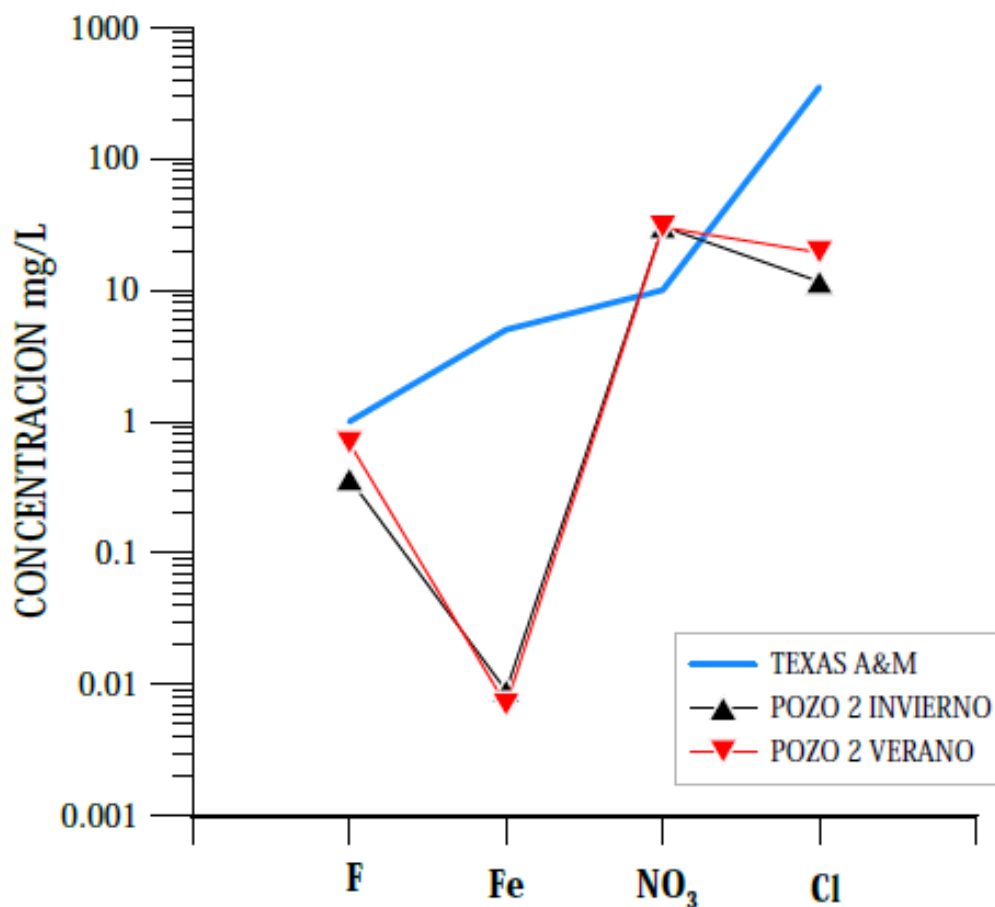


Figura 26. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 2 Según los estándares de calidad para agua de riego.

El nitrato se mantiene elevado en ambas estaciones, siendo uno de los más altos entre todos los pozos, sin reducción en invierno. Hierro, cloruros y fluoruro permanecen estables y en concentraciones bajas, sin cambios significativos estacionales.

Interpretación: Agua con buena calidad salina y metálica, pero no apta para maní por el exceso de nitrato. Adecuada para caña de azúcar, incorporando el nitrato en el manejo del fertilizante.

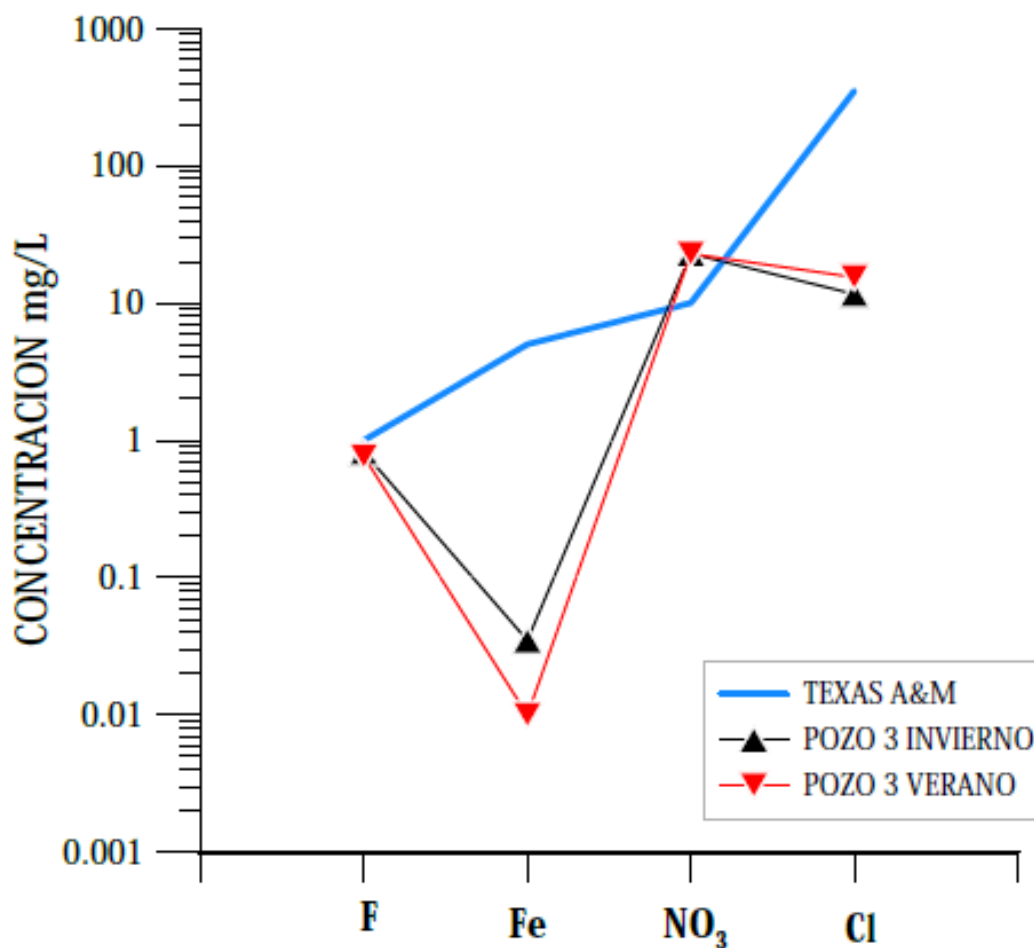


Figura 27. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 3 Según los estándares de calidad para agua de riego.

El nitrato se mantiene elevado en ambas estaciones, sin reducción significativa. El hierro presenta un aumento marcado en invierno. En verano, se observa un incremento en cloruros, aunque dentro de límites aceptables. El fluoruro se mantiene constante y bajo.

Interpretación: Agua con tendencia a concentración salina en época seca y contenido metálico variable.

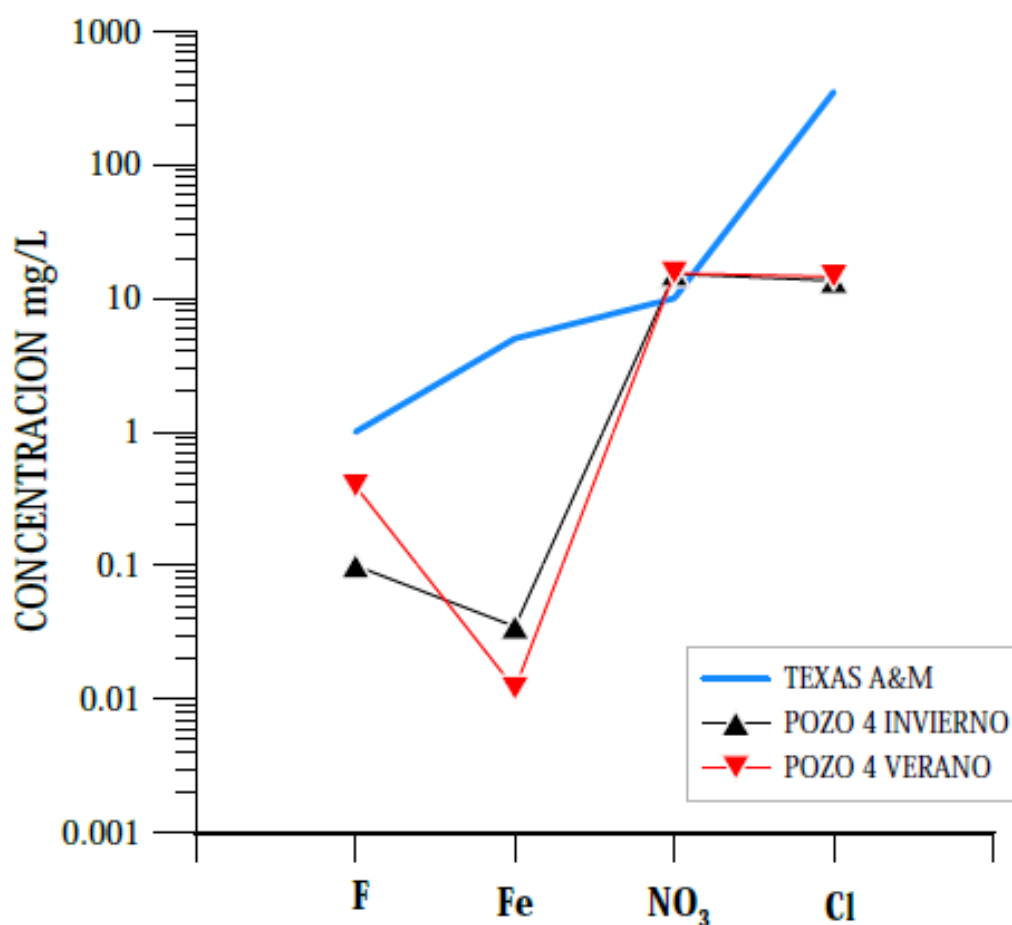


Figura 28. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 4 Según los estándares de calidad para agua de riego.

En el Pozo 4 se observa un aumento del hierro en invierno y un incremento del fluoruro en verano, aunque ambos parámetros se mantienen dentro de rangos bajos. El nitrato muestra una ligera disminución en época lluviosa, pero continúa en valores elevados, mientras que los cloruros no presentan variaciones visibles entre estaciones.

El agua del Pozo 4 presenta buena calidad salina, con cloruros y fluoruro por debajo de los límites establecidos, y hierro dentro del rango aceptable pese a su incremento invernal. Sin embargo, el nitrato se mantiene por encima del valor guía en ambas estaciones, lo que representa una limitación para cultivos sensibles como el maní.

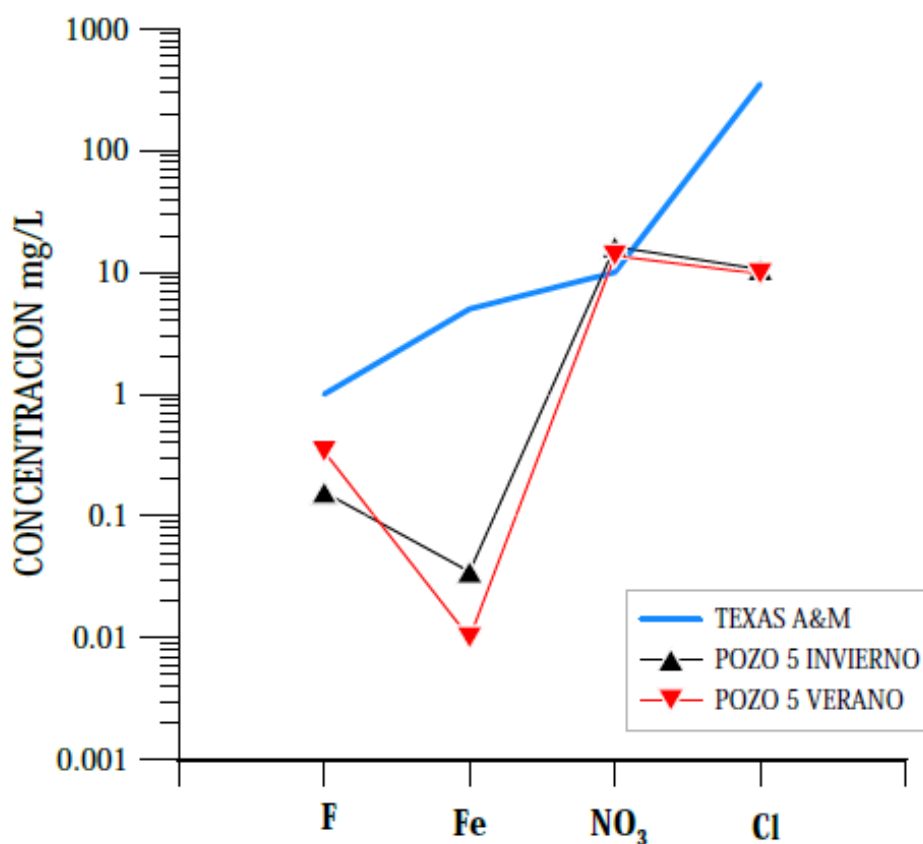


Figura 29. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 5 Según los estándares de calidad para agua de riego.

En el Pozo 5 se observa un aumento de cloruros en verano y una reducción del hierro en la misma estación, mientras que el nitrato se mantiene elevado durante todo el año y el fluoruro permanece bajo y constante. Según los estándares de calidad, el agua muestra buena calidad salina y metálica, pero el nitrato persistentemente alto la hace no apta para maní. Es adecuada para riego en caña de azúcar, incorporando el nitrógeno en el manejo agronómico.

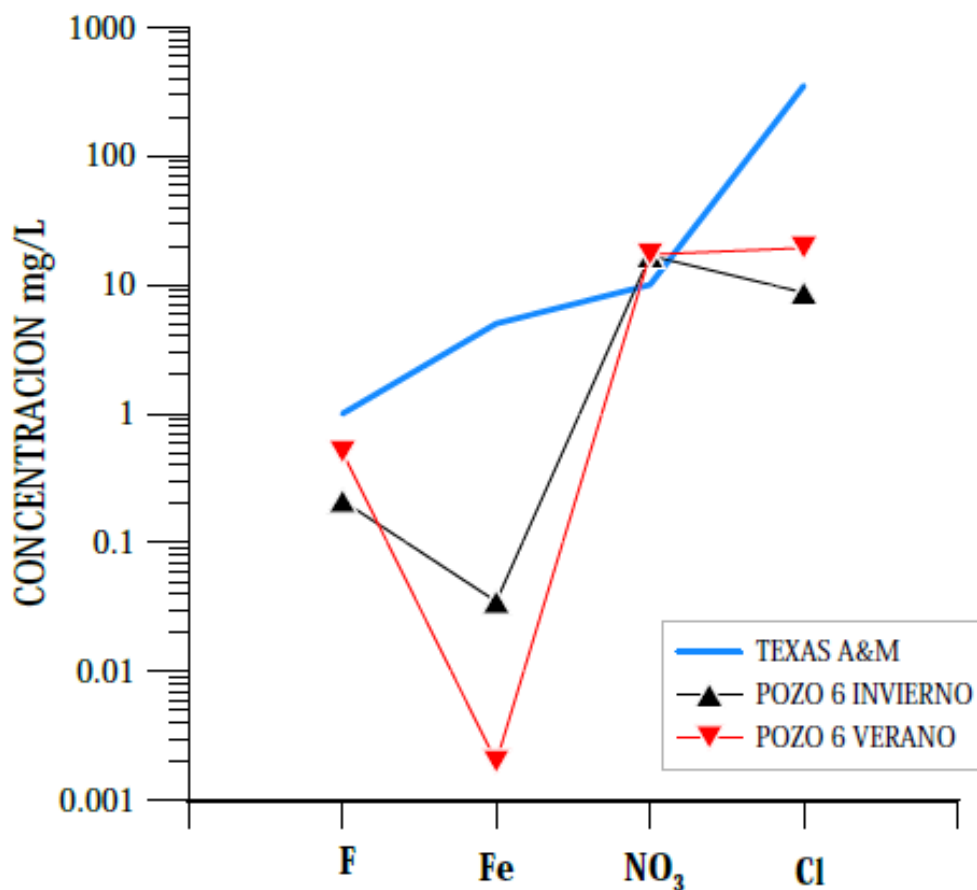


Figura 30. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 6 Según los estándares de calidad para agua de riego.

En el Pozo 6, el fluoruro (F^-) aumenta en verano, lo que puede asociarse a procesos de concentración por evaporación. El hierro (Fe) muestra un incremento en invierno, posiblemente relacionado con condiciones redox del acuífero. Además, el cloruro (Cl^-) se eleva en verano, aunque se mantiene dentro de rangos aceptables. Por su parte, el nitrato (NO_3^-) permanece alto todo el año, sin variaciones entre estaciones, superando el límite recomendado.

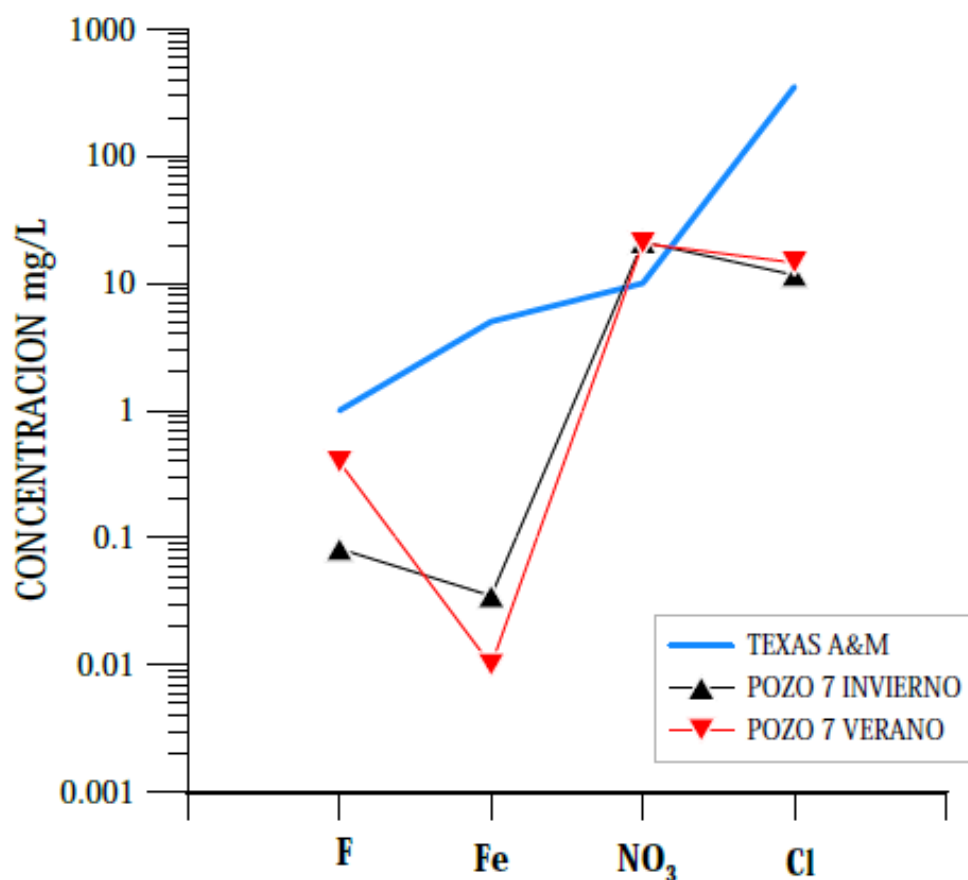


Figura 31. Comparación estacional de parámetros fisicoquímicos del Pozo 7 Según los estándares de calidad para agua de riego.

En el Pozo 7, el fluoruro (F^-) aumenta en verano, aunque se mantiene por debajo del límite permitido. El hierro (Fe) presenta un aumento en invierno, comportamiento típico en condiciones más reductoras. El cloruro (Cl^-) también se incrementa durante el verano, asociado posiblemente a concentración por evaporación. El nitrato (NO_3^-) se mantiene elevado en ambas estaciones, sin cambios visibles, y supera el umbral establecido para riego agrícola.

5.3.6. Evaluación de salinidad y sodio

Antes de determinar la idoneidad del agua para riego, es fundamental realizar una clasificación preliminar basada en la salinidad, la cual proporciona una visión general de su calidad. No obstante, la salinidad por sí sola no determina completamente su aptitud agronómica, ya que deben considerarse otros factores que influyen directamente sobre el comportamiento del suelo (ANZECC, 2000). Uno de estos factores críticos es el riesgo sódico, representado por el índice SAR (Relación de Adsorción de Sodio), que expresa el equilibrio entre el sodio y los cationes divalentes calcio y magnesio.

El SAR se calcula mediante la relación entre la concentración de sodio y la raíz cuadrada del promedio de calcio y magnesio, todos en miliequivalentes por litro:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

Altos niveles de sodio intercambiable pueden generar problemas severos de infiltración, ya que el sodio tiende a desplazar el calcio y el magnesio en el complejo de intercambio del suelo, afectando negativamente su estructura física. Este proceso causa dispersión de partículas, disminución de la porosidad, y reducción de la permeabilidad al agua y al aire. Además, la acumulación de sodio en el suelo puede inducir condiciones de alcalinidad, lo que compromete la disponibilidad de nutrientes esenciales y el desarrollo de los cultivos (Texas A&M University, 2003). La siguiente tabla resume los rangos de riesgo, incluyendo las implicaciones agronómicas correspondientes:

Tabla 6. Clasificación del riesgo de sodio en el agua de riego según el índice SAR.

Criterio SAR	Riesgo de sodio en agua		Comentario
1 - 10	Bajo	1	Uso en cultivos sensibles al sodio
10 - 18	Medio	2	Se necesitan enmiendas y lixiviación.
>18	Alto	3	Generalmente inadecuada para uso continuo

Tabla 7. Clasificación del agua de riego según su salinidad, basada en la conductividad eléctrica (EC) y los sólidos disueltos totales (TDS).

Clases de Agua	Conductividad Eléctrica (μS/cm)	TDS (mg/L)
Clase 1, Excelente	<750	<500
Clase 2, Aceptable	750 - 1500	500 – 2000
Clase 3, Peligroso	>1500	>2000

5.3.7. Porcentaje de Sodio Soluble (SSP)

El Porcentaje de Sodio Soluble (SSP) es un parámetro complementario al SAR que permite evaluar el grado de dominancia del sodio frente a otros cationes presentes en el agua de riego. Se expresa como el porcentaje que representa el sodio (Na^+) respecto a la suma total de los principales cationes: sodio, calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y potasio (K^+), todos en miliequivalentes por litro.

El SSP se calcula con la siguiente fórmula:

$$SSP = \left(\frac{[\text{Na}^+]}{[\text{Na}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{K}^+]} \right) \times 100$$

En aguas utilizadas para riego, un SSP superior al 60 % se considera no recomendable, ya que indica riesgo de sodificación, pérdida de estructura del suelo, y posible inhibición en la absorción de otros nutrientes. Valores por debajo del 60 % son considerados seguros, especialmente en suelos con buena capacidad de drenaje.

Este parámetro es particularmente útil en zonas con suelos arcillosos o compactados, donde el exceso de sodio puede generar dispersión de partículas, reducción de la porosidad y limitación en la infiltración del agua, afectando la productividad agrícola.

Tabla 8. Clasificación integrada de los siete pozos según salinidad, riesgo sódico (SAR) y porcentaje de sodio soluble (SSP).

Código de pozos en ambas estaciones	1	2	3	4	5	6	7
Clase de agua, según la salinidad (TDS y EC)	E	E	E	E	E	E	E
<i>Riesgo de sodio en el agua de riego (SAR)</i>	1	1	1	1	1	1	1
Porcentaje de Sodio Soluble (SSP)	A	A	A	A	A	A	A

E: Excelente, 1: Bajo riesgo, A: Aceptable

VI. CONCLUSIONES

La evaluación estacional de la calidad fisicoquímica del agua subterránea en siete pozos del municipio de Posoltega permitió identificar diferencias relevantes en su composición entre la estación seca y la lluviosa, así como su aptitud para los usos de consumo humano, riego agrícola e industria química.

Durante la estación seca, se observó un incremento en la concentración de sales, reflejado en valores elevados de conductividad eléctrica (EC), sólidos disueltos totales (TDS) y dureza, especialmente en los pozos 5, 6 y 7. En la estación lluviosa, en cambio, la mayoría de los parámetros disminuyeron como resultado de la recarga hídrica, aunque elementos como el hierro presentaron un ligero aumento, probablemente por condiciones reductoras en el acuífero.

En relación con el **consumo humano**, la mayoría de los parámetros analizados se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la Norma CAPRE. Sin embargo, se identificó que la **conductividad eléctrica sobrepasa el valor guía en la mayoría de los pozos**, con excepción de los **pozos 2, 3 y 7 durante el invierno**, lo cual refleja una mayor mineralización en el resto de los sitios. A pesar de ello, la EC no es considerada un parámetro crítico desde el punto de vista sanitario, por lo que su superación no invalida la potabilidad del agua, niveles elevados pueden modificar las propiedades organolépticas del agua, especialmente el sabor, y podrían ser indeseables para ciertos grupos sensibles. El contenido de nitratos, si bien moderado, se mantuvo por debajo del límite máximo permitido, sin representar un riesgo directo a la salud humana.

En cuanto al **uso agrícola**, los pozos fueron clasificados como fuentes de agua de excelente a aceptable calidad para riego según los criterios de Texas A&M (2003). La salinidad se mantuvo dentro de los márgenes tolerables para la mayoría de cultivos comunes. No obstante, los niveles de nitrato superaron el umbral recomendado para cultivos sensibles, por lo que se recomienda integrarlos como parte del manejo nutricional para evitar sobre-fertilización. Los pozos 3 y 4 resultaron ser los más adecuados para riego por su bajo contenido de sales disueltas, mientras que los pozos 6 y 7 requieren monitoreo más estricto en época seca.

Respecto al **uso industrial**, de acuerdo con las directrices de la EPA (2004), ningún pozo cumple completamente con los estándares sin tratamiento previo, debido principalmente al contenido de nitratos y la alta alcalinidad en algunos casos. A pesar de ello, los pozos 1 y 4 presentan condiciones más favorables y podrían ser utilizados con acondicionamientos mínimos. Por el contrario, el pozo 6, con alta salinidad y dureza, requeriría tratamientos más intensivos para su adecuación a procesos industriales exigentes.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Alley, W. M., & Konikow, L. F. (2005). La ciencia en juego: desafíos en la estimación de la recarga de aguas subterráneas. *Hydrogeology Journal*, 13(1), 167–170.
2. APHA, AWWA, W. (2017). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *American Public Works Association*, 23rd Editi, 4.
3. Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). Geochemistry, Groundwater and Pollution. *CRC Press.*, 2nd ed.
4. Asamblea Nacional de la Republica de Nicaragua. (2007). *Ley General de Aguas Nacionales. Ley N°. 620.*
5. ASAMBLEA NACIONAL DE LA REPÚBLICA DE NICARAGUA. (1996). *LEY GENERAL DEL MEDIO AMBIENTE Y LOS RECURSOS NATURALES. LEY No. 217.*
6. Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2021). *Resolucion Administrativa Tecnico Normativa.*
7. Bakalowicz, M. (2006). Karst groundwater: A challenge for new resources. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.004>
8. BALEK, J. (1988). Groundwater recharge concepts. En Estimation of natural groundwater recharge. *Dordrecht: Springer Netherlands*, 3–9.
9. Barlow, P. M., & Leake, S. A. (2012). Streamflow depletion by wells: Understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. *US Geological Survey.*
10. Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303–309.
11. Barrera, Y., & Aguirre, C. (2011). Calidad del agua de pozos y aguas superficiales en la micro cuenca Las Jaguas, municipio de Ciudad Antigua. *Universidad Nacional Agraria*, 59. <https://cenida.una.edu.ni/Tesis/tnl73r457.pdf>
12. Benavente, D. (2006). Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales. *Utilización de Rocas y Minerales Industriales. Seminarios de La Sociedad Española de Mineralogía*, 2, 123–153.

2025: 46/19 Siempre más allá ¡avanzamos en la revolución!

13. BIDNER, M., SAVIOLI, S., B., G., & JACOVKIS, P. M. (1997). Influencia de la permeabilidad vertical en el flujo de petróleo hacia un pozo productor. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 13, 573–586.
14. Bouwer, H. (2002a). Groundwater and Well Construction. *United Nations*.
15. Bouwer, H. (2002b). Recarga artificial de aguas subterráneas: hidrogeología e ingeniería. *Revista de Hidrogeología*, 10, 121–142. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0182-4>
16. Cabecera municipal de posoltega. (2017). Cartografía Digital y Censo de Edificaciones. *Banco Central de Nicaragua*, 10–23.
17. CAPRE. (2010). *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano*. 506, 20–21.
18. Castiblanco, L. (2017). *Control de agua en yacimientos de crudo pesado con acuífero activo y con contacto agua-petróleo: Alternativas Tecnológicas para los Campos de los Llanos Orientales*.
19. Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). Hidrología Subterránea. *Instituto Geológico y Minero de España*.
20. Custodio, E. (2010). Groundwater-dependent ecosystems under the European Water Framework Directive: Review of status, challenges, and opportunities. *Hydrogeology Journal*, 18(1), 4–7.
21. Custodio, E., & Llamas, M. R. (2016). *Groundwater Intensive Use: Challenges and Opportunities*. CRC Press.
22. De la Hera-Portillo, A., López-Gutiérrez, J., & Marín-Lechado, C. (2021). Integración de datos químicos históricos y actuales del agua para modelar los flujos de manantiales en la región del Gran Chaco. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34(100781).
23. Dong, Y., Jiang, Z., Hu, Y., Jiang, Y., Tong, L., Yu, Y., & Wang, Y. (2024). Contaminación patógena de los sistemas de aguas subterráneas y riesgos para la salud. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 54 (4), 267–289.
24. Doummar, J., Kassem, A. H., & Gurdak, J. J. (2018). Impact of historic and future

- climate on spring recharge and discharge based on an integrated numerical modelling approach. *Journal of Hydrology*, 565, 636–649.
25. EPA, U. (2004). Guidelines for Water Reuse. In *US Environmental Protection Agency. Municipal support division office of wastewater management office of water, Washington, DC. EPA/625/R-04- 108, Chapter 2. 7-27.* <Http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r04108/625r04108.pdf>
 26. FAO. (2007). Los Recursos Hídricos de Nicaragua. *Organización de Las Naciones Unidas Para La Alimentación y La Agricultura*, 217, 78.
 27. FARLEY, K. A., JOBBÁGY, E. G., & JACKSON, R. B. (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology*, 11 (10), 1565–1576. <Https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x>
 28. Fernández Ferrer, G. (2011). El agua subterránea: estudio de esquemas de conocimiento en universitario y estrategias didácticas para su aprendizaje significativo en estudiantes de secundaria. In *Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas* (Vol. 29, Issue 1). <Https://doi.org/10.5565/rev/ec/v29n1.554>
 29. Fetter, C. W. (2018). Applied Hydrogeology (4th ed.). In *Pearson Education*.
 30. Fitts, C. R. (2002). *GROUNDWATER SCIENCE*.
 31. Flores, R., Pérez, J., & Castillo, L. (2019). Geografía volcánica y su impacto en los recursos hídricos de Chinandega, Nicaragua. *Revista Geociencias de Centroamérica*, 15(2), 45–67.
 32. Foster, S., & Chilton, J. (2020). *Groundwater: A Global Perspective*. CRC Press.
 33. FOSTER, S. S. D., & CHILTON, P. J. (2003). Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1440), 1957–1972. <Https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>
 34. Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall.
 35. Fuentes, J. L. (2017). Aguas Subterráneas. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 110(9), 1689–1699.
 36. Gil, C., Chiva, L., Cerisuelo, E., & Carda, J. B. (2006). Estudio de la porosidad en

- soportes de gres porcelánico. *Qualicer*, 1, 43–48.
37. Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 197-200., 488(7410), 197–200.
 38. HEALY, R. W. (2010). *Estimating groundwater recharge*. Cambridge university press.
 39. Healy, R. W., & Cook, P. G. (2002). Utilización de los niveles de agua subterránea para estimar la recarga. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 91–109.
 40. HEATH, R. C. (1998). *Basic ground-water hydrology*. US Department of the Interior, US Geological Survey.
 41. Herrera, M. (2020). Cambio climático y su efecto en la agricultura de zonas rurales en Nicaragua. *Revista Centroamericana de Ciencias Ambientales*, 14(1), 100–120.
 42. Iglesias López, A. (2006). HIDRODINÁMICA SUBTERRÁNEA Y MODELOS EN HIDROGEOLOGÍA. *ETS de I de Minas DMAMI*, 128.
 43. III CENAGRO. (2001). CARACTERÍSTICAS DEL DEPARTAMENTO DE CHINANDEGA. *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC*, 1–70.
 44. Iván, R., Novelo, M., & Guadalupe, J. (2015). Calidad microbologica de pozos de abastecimiento de agua potable en Yucatan , Mexico. *Nuevo Mexico*, 19(1), 51–61.
[Http://redi.uady.mx/bitstream/handle/123456789/2272/document%282%29.pdf?Sequence=1&isallowed=y](http://redi.uady.mx/bitstream/handle/123456789/2272/document%282%29.pdf?Sequence=1&isallowed=y)
 45. Jackson, R., Jobbágy, E., Avissar, R., Roy, S., Barrett, D., Cook, C., & Murray, B. (2005). Intercambio de agua por carbono mediante secuestro biológico de carbono. *Science*, 310 (5756), 1944–1947.
<https://doi.org/10.1126/science.1119282>
 46. KONIKOW, L. F., & KENDY, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, 13, 317–320. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0411-8>
 47. LERNER, D. N., ISSAR, A. S., & SIMMERS, I. (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding the natural recharge. *R. Van Acken gmbh*, 345p.
 48. Llamas, & Custodio. (2002). Intensive use of groundwater: a new situation which

- demands proactive action. *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*, 13–31.
49. López-Villanueva, R., Méndez, J. A., & Castillo, M. (2022). Evaluación de la calidad del agua de manantiales en regiones montañosas: un enfoque integral. *Revista de Recursos Hídricos*, 34(2), 123–145.
 50. López, A. C. M. Q. B. L. M. S. E. A. R., & Vega, G. De los Á. M. C. G. Del C. Z. L. I. R. E. C. J. R. M. O. L. A. M. B. M. A. L. S. S. E. H. (2008). Posoltega en Cifras. *Instituto Nacional de Información de Desarrollo, INDE*.
 51. Mark Smith, K. C., & Laban, M. P. Y P. (2020). Acuíferos: gestión sostenible de las aguas subterráneas. In *Acuíferos: gestión sostenible de las aguas subterráneas*. <https://doi.org/10.2305/iucn.ch.2016.wani.8.es>
 52. MONTORO, M. A., & FRANCISCA, F. M. (2011). Permeabilidad intrínseca de suelos arenosos con presencia de partículas de limo y arcilla. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*.
 53. Net, L. I., & Limarino, C. O. (2000). Caracterización y origen de la porosidad en areniscas de la sección inferior del Grupo Paganzo (Carbonífero superior), Cuenca Paganzo, Argentina. *Revista de La Asociación Argentina de Sedimentología*, 7(1–2), 49–72.
 54. OMS. (2018). Guías para la calidad del agua de consumo humano. *Organización Mundial de La Salud*, 4, 608. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf?Sequence=1> (accessed 12 September 2024)
 55. Ordoñez, J. (2011). Aguas Subterráneas - Acuíferos. *Sociedad Geográfica de Lima*, 2–44, 10. https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/aguas_subterraneas.pdf
 56. Osorio, M., Cabanellas, G., & Cabanellas de Torres, G. (2012). Hidráulica e Hidrología: Medios porosos. *UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID*, 1, 1–797.
 57. Perdomo, V. M., & Rojas, C. A. (2017). Modelo hidrogeológico conceptual a partir de información secundaria, en los alrededores del centro urbano del municipio de Chiquinquirá. In *Universidad Católica De Colombia* (Issue 9).

58. Prasenjit, D., Maya, K., & Padmalal, D. (2022). Hidrogeoquímica de las fuentes termales de la India: estado actual. *Earth-Science Reviews*, 224(103890).
59. Rodríguez-Correa, D., Bonet-Pérez, C., de la Caridad Mola-Fines, B., Guerrero-Posada, P. A., Martínez-Der, C., & Machado-Carballo, M. (2022). Estrategias de riego deficitario controlado para el cultivo del frijol. *Revista Ingeniería Agrícola*, 12(1).
60. Rodríguez, F., & Solano, P. (2021). Calidad del agua subterránea en áreas volcánicas: Un estudio de caso en Posoltega, Nicaragua. *Revista Internacional de Hidrología*, 19(4), 210–225.
61. Sahuquillo, A., Custodio, E., & Llamas, M. R. (2009). LA IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS. *Tecnología Del Agua*, 29(306), 54–67.
62. Scanlon, B. R., Faunt, C. C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., mcguire, V. L., & mcmahon, P. B. (2012). Agotamiento de las aguas subterráneas y sostenibilidad del riego en las Altas Llanuras y el Valle Central de Estados Unidos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(24), 9320–9325.
63. Scanlon, B. R., Reedy, R. C., Duncan, I., & Mullican, W. F. (2020). Enhancing water management in semiarid regions: Technology and policy innovations. *Journal of Hydrology*, 591(125491). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125491>
64. Shukla, R., Gupta, R., & Awasthi, A. (2021). Impacto de los fertilizantes nitrogenados en la contaminación de las aguas subterráneas: una revisión global. *Gestión Del Agua Para La Agricultura*, 243(106402).
65. Smith, A., Jones, P., & Miller, R. (2021). Aguas termales y recursos de energía geotérmica. *Journal of Hydrology*, 593(125824).
66. Solís-Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo. *Revista de La Facultad de Ingeniería*, 21(3), 57–68.
67. Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10 (1), 52–67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>
68. Sophocleous, M. (2004). Recarga de aguas subterráneas y sostenibilidad en regiones semiáridas. *Ground Water*, 42(1), 23–26.
69. SPRINGER, A. E. ., & STEVENS, L. E. (2009). Esferas de descarga de

- manantiales. *Hydrogeology Journal*, 17(1), 83.
70. Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., & Famiglietti, J. S. (2013). Groundwater and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
71. Trejo Corzo, J. A. (2022). *Factores que influyen en la porosidad de los acuíferos*.
72. University Texas. (2003). Irrigation water quality standards and salinity management strategies. *Produced by Agriculture Communication*, 8.
73. Vélez, M. V., & Vásquez, L. M. (2004). Métodos para determinar la recarga en acuíferos. *Primer Congreso Colombiano de Hidrogeología*, 20.
74. Villarroja, F. (2009). Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. *Centro Nacional de Tecnología de Regadíos*, 13.
75. Wada, Y., Van Beek, L. P., & Bierkens, M. F. P. (2010). Modelling global water stress of the recent past: On the relative importance of trends in water demand and climate variability. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 459–478.
76. World Health Organization (WHO). (2011). Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: WHO Press., 4th Ed.
77. Younger, P. L. (2019). Groundwater in the Environment: An Introduction. *Blackwell Publishing*.
78. Zektser, I. S., & Everett, L. G. (2004). *Groundwater resources of the world and their use*.
79. Zhao, H., Yang, S., & Li, W. (2020). Compuestos orgánicos volátiles en aguas subterráneas contaminadas: fuentes, impactos y métodos de eliminación. *Water*, 12(5)(1346.).

VIII. ANEXOS

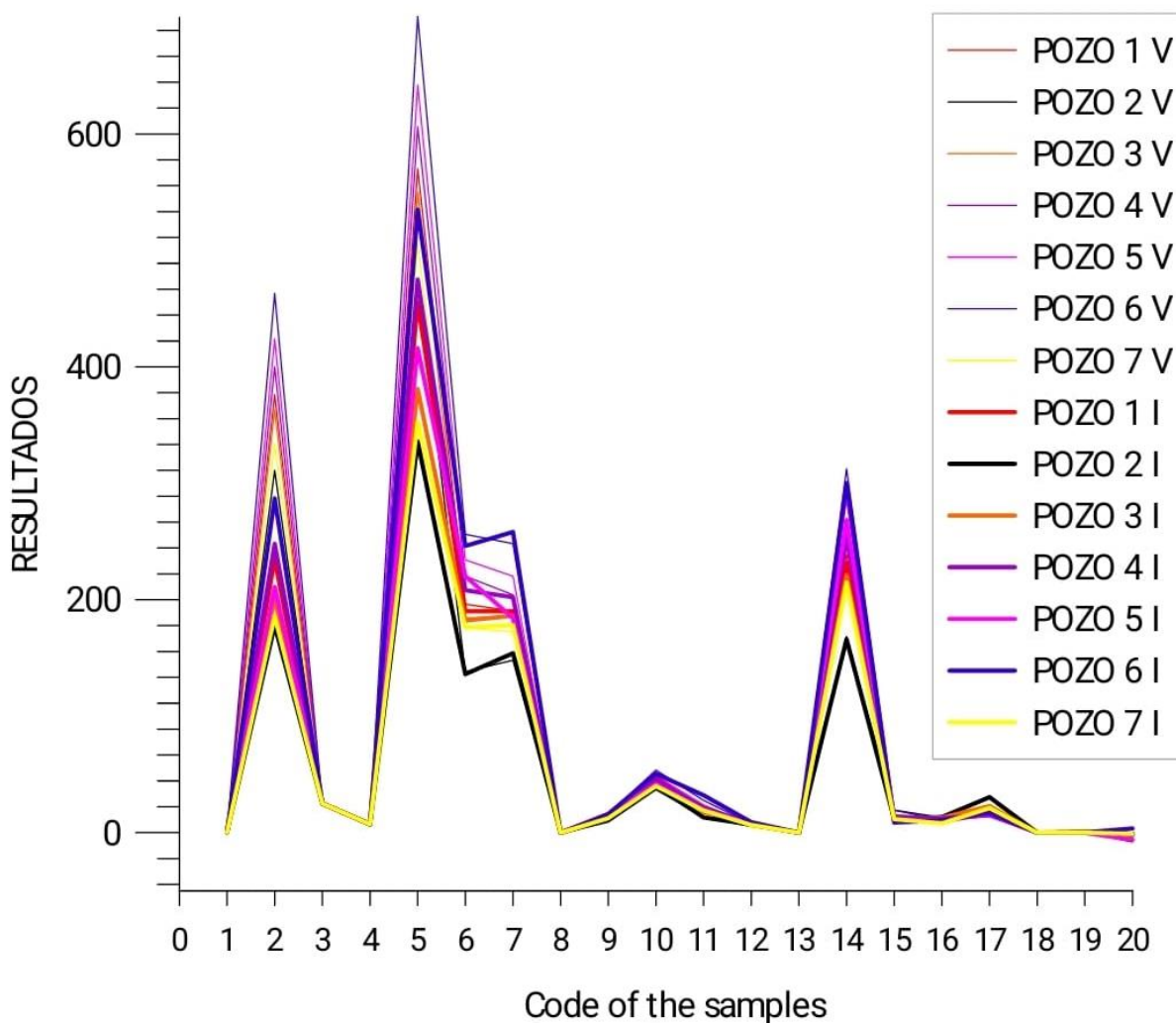
TABLA 9. Parámetros Fisicoquímicos del Agua Subterránea en Siete Pozos del Municipio de Posoltega – Temporada de Invierno, Octubre 2024

CODIGO DE POZOS	1	2	3	4	5	6	7
Aspecto	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO
Color	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Turbidez UNT	0.44	0.80	2.3	0.40	0.38	0.55	0.38
Solidos Disuelto mg/L	235	178	201	248	211	287	186
Temperatura °C	25	25	25	25	25	25	25
pH	7.50	7.23	7.18	7.33	7.31	7.05	7.21
Conductividad Electrica $\mu\text{S/cm}$	455	336	381	475	416	535	353
Alcalinidad Total (CaCO_3) mg/L	190.2	136.1	182.2	208.2	220.2	246.2	176.2
Dureza Total (CaCO_3) mg/L	190.2	154.1	186.2	202.2	184.2	258.2	178.2
Indice Saturación	0.270	-0.110	-0.160	0.040	0.010	-0.290	-0.030
Sodio (Na) mg/L	13.40	11.60	13.10	15.10	15.90	16.00	12.40
Calcio (Ca) mg/L	46.5	40.1	43.3	45.7	41.7	50.5	40.1
Magnesio (Mg) mg/L	18.0	13.1	19.0	21.4	19.5	32.1	19.0
Potasio (K) mg/L	7.60	6.90	7.10	7.70	7.40	9.00	6.60
Hierro (Fe^{2+}) mg/L	0.006	0.009	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
Bicarbonatos (HCO_3) mg/L	231.9	166.0	221.1	253.8	268.5	300.2	214.8
Cloruros (Cl) mg/L	10.6	11.6	11.6	13.5	10.6	8.7	11.6
Sulfatos (SO_4) mg/L	11.11	13.31	12.79	12.28	9.82	10.47	8.01
Nitratos (NO_3) mg/L	20.35	30.44	22.86	15.22	16.19	16.81	21.10
Nitritos (NO_2) mg/L	0.005	0.005	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
Fluor (F) mg/L	0.069	0.368	0.820	0.100	0.157	0.212	0.082
% Balance Ionco	-0.92	-0.96	-1.91	-1.55	-6.14	3.58	-1.05

TABLA 10. Parámetros Fisicoquímicos del Agua Subterránea en Siete Pozos del
Municipio de Posoltega – Temporada de Verano, Marzo 2024

CODIGO DE POZOS	1	2	3	4	5	6	7
Aspecto	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO	CLARO
Color	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Turbidez UNT	0.78	0.83	0.69	0.59	0.58	0.56	0.60
Solidos Disueltos mg/L	376	311	363	400	424	463	334
Temperatura °C	25	25	25	25	25	25	25
pH	7.01	6.59	7.05	7.11	7.10	6.99	7.10
Conductividad Eléctrica µS/cm	570	471	550	606	642	701	506
Alcalinidad Total (CaCO₃) mg/L	196.2	138.1	184.2	220.2	234.2	256.2	176.2
Dureza Total (CaCO₃) mg/L	190.2	148.1	186.2	204.2	220.2	248.2	172.2
Índice Saturación	-0.400	-0.820	-0.36	-0.3	-0.31	-0.42	-0.31
Sodio (Na) mg/L	12.60	9.10	11.80	14.30	15.90	16.00	11.20
Calcio (Ca) mg/L	46.5	36.9	43.3	48.9	48.9	53.7	39.3
Magnesio (Mg) mg/L	18.0	13.6	19.0	19.9	23.8	27.7	18.0
Potasio (K) mg/L	5.90	5.30	5.90	6.00	6.50	7.50	5.00
Hierro (Fe²⁺) mg/L	0.004	0.007	0.01	0.012	0.01	0.002	0.01
Bicarbonatos (HCO₃) mg/L	239.2	168.4	224.5	268.5	285.6	312.4	214.8
Cloruros (Cl) mg/L	10.6	19.3	15.4	14.5	9.7	19.3	14.5
Sulfatos (SO₄) mg/L	10.98	12.92	12.41	12.15	11.11	10.60	6.97
Nitratos (NO₃) mg/L	21.29	30.03	22.80	15.39	13.65	17.17	20.57
Nitritos (NO₂) mg/L	0.008	0.011	0.011	0.008	0.013	0.01	0.011
Fluor (F) mg/L	0.741	0.686	0.765	0.393	0.338	0.503	0.393
% Balance Iónico	-3.54	-7.93	-4.33	-4.65	-1.52	-2.91	-4.36

Figura 32. Comparación de Parámetros Fisicoquímicos del Agua Subterránea en Siete Pozos durante verano e Invierno – Municipio de Posoltega



I: Invierno, V: Verano