

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE ARSÉNICO, PLOMO Y FLÚOR EN AGUA
SUBTERRÁNEA MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE MODELOS DE SERIE DE
TIEMPO. CASO MEOQUI, CHIHUAHUA

Tesis

Que presenta MARTHA LILIA RAMÍREZ DE LA FUENTE
como requisito parcial para obtener el Grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

Torreón, Coahuila

Octubre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE ARSÉNICO, PLOMO Y FLÚOR EN AGUA
SUBTERRÁNEA MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE MODELOS DE SERIE DE
TIEMPO. CASO MEOQUI, CHIHUAHUA

Tesis

Que presenta MARTHA LILIA RAMÍREZ DE LA FUENTE
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA

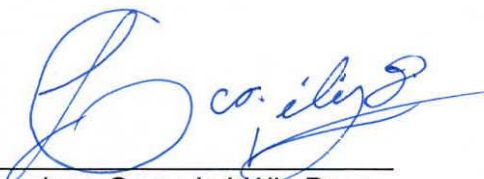
Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras
Director (UAAAN)

Ph.D. Martín Alfredo Legarreta González
Co-Director (UTT)

ANÁLISIS Y PREDICCIÓN DE ARSÉNICO, PLOMO Y FLÚOR EN AGUA
SUBTERRÁNEA MEDIANTE LA EVALUACIÓN DE MODELOS DE SERIE DE
TIEMPO. CASO MEOQUI, CHIHUAHUA

Tesis

Elaborada por MARTHA LILIA RAMÍREZ DE LA FUENTE como requisito
parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Producción
Agropecuaria con la supervisión y aprobación del Comité de Asesoría



Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras
Director de Tesis



Ph.D. Martín Alfredo Legarreta González
Asesor



Dr. Rafael Rodríguez Martínez
Asesor



Dra. Dalia Ivette Carrillo Moreno
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por el financiamiento brindado durante este tiempo para la realización de este proyecto y por fomentar la investigación científica en el país.

A la **Junta Municipal de Aguas y Saneamiento de Meoqui, Chihuahua (JMAS Meoqui)**, por proporcionar los datos que hicieron posible el análisis y desarrollo de este proyecto.

A la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)**, mi alma máter, por brindarme el espacio, los recursos y el apoyo institucional necesarios para llevar a cabo esta investigación.

A mis asesores, por su constante aliento y por ser un ejemplo de dedicación y compromiso, inspirándome a superarme cada día. De manera especial, al **Ph.D. Martín Alfredo Legarreta González**, por confiar en mis habilidades y por ser un excelente formador de estudiantes. Gracias por la fe que me ha tenido, por su constante seguimiento a mi trabajo y por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí. Al **Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras**, por darme la oportunidad de integrarme al posgrado y, aún más, por permitirme formar parte de su comité de asesoría. Al **Dr. Rafael Rodríguez Martínez**, por su guía incansable durante todo el proceso. Al **Dr. Isaías López** por orientarme para participar en la estancia en la planta potabilizadora *Agua Saludable para la Laguna*, experiencia que enriqueció notablemente mi formación.

Al **Departamento de Posgrado de la UAAAN**, por su acompañamiento, orientación y apoyo constante a lo largo de mi formación académica.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento

DEDICATORIAS

A mis padres, cuya paciencia, amor y ejemplo de trabajo incansable me enseñaron que la perseverancia es el camino para vencer cualquier dificultad. A mi padre, por su sabiduría académica, su constancia inquebrantable y sus valores firmes; por la mano que guía con seguridad y la voz que, como un refugio, me cobija y protege. A mi madre, por la luz de sus consejos, por las palabras que siempre alientan, por el abrazo donde todo encuentra calma y por la alegría que irradia y contagia.

A mi compañero de vida, Carlos, por ser ancla y faro, por su fe inamovible en mí y por sostenerme en los días más arduos.

A mis hijos, Argentina y Dante, por recordarme que los sueños también son herencia, por su paciencia en los momentos en que mi presencia se dividía entre ustedes y mis estudios, y por enseñarme que el amor puede esperar sin menguar.

Este logro les pertenece tanto como a mí.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. El agua	3
2.2. Propiedades fisicoquímicas del agua	3
2.3. Disponibilidad de agua potable a nivel mundial y nacional	5
2.4. Ejes de uso de agua: potable, industria y agrícola en México	5
2.5. Distribución porcentual del agua concesionada por tipo de uso	6
2.6. Normatividad para la calidad del agua	7
2.6.1. Marco jurídico y normativo en México sobre calidad de agua potable	7
2.7. Metales pesados	15
2.8. Arsénico en la naturaleza	15
2.9. Efectos nocivos del arsénico	16
2.10. Arsénico en Meoqui	17
2.11. Flúor en la naturaleza	17
2.12. Efectos nocivos del flúor	17
2.13. Plomo en la naturaleza	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. Área de estudio	20
3.2. Junta Municipal de Aguas y Saneamiento (JMAS) de Meoqui, Chihuahua	21
3.3. Recopilación de datos	22
3.4. Métodos estadísticos	24
3.4.1. Modelo ARIMA	24
3.4.2. Modelo Facebook Prophet	25
3.4.3. Holiday term, periodo de tiempo excluido	28
3.4.4. Modelos GLMNET	29
3.4.5. Modelo XGBoost	29
3.4.6. Tendencia de series de tiempo	30
3.4.7. Selección del modelo	31
3.4.8. Análisis de datos	32
3.4.9. Entrenamiento / Prueba	32
3.4.10. Flujo de trabajo de Modeltime	33
3.4.11. Flujo de trabajo (detallado)	33
4. RESULTADOS	35
4.1. Estadísticas descriptivas	35

4.1.1. Arsénico	40
4.1.2. Plomo	41
4.1.3. Fluoruros	42
4.2. Selección de modelo	44
4.3. Concentración de arsénico (2010–2023)	45
4.4. Concentración de plomo (2010–2023)	47
4.5. Concentración de fluoruros (2010–2023)	49
5. DISCUSIÓN	52
6. CONCLUSIONES	55
7. REFERENCIAS	57

LISTA DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 1	Instrumentos normativos aplicables al abastecimiento de agua potable en México y su relación con la NOM-127-SSA1	8
Cuadro 2	Parámetros fisicoquímicos analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000	10
Cuadro 3	Parámetros herbicidas fenoxiclorados y plaguicidas analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.	12
Cuadro 4	Parámetros de thrialometanos totales y benceno, tolueno, etilbencenos, xilenos (BTEX) analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.	13
Cuadro 5	Parámetros de metales analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000	14
Cuadro 6	Parámetros microbiológicos analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000	14
Cuadro 7	Pozos muestreados, año, mes y ppm de Arsénico que presentaron un exceso de 0.025 ppm en agua potable en Meoqui, Chih., México	35
Cuadro 8	Pozos muestreados, año, mes y ppm de Fluoruros que sobrepasaron 1.5 ppm en agua potable en Meoqui, Chih., México	37
Cuadro 9	Parámetros de selección del modelo para Arsénico, Plomo y Fluoruros en agua potable en Meoqui, Chih., México	38
Cuadro 10	Predicción mensual de 1 año de ppm de Arsénico y sus intervalos de confianza del 95% en agua potable en Meoqui, Chih., México	39
Cuadro 11	Predicción mensual de 1 año de ppm de Plomo y sus Intervalos de Confianza del 95% en agua potable en Meoqui, Chih., México	41
Cuadro 12	Predicción mensual de 1 año de ppm de Fluoruros y sus Intervalos de Confianza del 95% en agua potable en Meoqui, Chih., México	42

LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	(A) La estructura del agua y (B) la negatividad relativa del hidrógeno. (Speight, 2020)	23
Figura 2	Distribución porcentual del agua concesionada por tipo de uso (Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), 2023)	24
Figura 3	Transferencia de arsénico de fuentes naturales a humanos (Rajendran A. et al, 2024).	16
Figura 4	Ubicación geográfica del municipio de Meoqui (Legarreta-González et al., 2024)	20
Figura 5	Vista satelital de la ciudad de Meoqui y ubicación de los pozos utilizados para el muestreo de arsénico, plomo y fluoruros en agua potable (Legarreta-González et al., 2024b).	23
Figura 6	Concentración de arsénico en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México, de enero de 2010 a diciembre de 2023. Izquierda: Gráfica de series de tiempo. Derecha: Gráfica de pronóstico.	41
Figura 7	Concentración de plomo en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México, de enero de 2010 a diciembre de 2023. Izquierda: Gráfica de series de tiempo. Derecha: Gráfica de pronóstico.	42
Figura 8	Concentración de fluoruros en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México, de enero de 2010 a diciembre de 2023. Izquierda: Gráfica de series de tiempo. Derecha: Gráfica de pronóstico.	43

RESUMEN

Análisis y predicción de arsénico, plomo y flúor en agua subterránea mediante la evaluación de modelos de serie de tiempo. Caso Meoqui, Chihuahua.

Martha Lilia Ramírez de la Fuente

Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras

Los objetivos de esta investigación fueron evaluar cuatro modelos de series de tiempo para pronosticar su comportamiento y determinar si los niveles de estos tres elementos cumplen con la Norma Oficial Mexicana. Los modelos que se implementaron y calibraron para estimar y predecir las series de tiempo consideradas en el análisis son: ARIMA, Facebook Prophet (Prophet), Lasso y Elastic-Net Regularized Generalized Linear Models (GLMNET) y un modelo híbrido de Prophet con Extreme Gradient Boosting (XGBoost). Los datos fueron proporcionados por la Junta Municipal de Aguas y Saneamiento (JMAS) de Meoqui y abarcan el período de enero de 2002 a diciembre de 2023. Los niveles máximos de Arsénico (As) estipulados por la normatividad se han cumplido desde 2021. Cabe destacar que los niveles máximos de plomo (Pb) no se han excedido durante el período de análisis. Los niveles de As y flúor (F) han disminuido en los últimos años, lo que podría estar relacionado con las medidas correctivas implementadas por las autoridades gestoras. Las proyecciones para las próximas décadas sugieren que los niveles de As, Pb y F se mantendrán por debajo del umbral máximo establecido por la norma para estos contaminantes. El modelo que proporciona las predicciones más precisas de las concentraciones de As, Pb y F en el agua subterránea de Meoqui es Prophet. Los resultados de este estudio proporcionarán a las autoridades competentes la evidencia necesaria para establecer prácticas sostenibles de gestión de los recursos hídricos y garantizar la calidad del agua que consume la población.

Palabras Clave: Modelos calibrados, ARIMA, Facebook Prophet, GLMNET, XGBoost, Calidad del agua.

ABSTRACT

Analysis and prediction of arsenic, lead, and fluoride in groundwater by evaluating time-series models. Case in Meoqui, Chihuahua.

Martha Lilia Ramírez de la Fuente

Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro

Dr. Francisco Gerardo Véliz Deras

The objectives of this research were to evaluate four time series models to predict their behavior and determine whether the levels of these three elements comply with the Mexican Official Standard. The models implemented and calibrated to estimate and predict the time series considered in the analysis are: ARIMA, Facebook Prophet (Prophet), Lasso and Elastic-Net Regularized Generalized Linear Models (GLMNET), and a hybrid Prophet model with Extreme Gradient Boosting (XGBoost). The data were provided by the Municipal Water and Sanitation Board (JMAS) of Meoqui and cover the period from January 2002 to December 2023. The maximum levels of Arsenic (As) stipulated by regulations have been met since 2021. It is noteworthy that the maximum levels of lead (Pb) have not been exceeded during the analysis period. As and fluoride (F) levels have decreased in recent years, which could be related to the appropriate measures implemented by the managing authorities. Projections for the coming decades suggest that As, Pb, and F levels will remain below the maximum threshold established by the standard for these contaminants. The Prophet model provides the most accurate predictions of As, Pb, and F concentrations in Meoqui's groundwater. The results of this study will provide the competent authorities with the necessary evidence to establish sustainable water resource management practices and ensure the quality of the water consumed by the population.

Keywords: *Calibrated Models; ARIMA; Facebook Prophet; GLMNET; XGBoost, Water Quality.*

I. INTRODUCCIÓN

El acceso a agua potable, suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible constituye un derecho humano reconocido por la Resolución 64/292 de la Asamblea General de las Naciones Unidas, y es un requisito indispensable para garantizar la salud pública, la seguridad hídrica y el desarrollo sostenible; no obstante, a nivel mundial, se estima que una de cada tres personas carece de acceso seguro a agua potable (Peydayesh & Mezzenga, 2021). Este recurso, particularmente cuando proviene de acuíferos, puede contener contaminantes como arsénico (As), flúor (F) y plomo (Pb), cuya ingesta prolongada representa un riesgo significativo para la salud pública (Organización de las Naciones Unidas, 2021).

En México, la disponibilidad y calidad del agua subterránea están estrechamente vinculadas a su explotación. En el caso del acuífero “Meoqui-Delicias” (clave 0831), perteneciente a la región hidrológica VI Río Bravo, los reportes oficiales indican que en 2020 presentaba déficit y sobreexplotación, con una disponibilidad negativa (Gobierno del Estado Libre y Soberano de Chihuahua, 2023). Según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), este acuífero recibe una recarga aproximada de 211 hm³ anuales, frente a una extracción estimada de 376 hm³, lo que refleja una presión sostenida sobre el recurso y un desequilibrio hidrológico crítico (CONAGUA & Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas, 2024).

La sobreexplotación no solo reduce las reservas disponibles, sino que también modifica las condiciones hidrogeológicas del acuífero, favoreciendo procesos como la movilización de contaminantes geogénicos y la variación estacional en su concentración. Así, en la región de Meoqui, donde la agricultura es una actividad económica predominante, la elevada demanda de agua para riego genera oscilaciones en los niveles de los pozos (Legarreta-González et al., 2024a), lo que a su vez puede provocar fluctuaciones temporales en las concentraciones de As, Pb y F en el agua destinada al consumo humano.

Bajo este contexto, se plantea la hipótesis de que, entre 2002 y 2023, los niveles de As, Pb y F en el agua subterránea de Meoqui han excedido los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-2021. Confirmar esta hipótesis permitiría dimensionar el riesgo sanitario y orientar acciones de mitigación.

Las mediciones hidrológicas constituyen herramientas esenciales para la gestión sostenible del recurso hídrico, ya que facilitan la prevención de enfermedades asociadas con la escasez y la contaminación, además de anticipar cambios demográficos y reducir la vulnerabilidad ante variaciones climáticas (Bilyaminu & Gutti, 2021).

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del agua subterránea en Meoqui, Chihuahua, durante el periodo 2002-2023, con base en los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021, y modelar, mediante series temporales ARIMA, el comportamiento de las concentraciones de As, Pb y F. La finalidad es generar evidencia científica que sustente estrategias de gestión hídrica orientadas a la sostenibilidad y la protección de la salud pública.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 El agua

Según Gleick (2003), el agua es un compuesto inorgánico polar que, a temperatura ambiente, es insípido, inodoro e incoloro, y se describe como el disolvente universal. También es el compuesto químico más abundante en la Tierra y el único que se encuentra de forma natural en tres estados físicos en su superficie: gas, líquido y sólido.

En el caso de los tejidos humanos, el contenido de agua varía desde un 20% en los huesos hasta un 85% en las células cerebrales, aunque, no solo es un componente esencial de los organismos, sino también uno de los principales factores ambientales que influyen en ellos, pues muchos seres vivos habitan en ambientes acuáticos como océanos, lagos, ríos o estanques de agua dulce (Ndodo et al., 2024).

El agua natural contiene diversos componentes que le confieren propiedades específicas, como la salinidad, alcalinidad, dureza, acidez y corrosividad. Comprender su composición química y sus características es fundamental para abordar problemas científicos y prácticos relacionados con su uso en actividades domésticas e industriales (Knight et al., 2019), ya que el agua puede contaminarse con gases, sólidos disueltos y otras sustancias químicas, lo que puede modificar significativamente sus propiedades. Si bien no todas las impurezas pueden eliminarse por completo, la mayoría pueden ser retiradas mediante diversos métodos de tratamiento (Speight, 2020).

2.2 Propiedades fisicoquímicas del agua

Una característica fundamental del agua es su naturaleza polar ver figura 1 (B), derivada de su estructura molecular angular, en la que los dos átomos de hidrógeno están dispuestos en posiciones relativas respecto al vértice del

oxígeno (Pivovarenko, 2018). El ser una molécula altamente polar, le permite establecer interacciones electrostáticas intensas consigo misma, con otras moléculas y con iones, dando lugar a la cohesión, el elevado calor de vaporización, la constante dieléctrica y la tensión superficial (Speight, 2020).

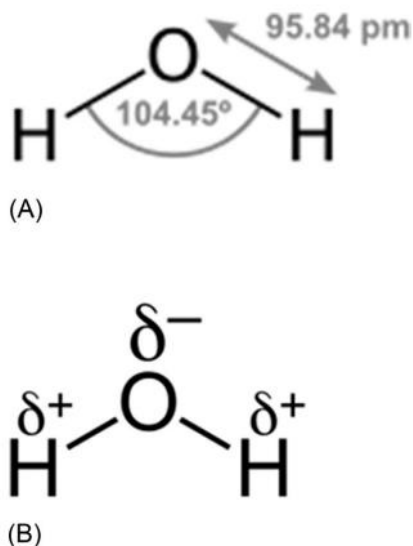


Figura 1. (A) La estructura del agua y (B) la negatividad relativa del hidrógeno. (Speight, 2020).

La capacidad del agua para disolver sustancias proviene de su polaridad, originada por la diferencia de electronegatividad entre el hidrógeno y el oxígeno, lo que genera una distribución asimétrica de carga que permite la formación de enlaces de hidrógeno entre moléculas, originando regiones con carga parcial positiva y negativa, lo cual facilita la interacción con partículas polares o iónicas y favorece su disolución en el medio acuoso (Speight, 2020).

La calidad del agua es crucial para prevenir enfermedades y mejorar la calidad de vida. Los parámetros clave para probar la calidad del agua incluyen color, temperatura, acidez, dureza, pH, sulfato, cloruro, oxígeno disuelto, DBO, DQO y alcalinidad. Los metales pesados como el plomo, el cromo, el hierro y el mercurio

son particularmente preocupantes debido a su potencial para envenenar a los animales acuáticos (Sagar et al., 2015).

La capacidad del agua para disolver sustancias proviene de su polaridad, originada por la diferencia de electronegatividad entre el hidrógeno y el oxígeno, lo que genera una distribución asimétrica de carga que permite la formación de enlaces de hidrógeno entre moléculas, originando regiones con carga parcial positiva y negativa, lo cual facilita la interacción con partículas polares o iónicas y favorece su disolución en el medio acuoso (Speight, 2020).

2.3 Disponibilidad de agua potable a nivel mundial y nacional.

De acuerdo con datos del Banco Mundial, en México el promedio de agua por persona ha pasado de 10.000 m³ en 1960, a 4.000 en 2000, y actualmente ronda los 3.200 m³. Como consecuencia del deterioro de los cuerpos de agua, se estima que para 2030 la disponibilidad en México descienda por debajo de los 3.000 m³ por habitante al año (Comisión Nacional del Agua, 2020).

2.4 Ejes de uso de agua: potable, industrial y agrícola en México

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) una persona requiere de 100 litros de agua al día (5 o 6 cubetas grandes) para satisfacer sus necesidades básicas (tanto de consumo como de higiene). Sin embargo, en México, principalmente en las regiones del centro del país, el consumo promedio de agua por persona es de 380 litros de agua al día. Las entidades federativas con mayor volumen concesionado son Sinaloa, Sonora, Veracruz, Michoacán y Chihuahua, y las de menor volumen son Aguascalientes, Ciudad de México, Baja California Sur, Tabasco y Tlaxcala.

2.5 Distribución porcentual del agua concesionada por tipo de uso

El volumen de agua consumida por los distintos sectores en México es reportado a través del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa). Sin embargo, no es posible identificar el consumo real, ya que no existe un control puntual sobre los títulos de concesión, sino únicamente estimaciones. En 2020, el sector agropecuario reportó el mayor uso del agua con 76% del total concesionado para riego de cultivos y ganadería. En la figura 2 se muestra la distribución porcentual del agua concesionada por tipo de uso (Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), 2023).

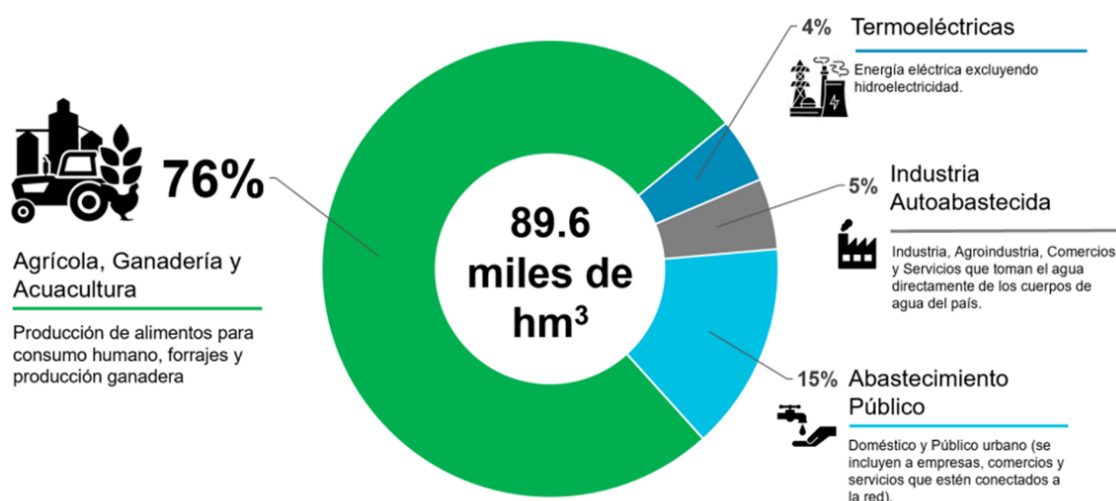


Figura 2. Distribución porcentual del agua concesionada por tipo de uso (Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO), 2023)

2.6 Normatividad para la calidad del agua

La importancia del agua potable y saludable para el uso humano y ambiental es reconocida desde hace tiempo. Prueba de ello es el desarrollo de estándares de calidad del agua para el agua potable y las aguas residuales tratadas, así como la promulgación de regulaciones para proteger los recursos hídricos en general

de la contaminación y el agotamiento. La evaluación de la calidad del agua se basa en el monitoreo de sus parámetros físicos, químicos y biológicos y su comparación con los estándares u objetivos regulatorios (Bozorg-Haddad et al., 2021). Las normas de calidad del agua son fundamentales para evaluar el estado de las masas de agua y proporcionar puntos finales de protección y restauración. Hasta la fecha, gran parte de la infraestructura utilizada para implementar las normas de calidad del agua se ha destinado a la remediación y la gestión de la contaminación procedente de vertidos de fuentes puntuales (Miltner, 2024).

2.6.1 Marco jurídico y normativo en México sobre calidad de agua potable

En México, la regulación del abastecimiento de agua para uso y consumo humano se encuentra fundamentada en disposiciones legales y normativas que buscan garantizar su calidad y seguridad sanitaria. Entre ellas, la Secretaría de Salud establece que el suministro de agua debe cumplir con estándares que prevengan y controlen la propagación de enfermedades de origen hídrico. Para ello, se requiere la determinación y actualización continua de los límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas, microbiológicas y radioactivas, asegurando que los sistemas de abastecimiento, tanto públicos como privados, proporcionen agua con calidad óptima.

En este marco, la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1 tiene por objeto establecer un control sanitario estricto sobre el agua sometida a procesos de potabilización, de modo que sea apta para uso y consumo humano, en concordancia con las necesidades y exigencias actuales en materia de salud pública. Dicha norma se articula con otros instrumentos regulatorios, como la Ley General de Salud y el Reglamento de la Comisión Nacional del Agua, conformando un sistema integral de control que salvaguarda el derecho humano al acceso a agua segura y de calidad. En el cuadro 1 se especifica la relación de cada una de estas regulaciones y leyes con la Norma Mexicana NOM-127-SSA1.

Cuadro 1. Instrumentos normativos aplicables al abastecimiento de agua potable en México y su relación con la NOM-127-SSA1.

Instrumento normativo	Objetivo principal	Relación con la NOM-127-SSA1
Ley General de Salud	Establecer las bases para el acceso a los servicios de salud, incluyendo el control sanitario del agua.	Proporciona el marco legal general.
Reglamento de la Ley General de Salud en Materia de Control Sanitario de Actividades, Establecimientos, Productos y Servicios	Regular las actividades relacionadas con el control de sanitario, incluyendo el abastecimiento de agua para consumo humano.	Desarrolla procedimientos y responsabilidades para cumplir con lo establecido en la Norma.
Ley de Aguas Nacionales	Regular la explotación, uso, conservación y administración de las aguas nacionales.	Complementa la Norma al establecer criterios para la gestión de fuentes de abastecimiento.
Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales	Detallar los procedimientos para la administración, concesión y vigilancia de las aguas nacionales.	Vincula la gestión de recursos hídricos con las obligaciones de calidad establecidas en la norma.
NOM-127-SSA1-2021	Establecer los límites permisibles de calidad y tratamientos de potabilización para el agua destinada a consumo humano.	Norma técnica específica que detalla parámetros físicos, químicos, microbiológicos y radiactivos.
NOM-230-SSA1-2002	Establecer los requisitos sanitarios para los sistemas de abastecimiento de agua, distribución y control de calidad.	Complementa la norma al definir criterios de infraestructura y manejo del agua.

Los estándares de calidad de agua se clasifican en: parámetros físicoquímicos, químicos geogénicos, contaminantes microbiológicos antropogénicos, contaminantes químicos antropogénicos (Charles, K. J., 2021). La NOM-127-SSA1-1994 (modificación 2000), estandariza los métodos analíticos con los cuales se analiza cada parámetro. En los cuadros 2, 3, 4, 5 y 6 se pueden observar cada uno de ellos y se organizan según las categorías: físicoquímicos;

herbicidas fenoxiclorados y plaguicidas; thrialometanos totales y BTex (benceno, toluenos, etilbencenos y xilenos), metales y análisis microbiológicos respectivamente. Esta organización y la aparición o eliminación de los parámetros ha cambiado conforme el tiempo debido a las modificaciones realizadas en la norma.

Cuadro 2. Parámetros fisicoquímicos analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.

Parámetro	Método analítico	Unidades
Temperatura	NMX AA 7 1980	°C ¹
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001	mg/L ²
	NOM-201-SSA1-2015 A.N	
Color verdadero (Pt-Co)	A3.1	U (Pt-Co) ³
	NOM-201-SSA1-2015 A.N	
Turbiedad	A3.2	UTN ⁴
Conductividad	NMX-AA-093-SCFI-2000	MicroS/cm ⁵
pH en campo	NMX-AA-008-SCFI-2016	U Ph ⁶
Dureza total	SM 21th 2340C-2011	mg/LCaCO ₃ ⁷
Alcalinidad total	NMX-AA-036-SCFI-2001	mg/L
Dureza de calcio (como CaCO ₃)	NMX-AA-072-SCFI-2001	mg/L
Dureza de magnesio	NMX-AA-072-SCFI-2002	mg/L
Sólidos disueltos totales	NMX-AA-034-SCFI-2015	mg/L
Sólidos suspendidos totales	NMX-AA-034-SCFI-2016	mg/L
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2000	mg/L
Nitratos (nitrógeno de)	US EPA 353.2-1994	mg/L
Sulfatos	US EPA 9036-1986	mg/L
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	US EPA 9036-1987	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	US EPA 9036-1988	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	US EPA 9036-1989	mg/L
Grasas y aceites	US EPA 9036-1990	mg/L
Materia flotante	US EPA 9036-1991	mg/L
Huevos de helminto	US EPA 9036-1992	huevos/l ⁸

¹°C= grados centígrados, ²Mg/L= miligramos por litro, ³U (Pt-Co)= unidad Platino-Cobalto, ⁴UTN= unidades nefelométricas de turbidez, ⁵MicroS/cm= microsiemens por centímetro, ⁶U Ph= unidades de pH, ⁷mg/LCaCO₃= miligramos por litro de carbonatos de calcio, ⁸huevos/l= huevos por litro.

Cuadro 3. Parámetros herbicidas fenoxiclorados y plaguicidas analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.

Parámetro	Método analítico	Unidades
2,4-D	US EPA 8151A 1996	µg/L
Aldrin	US EPA 8081B 2007	µg/L
Dieldrin	US EPA 8081B 2007	µg/L
Clordano	US EPA 8081B 2007	µg/L
Lindano (Gamma hexacloruro de benceno BCH)	US EPA 8081B 2007	µg/L
Hexaclorobenceno	US EPA 8081B 2007	µg/L
Heptacloro	US EPA 8081B 2007	µg/L
Heptacloro y su epoxido	US EPA 8081B 2007	µg/L
Metoxicloro	US EPA 8081B 2007	µg/L
DDD (4,4,-DDD)	US EPA 8081B 2007	µg/L
DDE (4,4-DDE)	US EPA 8081B 2007	µg/L
DDT (4,4-DDT)	US EPA 8081B 2007	µg/L
Extracción de herbicidas	EPA 8151A-1996	NA**
Extracción de plaguicidas clorados	EPA 3510C-1996	NA

*ug/L= microgramos/litro, **NA= No aplica

Cuadro 4. Parámetros de thrialometanos totales y benceno, tolueno, etilbencenos, xilenos (BTEX) analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.

Parámetro	Método analítico	Unidades
Benceno	US EPA 8260D 2018	µg/L
Etilbenceno	US EPA 8260D 2018	µg/L
Tolueno	US EPA 8260D 2018	µg/L
Xilenos	US EPA 8260D 2018	µg/L
Bromodiclorometano (75-27-4)	US EPA 8260D 2018	µg/L
Bromoformo (75-25-2)	US EPA 8260D 2018	µg/L
Clorodibromometano (124-48-1)	US EPA 8260D 2018	µg/L
Cloroformo	US EPA 8260D 2018	µg/L
Etilbenceno	US EPA 8260D 2018	µg/L
M+p-Xileno	US EPA 8260D 2018	µg/L
O-Xileno	US EPA 8260D 2018	µg/L
Tolueno	US EPA 8260D 2018	µg/L
Thrialometanos totales	US EPA 8260D 2018	µg/L

Cuadro 5. Parámetros de metales analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.

Parámetro	Límite máximo permisible	Unidades
Aluminio	0.2	mg/L *
Arsénico	0.025	mg/L *
Bario	0.7	mg/L *
Cadmio	0.005	mg/L *
Cobre	2	mg/L *
Cromo	0.05	mg/L *
Fierro	0.3	mg/L *
Manganeso	0.15	mg/L *
Mercurio	0.001	mg/L *
Plomo	0.01	mg/L *
Sodio	200	mg/L *
Zinc	5	mg/L *

Cuadro 6. Parámetros microbiológicos analizados según la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.

Parámetro	Límite máximo permisible	Unidades
Mesofílicos aerobios	Ausencia	UFC*/100 ml
Coliformes totales	Ausencia	UFC*/100 ml
Coliformes fecales	Ausencia	UFC*/100 ml

*UFC= Unidades Formadoras de Colonias

2.7 Metales pesados

En el ámbito de la contaminación ambiental, los metales pesados se reconocen como una preocupación primordial para la salud pública. El (As) y el plomo (Pb) se consideran los contaminantes más nocivos, debido a su presencia en fuentes de agua destinadas al consumo humano. El término "metales pesados" se atribuye a su alta densidad. Sin embargo, la pertinencia del término en cuestión está más estrechamente relacionada con su composición química que con su densidad (Walker, 1977). "Metal pesado" se refiere a un elemento metálico que posee una densidad relativamente alta ($> 4 \text{ g/cm}^3$ o 5 veces la del agua) y, por lo tanto, es peligroso o tóxico incluso en bajas concentraciones. (Jomova et al., 2024). Estos elementos son componentes inalterables del entorno circundante debido a su incapacidad para descomponerse o eliminarse.

2.8 Arsénico en la Naturaleza

El arsénico se encuentra como resultado de procesos naturales, pero su presencia puede verse incrementada por las actividades humanas (Pabón et al., 2020). Esta situación genera una creciente contaminación de las aguas subterráneas por iones metálicos tóxicos (Antonio, 2022).

En el contexto de las aguas subterráneas, la presencia de As constituye un problema de salud pública mundial. Esto se debe a que estas representan una fuente principal de agua potable y siguen siendo un recurso hídrico importante. (Thakur & Devi, 2024) Una proporción significativa de las fuentes de agua potable en los países en desarrollo provienen de aguas subterráneas, y los datos indican que más de dos tercios de estas fuentes provienen de aguas subterráneas (Thakur & Devi, 2024).

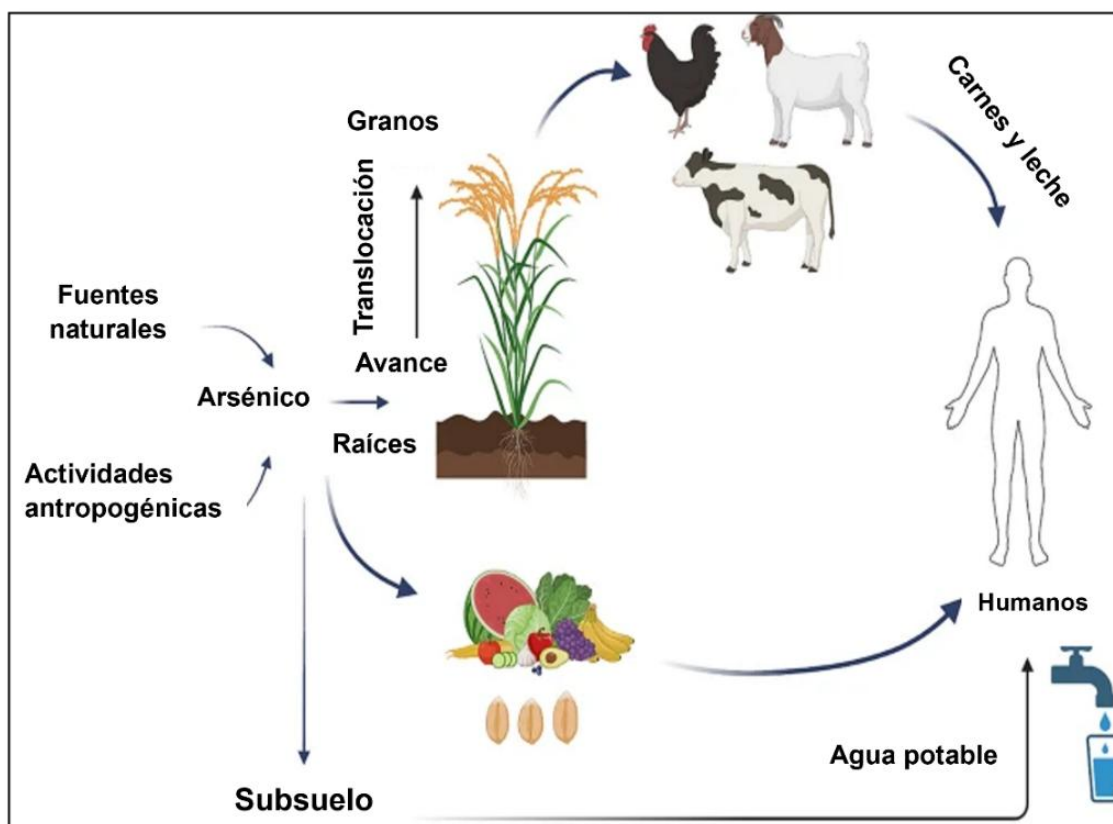


Figura 3. Transferencia de arsénico de fuentes naturales a humanos (Rajendran A. et al, 2024).

2.9 Efectos nocivos del arsénico

La ingestión prolongada de agua con altos niveles de arsénico se ha relacionado con gangrena, lesiones cutáneas y un posible aumento del riesgo de cáncer de útero e hígado a largo plazo, además de múltiples complicaciones sistémicas (Thakur y Devi, 2024). Entre los efectos documentados, tanto a corto como a largo plazo, destacan las lesiones dermatológicas, gastroenteritis, insuficiencia renal y hepática. Según Polukhova (2025), la exposición crónica también se asocia con enfermedades metabólicas como diabetes tipo 2, osteoporosis, hipertensión, enfermedad cardiovascular y obesidad, junto con signos inespecíficos, siendo la hiperpigmentación con áreas despigmentadas intercaladas el marcador cutáneo más sensible. Asimismo, la intoxicación crónica

por arsénico incrementa el riesgo de cáncer de piel, pulmón y vejiga, y provoca alteraciones gastrointestinales, hepáticas, cardiovasculares, neurológicas, respiratorias y renales (Jomova et al., 2024). El deterioro cognitivo inducido por metales puede generar repercusiones sociales duraderas, como bajo rendimiento escolar, limitación laboral y agravamiento de desigualdades socioeconómicas, lo que aumenta la probabilidad de enfermedades neurodegenerativas como Alzheimer y Parkinson (Tian et al., 2025). El hígado, en particular, presenta alta vulnerabilidad, evidenciada por casos de hepatomegalia, esclerosis hepatoportal, fibrosis y cirrosis.

2.10 Arsénico en Meoqui

La información hidrogeológica de Meoqui muestra un origen geogénico natural del As relacionado con el flujo de recarga de los depósitos minerales de arsenopirita en las cordilleras circundantes y el contacto con sedimentos acumulados en el acuífero a lo largo del tiempo. En las comunidades afectadas por este y otros parámetros, se aplica el proceso de ósmosis inversa al agua potable para su desmineralización (Espino M., 2009).

2.11 Flúor en la Naturaleza

El F se encuentra con mayor frecuencia en las aguas subterráneas y se ha convertido en uno de los riesgos ambientales toxicológicos más importantes a nivel mundial. Su presencia en las aguas subterráneas se atribuye a la erosión y lixiviación de minerales fluorados de rocas y sedimentos (Burgstahler, 1967).

2.12 Efectos nocivos del flúor

El F es otro contaminante relevante del agua potable. Aunque en varios países se añade al suministro público o a la sal para prevenir la caries dental, su presencia natural en sistemas comunitarios puede alcanzar concentraciones

nocivas (Taylor et al., 2025). La exposición crónica a niveles elevados se asocia no solo con fluorosis dental, sino también con fluorosis esquelética, la cual debilita y fragiliza los huesos y provoca alteraciones neurológicas y disfunciones tiroideas (Raghav et al., 2023). Se estima que alrededor de 200 millones de personas en más de 25 países consumen agua con concentraciones de flúor superiores a los límites recomendados (Bhairav et al., 2025), existiendo vínculos entre la fluorosis dental, anomalías óseas y cambios en la densidad mineral, observándose en adultos con fluorosis dental una densidad de columna lumbar un 112 % mayor que en quienes no la presentan. Asimismo, el 86,5 % de los niños con fluorosis avanzada mostró alteraciones en el desarrollo óseo de la muñeca, frente a controles de igual edad y sexo (Méndez-Estrada, 2025).

2.13 Plomo en la naturaleza

El Pb es el segundo metal más tóxico y comprende el 0,002% de la corteza terrestre encontrándose de forma natural en una cantidad muy limitada. La contaminación por metales en los ecosistemas constituye una de las problemáticas ambientales más relevantes debido a sus efectos potencialmente letales sobre organismos vegetales, animales y humanos. Incluso en concentraciones mínimas, estos elementos pueden provocar toxicidad significativa como resultado de su naturaleza no biodegradable y su capacidad de bioacumulación. De acuerdo con su toxicidad, los metales se clasifican en tres categorías: (1) metales de alta toxicidad, como mercurio (Hg), plomo (Pb) y cadmio (Cd); (2) metales de toxicidad moderada, entre ellos talio (Tl), bismuto (Bi) y arsénico (As); y (3) metales esenciales para el organismo, como zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe) y cobalto (Co), los cuales participan en procesos bioquímicos fundamentales, pero pueden resultar perjudiciales o letales si se superan determinados umbrales de concentración (Raj & Das, 2023).

El Pb es reconocido como cancerígeno para los seres humanos. Los seres humanos ingieren principalmente entre el 30% y el 60% de Pb, que también es

absorbido por el cuerpo siendo los niños particularmente susceptibles a sus efectos. Este metal induce estrés oxidativo al impedir la reposición del glutatión y puede provocar anemia hemolítica mediante la alteración de las membranas celulares inducida por la peroxidación lipídica. Además, altera los niveles de neurotransmisores e induce graves complicaciones de salud, algunas mortales, debido al daño orgánico (Kumar et al., 2024).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

Los datos se recopilaban en la ciudad de Meoqui, Chihuahua, México. Las coordenadas geográficas de la ciudad son 28° 5' 06" N, 105° 17' 56" O. La figura 4 ilustra la ubicación geográfica del municipio de Meoqui. El clima es semiárido, con temperaturas entre -2 °C y 13 °C en invierno y máximas entre 38 °C y 42 °C en verano.

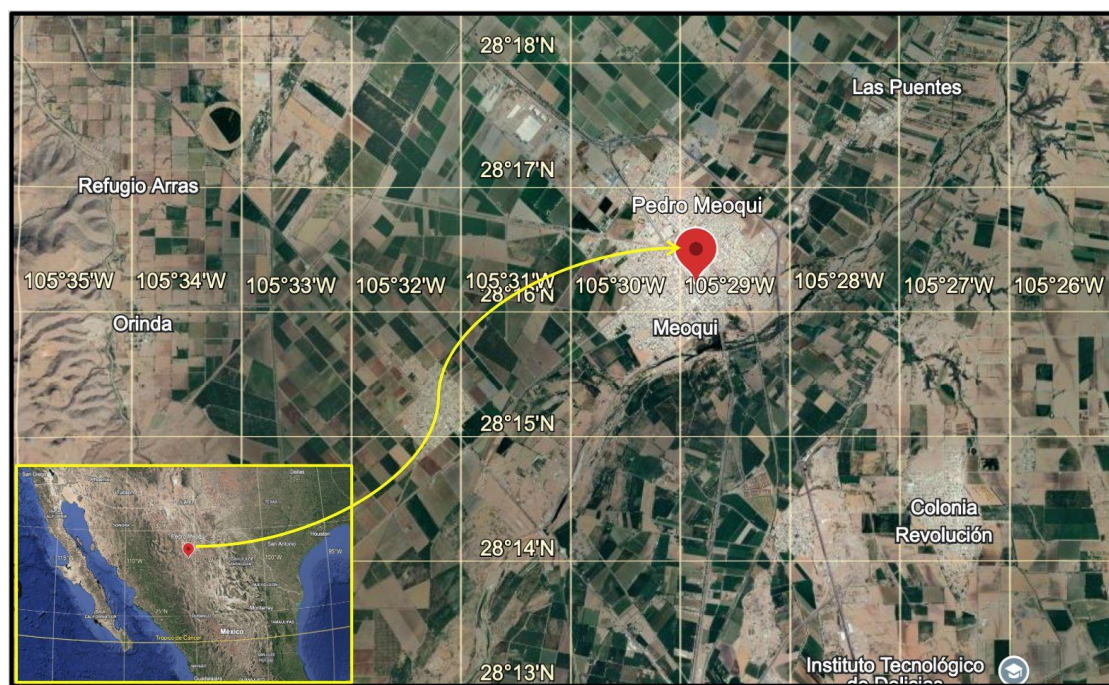


Figura 4. Ubicación geográfica del municipio de Meoqui (Legarreta-González et al., 2024).

La Ecorregión del Desierto Chihuahuense, tal como la define la comunidad científica, abarca una superficie de aproximadamente 70 millones de hectáreas, extendiéndose sobre una porción sustancial de los estados mexicanos de Chihuahua, Coahuila, Durango y Zacatecas, así como regiones significativas de los estados mexicanos de San Luis Potosí y Nuevo León y de Texas y Nuevo México en Estados Unidos (Dinerstein et al., 2001).

El área en consideración se ubica en la provincia fisiográfica de sierras y cuencas, atravesada por dos ríos de gran importancia: el San Pedro y el Conchos. El aprovechamiento de estos cuerpos de agua como recurso para riego se ha identificado como un aspecto significativo de su importancia ambiental. El clima de la región se clasifica como semiárido, caracterizado por niveles de precipitación anual que, si bien no alcanzan el umbral de aridez, superan el umbral de hiperaridez. El análisis de los datos obtenidos indica que la temperatura fluctúa en un rango de -2 °C a 13 °C en enero y de 38 °C a 42 °C entre junio y agosto. El municipio de Meoqui cubre una superficie de 370 km², lo que representa el 0.149 % de la superficie total del estado de Chihuahua (INEGI, 2020). Los humedales del Río San Pedro, clasificados como sitio Ramsar desde 2012, poseen una notable relevancia ecológica, caracterizada por su alto grado de biodiversidad y su función como hábitat para aves acuáticas (Herrera-González et al., 2024).

3.2 Junta Municipal de Aguas y Saneamiento (JMAS) de Meoqui, Chihuahua.

Esta agencia es un organismo público descentralizado del Gobierno del Estado de Chihuahua. Su objetivo es facilitar la prestación de servicios públicos de tratamiento y distribución de agua potable en el municipio de Meoqui, Chihuahua. Inició sus operaciones en 1957 con el nombre de Junta Federal de Agua Potable.

En Meoqui se ha implementado una infraestructura de tuberías de agua potable con un volumen total de 94,000 m³. Ésta se complementa con 80,000 metros de sistemas de alcantarillado sanitario en la zona urbana de la localidad. Anualmente se instalan aproximadamente 8,000 metros de tuberías de alcantarillado sanitario y agua potable, tanto en la cabecera municipal como en la zona rural, como resultado de actividades de mantenimiento y nuevas construcciones.

JMAS Meoqui es responsable del mantenimiento y la construcción de la infraestructura de agua y alcantarillado para más de 14.000 conexiones domésticas, comerciales e industriales en todo el municipio. De éstas, 8.000 se ubican en la cabecera municipal, mientras que 6.700 se encuentran en zonas rurales. El servicio de suministro de agua continúa funcionando sin interrupción, lo que garantiza una respuesta rápida ante cualquier fuga detectada. Además, el centro urbano principal cuenta con cuatro tanques elevados, con una capacidad total de almacenamiento de 1.150 metros cúbicos.

El proceso de tratamiento de aguas residuales urbanas se ve facilitado por la ubicación estratégica de lagunas de oxidación en las regiones norte y sur, que en conjunto contribuyen con el 33 % del proceso total de tratamiento. JMAS Meoqui cuenta con 12 plantas de ósmosis, cuatro en la ciudad de Meoqui, con una capacidad de filtración de 10.000 litros al día, y el resto en comunidades rurales con una capacidad de 5.000 litros. Sin embargo, estas instalaciones no están integradas a la red de suministro de agua potable, por lo que los consumidores deben acceder a ellas para obtener agua tratada.

3.3 Recopilación de Datos

La ciudad cuenta con 10 pozos para la extracción de agua, observándose en la figura 5 la ubicación geográfica de éstos. Los datos se obtuvieron de los 10 pozos entre los años 2010 y 2023. Los pozos cuentan con medidores de agua cuyos datos se almacenan en una base de datos de Excel en una computadora ubicada en la sede de la JMAS. Los datos utilizados en este estudio corresponden a la tasa media mensual de extracción. Los pozos F-4, F-5 y F-6 se utilizan para abastecer de agua potable a la industria cervecera, mientras que los pozos 1, 4, 5, 6, 7, F1 y F-2 abastecen de agua a diversos sectores, como el doméstico, comercial, educativo, público e industrial. El agua obtenida de estos siete pozos es potabilizada por la JMAS y posteriormente distribuida a los sectores mencionados a través de la red municipal de agua potable. La mayoría de estos

pozos están equipados con variadores de frecuencia, lo que permite implementar una estructura de gastos variable según la demanda de la población. De esta forma se ajustan los costos en respuesta a las fluctuaciones de la demanda, facilitando un suministro de energía más eficiente y rentable. De acuerdo con la normativa mexicana, se deben tomar muestras de agua al menos cada seis meses y enviarlas para su análisis a un laboratorio externo certificado. En algunos casos, se han realizado análisis de mezclas de agua de dos o más pozos, sin embargo, se han analizado muestras de pozos individuales con regularidad.



Figura 5. Vista satelital de la ciudad de Meoqui y ubicación de los pozos utilizados para el muestreo de arsénico, plomo y fluoruros en agua potable (Legarreta-González et al., 2024b).

3.4 Métodos estadísticos

En el presente estudio se evaluaron y probaron cuatro metodologías diferentes para estimar modelos de series de tiempo de As, Pb y F históricos en Meoqui, Chih., México. Las metodologías evaluadas y probadas fueron el modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA), Facebook Prophet, Lasso y modelos lineales generalizados regularizados Elastic-Net (GLMNET), y un modelo híbrido de Facebook Prophet con el modelo de refuerzo de gradiente extremo (XGboost). En la sección siguiente, se presenta un resumen conciso de la justificación estadística de las metodologías revisadas.

3.4.1 Modelo ARIMA

De acuerdo con la propuesta de Box et al., (2016) dentro del paradigma de una serie temporal particular, la evaluación anticipada de una observación está determinada por la ecuación 1:

$$Y_t = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_t \quad (1)$$

En la ecuación 1, Y son las observaciones en el tiempo de t .

Si P es igual a 1, la ecuación se convierte en ecuación 2, similar a la descrita en (Patle et al., 2015).

Cuando,

$$P > 1; Y_t = c + \phi_1 Y_{t-1} + \phi_2 Y_{t-2} + \dots + \phi_p Y_{t-p} + e_t \quad (2)$$

En el estudio de (Herrera-González et al., 2024), ambas constantes, c y ϕ_1 , se emplean para tratar el error aleatorio en t . Por el contrario, e_t se emplea para evaluar errores previos de forma análoga a la descrita por

(Legarreta-González et al., 2024a). En su artículo, ambas constantes, c y ϕ_1 , se utilizan para tratar el error aleatorio en t . A su vez, el parámetro e_t se emplea para evaluar errores previos de forma análoga a su enfoque, como se muestra en la ecuación 3.

$$Y_t = c + e_t - \phi_1 e_{t-1} - \phi_2 e_{t-2} - \dots - \phi_q e_{t-q} \quad (3)$$

3.4.2 Modelo Facebook Prophet

El modelo de series temporales Prophet, objeto de este estudio, constituye una mejora del modelo original que emplea un enfoque de tres componentes, que incorpora una tendencia, la estacionalidad y un término que considera el impacto de los periodos vacacionales. La integración de estos componentes se logra mediante la siguiente ecuación:

$$y^P(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \epsilon_t \quad (4)$$

La función $g(t)$ se utiliza para denotar la tendencia, la cual se utiliza para modelar fluctuaciones no periódicas en el valor de la serie temporal. La función $s(t)$ se utiliza para denotar cambios periódicos, mientras que la función $h(t)$ se utiliza para representar el impacto de días festivos o eventos que ocurren en horarios potencialmente irregulares durante uno o más días. El concepto de error, denotado como ϵ_t , se emplea para representar cualquier fluctuación idiosincrásica no considerada por el modelo. La distribución de los datos se muestra como normal, con una media de cero.

En casos donde las dificultades de pronóstico con datos de seguimiento no indican un crecimiento saturado, una tasa de crecimiento constante por tramos puede ofrecer un enfoque de modelado parsimonioso y, a menudo, beneficioso. Este supuesto es coherente con la metodología empleada por (S. J. Taylor &

Letham, 2018) en su estudio sobre pronósticos. La función $g(t)$ puede aproximarse mediante una función lineal por secciones.

$$g(t) = kt + b \quad (5)$$

La implementación de cambios en la tendencia del modelo de crecimiento se logra mediante la definición explícita de puntos en los que se permite que la tasa de crecimiento varíe. Se supone que existen p puntos de cambio observados a lo largo del tiempo $t_j, j = 1, \dots, p$. Un vector de ajustes de tasas se define de la siguiente manera:

$$\delta = \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p \quad (6)$$

Donde δ_j el cambio de tasa se está produciendo en *time* t_j . El modelo de tendencia está representado por la siguiente ecuación:

En este contexto, la tasa de crecimiento, denotada por la variable k , y el parámetro de compensación, denotado por el parámetro b , son de particular interés, ya que proporcionan información sobre la dinámica subyacente del sistema. Se ha determinado que dos elementos fundamentales están ausentes en la ecuación referenciada en la ecuación 5. En la fase inicial, la tasa de crecimiento no es constante para el conjunto de datos en cuestión. En segundo lugar, el desplazamiento no es un valor constante. Es imperativo que el modelo en cuestión incorpore una tasa de crecimiento variable para ajustarse a los datos históricos.

La implementación de cambios en la tendencia del modelo de crecimiento se logra definiendo explícitamente los puntos en los que se permite que la tasa de crecimiento varíe. La hipótesis es que existen p puntos de cambio observables a lo largo del tiempo, denotados por $t_j, j = 1, \dots, p$. El vector de ajustes de tarifas se define de la siguiente manera:

Se emplea la siguiente ecuación para denotar el delta: $\delta = \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_p$. En esta ecuación, δ_j denota la tasa de cambio que ocurre en *time* t_j . El modelo de tendencia está representado por la siguiente ecuación:

$$g(t) = (k + \mathbf{a}(t)\boldsymbol{\delta}^T)t + (b + \mathbf{a}(t)\boldsymbol{\gamma}^T) \quad (7)$$

Donde $\mathbf{a}(t) = a_1(t), a_2(t), \dots, a_p(t)$, y $a_j(t)$ puede expresarse como

$$a_j(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t \geq t_j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

El vector $\boldsymbol{\gamma}$ se define como $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_p$, donde γ_j está configurado para $-t - j\delta_j$. De esta manera, se garantiza la formulación de una función continua.

Dentro del paradigma de la función de estacionalidad $s(t)$, la variable T se define como el período periódico de la serie temporal. La simulación de los efectos periódicos puede lograrse mediante lo siguiente:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{P}\right) + a_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{P}\right) \right) \quad (8)$$

El objeto de análisis corresponde a una serie de Fourier estándar. En la fase posterior del proceso, se obtiene un total de $2N$. Hay parámetros disponibles para manipulación, que están representados por el vector $\boldsymbol{\beta} = a_1, b_1, \dots, a_N, b_N^T$. El propósito del presente análisis es examinar la convergencia de conceptos numéricos, con especial atención a la suma de dos o más números, como se desprende de la ecuación anterior. Es fundamental ajustar el valor de $\mathbf{N}$ para tener en cuenta las fluctuaciones estacionales. Los resultados del presente análisis demuestran una correlación directa entre el aumento del valor de $\mathbf{N}$ y el aumento de la complejidad de la función ajustada. Para lograr este objetivo, se

ha desarrollado una matriz de vectores estacionarios para cada valor de t , tanto en los conjuntos de datos históricos como en los futuros.

$$X(t) = \left[\cos\left(\frac{2\pi(1)t}{P}\right), \dots, \sin\left(\frac{2\pi(1)t}{P}\right) \right] \quad (9)$$

Entonces el componente estacional es:

$$s(t) = \mathbf{X}(t)\boldsymbol{\beta} \quad (10)$$

Donde $\boldsymbol{\beta}$ sigue $Normal(0, \sigma^2)$ para imponer un suavizado previo sobre la estacionalidad.

3.4.3 Holiday term, periodo de tiempo excluido

A diferencia de los procedimientos convencionales de descomposición de series temporales, este algoritmo incorpora un examen de los efectos de eventos atípicos, como los periodos excluidos, sobre los cambios en una serie temporal. Estos efectos se incorporan al modelo bajo el supuesto de independencia. En el contexto de esta discusión, se plantea la hipótesis de que la serie temporal de entrada contiene L excluidos. Para cada excluido designado, denotado por i , el conjunto de periodos de tiempo afectados está representado por H_i . En el ámbito de la planificación y gestión de eventos excluidos, se ha definido un parámetro conocido como $kappa_i$, representado como κ_i , $\kappa_i \in \kappa\widetilde{Normal}(0, \nu^2)$, y se asigna a cada excluido. Este parámetro se emplea para denotar la alteración correspondiente en el pronóstico. En consecuencia, se genera una matriz de regresión de forma análoga a la utilizada para la estacionalidad.

En el contexto de la investigación, se ha observado que la variable β exhibe una distribución normal con parámetros $\mu = 0$ y $\sigma^2 = 1$, lo que sugiere la presencia de un suavizado a priori sobre la estacionalidad.

$$\mathbf{Z}(t) = [\mathbf{1}(t \in H_1), \dots, \mathbf{1}(t \in H_L)] \quad (11)$$

Entonces,

$$h(t) = \mathbf{Z}(t)\boldsymbol{\kappa} \quad (12)$$

3.4.4 Modelos Lineales Generalizados Regularizados Lasso y Red Elástica (GLMNET)

En contraste, el método GLMNET es una técnica para ajustar modelos lineales generalizados y análogos mediante máxima verosimilitud penalizada. El procedimiento de regularización se determina calculando el bucle de penalización, también denominado red elástica, en una cuadrícula de valores (en escala logarítmica) para el parámetro de regularización, lambda (λ). La metodología propuesta por GLMNET es una aproximación al problema mencionado.

$$\min_{\beta_0, \beta} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i l(y_i, \beta_0 + \beta^T x_i) + \lambda[(1 - \alpha) \|\beta\|_2^2 / 2 + \alpha \|\beta\|_1] \quad (13)$$

El rango de posibles soluciones está intrínsecamente ligado a los valores representados en la cuadrícula, que se representan mediante las magnitudes λ . La penalización de la cuadrícula elástica se regula mediante el parámetro denominado «alfa», que facilita la transición entre el método de regresión lasso ($\alpha = 1$, por defecto) y el método de regresión ridge ($\alpha = 0$). El parámetro de ajuste, denominado «lambda», se utiliza para regular la magnitud de la intensidad total de la penalización, conocida como «penalización elástica neta».

3.4.5 Modelo XGBoost con hiperparámetros óptimos

Por el contrario, el algoritmo XGBoost implementa un árbol de clasificación y regresión (CART) como modelo de aprendizaje débil, con el objetivo de optimizar

los parámetros de entrenamiento en cada iteración. Este proceso facilita la adaptación progresiva a los residuos anteriores (Yang et al., 2022). El resultado de este proceso es un aprendiz fuerte.

Para un conjunto dado de datos que comprende n muestras, los datos se pueden expresar como una matriz D , donde $D = (x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$. El valor final previsto se define de la siguiente manera:

$$\hat{y}_i^M = \sum_{m=1}^M f_m(x_i) \quad (14)$$

En este trabajo el término $\hat{y}_i^M$ se utiliza para representar el valor previsto de la muestra 'i-ésima', mientras M se utiliza para indicar el número de CART. Además, la función $f_m(x_i)$ se utiliza para denotar el valor previsto de la i – ésima muestra en el $(m - 1)$ ésimo árbol.

A diferencia del algoritmo GBDT, XGBoost incorpora un objetivo regularizado en la función de pérdida, lo que limita la complejidad del CART y evita el sobreajuste. El objetivo regularizado para optimizar M iteraciones lo proporciona

$$Obj = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i^M) + \sum_{m=1}^M \Omega(f_m) \quad (15)$$

Este modelo se utiliza en conjunción con el modelo Prophet. Por ello, también se le conoce como modelo **híbrido**.

3.4.6 Tendencia de series de tiempo

La evaluación de la pendiente de la serie temporal se realizó empleando las estadísticas de pendiente de Sen y la prueba de Mann-Kendall.

a. Estimador de Sen

La pendiente se estima mediante la estimación de mínimos cuadrados mediante regresión lineal. La ecuación utilizada fue la propuesta por Sen (Sen, 1968), ecuación 16.

$$Q = \frac{Y_{i'} - Y_i}{i' - i} \quad (16)$$

Donde:

Q es una pendiente estimada.

$Y_{i'}$ es la suma de los valores en tiempos i' y i , donde i' es mayor que i .

La valoración Sen de la pendiente en medio de las subidas de N **Q** como se presenta en (Herrera-González et al., 2024); (Legarreta-González et al., 2024a) y (Legarreta-González et al., 2024a).

b. Prueba de tendencia Mann-Kendall

Este método se utilizó para probar la tendencia monótona en la serie temporal. La ecuación es la número 17.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (17)$$

Donde estadística de Mann–Kendall es **S** y *sign* es el símbolo de la función. Si $(x_j - x_i)$ es más grande que 0, **S** = 1, si es igual a 0, **S** = 0 y -1 de lo contrario como lo presenta (Anand et al., 2020).

3.4.7 Selección del modelo

Para seleccionar los modelos más adecuados se eligieron los valores más bajos del Error Absoluto Medio (EMA). En casos de igualdad de valores se empleó la Raíz Cuadrática Media de los Errores (RMSE) como criterio secundario, junto con el valor máximo alcanzable del coeficiente de determinación (R^2), como se indica

en los trabajos de (Jaya et al., 2024); (Xu, 2024); (Aquil & Ishak, 2023); (Agaj et al., 2024); (da Silva et al., 2024) y (Herrera-González et al., 2024). En los casos en que no se pudieron estimar los valores de R^2 , el modelo se descartó.

3.4.8 Análisis de datos

Se utilizó el programa R como lenguaje de programación (Version 4.5.0) (R Core Team, 2024) y R-packages broom (Version 1.0.6) (Robinson et al., 2024), dials (Version 1.3.0) (Kuhn & Frick, 2024), dplyr (Version 1.1.4) (Wickham, François, et al., 2023), ggplot2 (Version 3.5.1) (Wickham, 2016), infer (Version 1.0.7) (Couch et al., 2021), lubridate (Version 1.9.3) (Grolemund & Wickham, 2011), modeldata (Version 1.4.0) (Kuhn, 2024a) [R-modeldata], modeltime (Version 1.3.0), parsnip (Version 1.2.1) (Kuhn & Vaughan, 2024), purrr (Version 1.0.2) (Wickham & Henry, 2023), readr (Version 2.1.5) (Wickham, Hester, et al., 2024), recipes (Version 1.1.0) (Kuhn, Wickham, et al., 2024), reshape2 (Version 1.4.4) (Wickham, 2007), rsample (Version 1.2.1) (Frick et al., 2024), scales (Version 1.3.0) (Wickham, Pedersen, et al., 2023), stringr (Version 1.5.1) (Wickham, 2023), tibble (Version 3.2.1) (Müller & Wickham, 2023), tidymodels (Version 1.2.0) (Dancho, 2024), tidyr (Version 1.3.1) (Wickham, Vaughan, et al., 2024), tidyverse (Version 2.0.0) (Couch et al., 2021), timetk (Version 2.9.0) (Dancho & Vaughan, 2023), tinylabls (Version 0.2.4) (Barth, 2025), trend (Version 1.1.6) (Pohlert, 2023), tune (Version 1.2.1) (Kuhn, 2024b), workflows (Version 1.1.4) (Vaughan & Couch, 2024), workflowsets (Version 1.1.0) (Kuhn & Couch, 2024), y yardstick (Version 1.3.1) (Kuhn, Vaughan, et al., 2024) para los análisis y kableExtra (Version version 1.4.0) para los cuadros.

3.4.9 Entrenamiento / Prueba

1. Dividir la serie temporal en conjuntos de entrenamiento y de prueba.
2. Crear un conjunto de entrenamiento/prueba (12 meses).

3. Visualizar la división de entrenamiento/prueba.

4. Modelado.

a. Modelo:

$$ppm \sim date, training(splits)$$

3.4.10 Flujo de trabajo de Modeltime

El presente estudio utiliza el flujo de trabajo desarrollado por **Modeltime**, concebido para optimizar la evaluación y selección de modelos de forma sistemática y eficiente. Esta metodología se implementó con el objetivo de facilitar la identificación de los modelos más adecuados para un contexto determinado. Actualmente, se dispone de una amplia gama de modelos de series temporales, lo que permite el análisis y la predicción de resultados futuros mediante el enfoque de modelo-tiempo. Los pasos presentados por (Herrera-González et al., 2024) para los análisis se detallan a continuación.

3.4.11 Flujo de trabajo

1. Tabla Modeltime

La tabla Modeltime implementa un sistema de números de identificación y la generación de descripciones genéricas para facilitar la organización y el seguimiento de los modelos.

2. Calibración

El objetivo de la calibración del modelo es cuantificar la magnitud de los errores y estimar los intervalos de confianza. El procedimiento de calibración del modelo se implementó en el conjunto de datos fuera de la muestra (también denominado

conjunto de prueba) para generar los valores reales, los valores ajustados y los residuos del conjunto de prueba.

3. Pronóstico (Conjunto de Prueba)

En primer lugar, la calibración de los datos permite visualizar las predicciones de prueba, que pueden considerarse un pronóstico. La siguiente etapa del proceso consiste en verificar la precisión del procedimiento de prueba, lo que permite realizar comparaciones entre modelos.

4. Análisis de resultados

La selección del modelo más adecuado se basa en la evaluación de la precisión de las medidas utilizadas y los resultados de los pronósticos. Estos últimos se evalúan en función de su capacidad de pronóstico.

5. Reajuste

La etapa final del proceso consistió en la ejecución de un reajuste, de acuerdo con las mejores prácticas previamente establecidas, antes de pronosticar resultados futuros. Por consiguiente, se implementó un procedimiento de reescalado. Dado que los modelos dependen de la característica «fecha», se utiliza la opción «h» (horizonte) para la predicción. El período de estimación se amplía a 12 meses para facilitar la predicción de datos para el período posterior de 12 meses.

IV. RESULTADOS

4.1 Estadísticas descriptivas

4.1.1 Arsénico.

Durante el período analizado, la media, la desviación estándar y los valores máximos de As fueron de 0.06 ± 0.12 y 0.9 ppm, respectivamente. De acuerdo con las disposiciones de la NOM para el suministro de agua para uso y consumo humano, el cuadro 7 detalla las fechas, los pozos y las concentraciones en ppm de As en los que se excedieron los límites permisibles para la calidad del agua. El nivel máximo permitido de As es de 0.025 ppm.

Cuadro 7. Pozos muestreados, año, mes y ppm de Arsénico que presentaron un exceso de 0.025 ppm en agua potable en Meoqui, Chih., México.

Pozo(s)	Año	Mes	ppm
1	2010	4	0.036
5	2010	4	0.087
6	2010	4	0.171
7 y 2	2010	4	0.029
5	2011	11	0.9
6	2011	11	0.3
7 y 2	2011	11	0.036
7 y 2	2011	6	0.081
6	2011	6	0.178
7 y 2	2013	5	0.029
6	2013	5	0.034
5	2013	5	0.087
1, 5 y 7	2015	7	0.056
7 y 2	2015	7	0.077
5	2015	7	0.031
1	2015	7	0.069
6	2015	7	0.282
5	2017	4	0.071
F1	2017	4	0.059

6	2017	4	0.185
1	2017	4	0.031
F1 y 1	2017	4	0.03
F1 y 1	2017	4	0.03
5 y 7	2017	4	0.044
5 y 7	2017	4	0.07
1	2018	7	0.033
F1 y F2	2018	12	0.036
7 y 2	2018	12	0.027
F1	2018	12	0.075
F1	2018	4	0.069
7 y 2	2018	4	0.03
5	2018	4	0.074
1	2018	4	0.037
F1	2018	4	0.069
1	2019	7	0.034
5	2019	7	0.07
7 y 2	2019	7	0.037
F1	2019	7	0.067
1	2021	2	0.033
5	2021	2	0.069
7 y 2	2021	2	0.03

4.1.2 Plomo.

La media, la desviación estándar y los valores máximos de Pb fueron de 0.001 ± 0.002 y 0.01 ppm, respectivamente. Todos los valores de ppm de Pb observados cumplieron con lo estipulado en la norma para el suministro de agua para uso y consumo humano.

4.1.3 Fluoruros.

La media, la desviación estándar y los valores máximos de F fueron 2.07 ± 1.26 y 5.1 ppm, respectivamente. De acuerdo con lo estipulado en la norma para el suministro de agua para uso y consumo humano, el cuadro 8

detalla las fechas, los pozos y las concentraciones en ppm de F en las que se excedieron los límites permisibles para la calidad del agua. El nivel máximo permitido de F es de 1.5 ppm.

Cuadro 8. Pozos muestreados, año, mes y ppm de Fluoruros que sobrepasaron 1.5 ppm en agua potable en Meoqui, Chih., México.

Pozos	Año	Mes	ppm
5	2010	4	4.73
6	2010	4	2.52
7 y 2	2010	4	1.85
5	2011	11	4.65
6	2011	11	1.79
7 y 2	2011	11	3.13
F2	2011	11	2.33
6	2011	5	2.73
6	2012	3	2.48
5	2012	3	4.75
5	2012	11	4.64
6	2012	11	2.3
7 y 2	2013	5	1.94
6	2013	5	1.73
5	2013	5	4.9
F2	2014	8	1.54
1, 5 y 7	2015	7	2.76
5	2015	7	4.45
6	2015	7	3
5	2017	4	3.22
F1	2017	4	1.64
6	2017	4	3.17
1	2017	4	1.62

F1-1	2017	4	1.77
F1-1	2017	4	1.78
5 y 7	2017	4	3.18
7 y 2	2017	4	2.43
5 y 7	2017	4	3.44
1	2019	7	1.6
5	2019	7	5.1
7 y 2	2019	7	2.1

4.2 Selección de modelo

Como se muestra en el cuadro 9, se presentan los parámetros necesarios para seleccionar el modelo óptimo para As, PB y F. En todos los casos, el modelo más adecuado fue Prophet. Los valores de MAE y r^2 (parámetros empleados para la selección) fueron, respectivamente, a) 0,03 y 0,06 para As; b) 0,13 y 0,12 para Pb. En este caso particular, los valores fueron idénticos para el modelo híbrido; sin embargo, se seleccionó el modelo Prophet debido a su naturaleza significativamente más directa; y c) 1,04 y 0,04 para F. En este caso, la estimación del pronóstico fue constante y sin desviación estándar, por lo que no se puede estimar r^2 ; por lo tanto, se descartó el modelo ARIMA, seleccionando el modelo Prophet.

Cuadro 9. Parámetros de selección del modelo para Arsénico, Plomo y Fluoruros en agua potable en Meoqui, Chih., México.

	Arsénico			Plomo			Fluoruros		
	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2	MAE	RMSE	R^2
ARIMA	0.04	0.04	NA	0.14	0.15	NA	0.95	0.95	NA
Prophet	0.03	0.05	0.06	0.13	0.14	0.12	1.04	1.45	0.04
GLMNET	0.04	0.06	0.05	0.13	0.17	NA	4.43	4.72	0.06
Hybrid	0.04	0.06	0.02	0.13	0.17	0.12	1.91	2.54	0.01

4.3 Concentración de arsénico en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México de enero de 2010 a diciembre de 2023.

El cuadro 10 presenta la predicción de ppm de arsénico a 12 meses y sus intervalos de confianza (IC) del 95%, Inferior (ICI) y Superior (ICS) en agua potable.

Cuadro 10. Predicción mensual de 1 año de ppm de Arsénico y sus intervalos de confianza del 95% en agua potable en Meoqui, Chih., México.

Mes	ICI	Predicción	ICS
Enero	-0.13	-0.025	0.08
Febrero	-0.118	-0.013	0.092
Marzo	-0.13	-0.025	0.08
Abril	-0.031	0.074	0.179
Mayo	-0.118	-0.013	0.092
Junio	-0.105	0.001	0.106
Julio	-0.065	0.04	0.145
Agosto	-0.125	-0.02	0.085
Septiembre	-0.131	-0.026	0.079
Octubre	-0.132	-0.027	0.078
Noviembre	-0.024	0.081	0.186
Diciembre	-0.115	-0.009	0.096

La figura 6 muestra el gráfico de la serie temporal (izquierda) y (derecha) el gráfico del pronóstico. Pendiente de Sen=0.00, prueba de Mann-Kendal, $S=0.00$, Mann-Kendal Test, $S = -4.58 \times 10^2$, $p < 0.2875$, lo que indica que no existe una pendiente estadísticamente significativa.

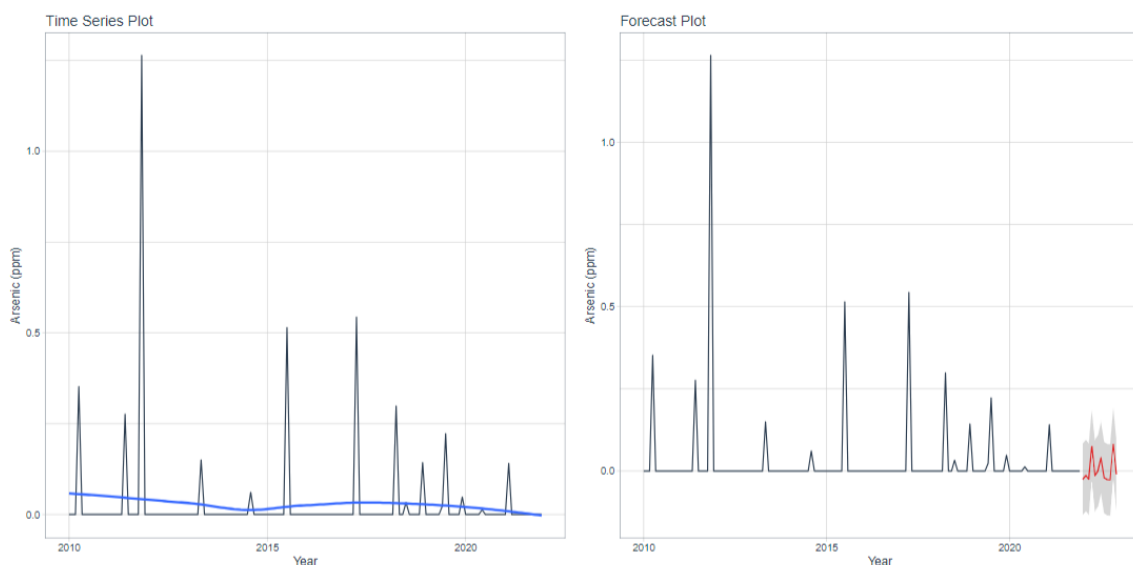


Figura 6. Concentración de arsénico en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México, de enero de 2010 a diciembre de 2023. Izquierda: Gráfica de series de tiempo. Derecha: Gráfica de pronóstico.

4.4 Concentración de plomo en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México de enero de 2010 a diciembre de 2023.

El cuadro 11 presenta la predicción a 12 meses y su IC del 95% de ppm de plomo en agua potable, mientras que la figura 7 (izquierda) muestra el gráfico de la serie temporal y (derecha) el gráfico del pronóstico. Pendiente de Sen = 0.00, Mann-Kendal Test, $S = -2.75 \times 10^2$, $p < 0.4785$, lo que indica que no existe una pendiente estadísticamente significativa.

Cuadro 11. Predicción mensual de 1 año de ppm de Plomo y sus Intervalos de Confianza del 95% en agua potable en Meoqui, Chih., México.

Mes	ICI	Predicción	ICS
Enero	-0.001	0	0.001
Febrero	-0.001	0	0.001
Marzo	-0.001	0	0.001
Abril	0	0	0.001
Mayo	0	0	0.001
Junio	-0.001	0	0
Julio	0.001	0.003	0.004
Agosto	-0.001	0	0
Septiembre	-0.001	0	0
Octubre	-0.001	0	0.001
Noviembre	-0.001	0	0.001
Diciembre	-0.001	0	0.001

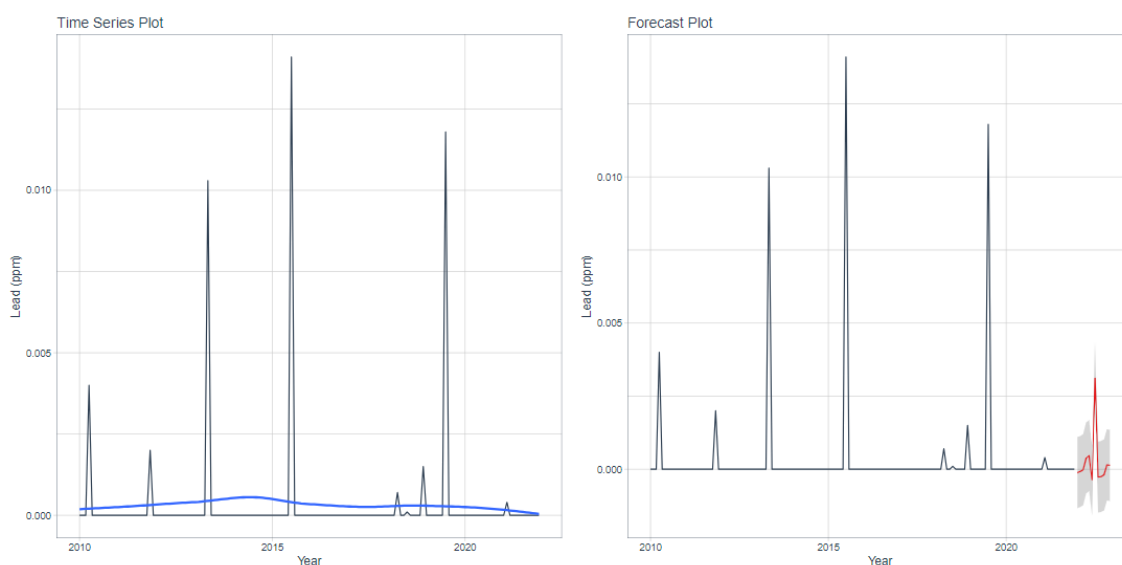


Figura 7. Concentración de plomo en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México, de enero de 2010 a diciembre de 2023. Izquierda: Gráfica de series de tiempo. Derecha: Gráfica de pronóstico.

4.5 Concentración de flúor en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México de enero de 2010 a diciembre de 2023.

El cuadro 12 presenta la predicción a 12 meses y su IC del 95% de ppm de flúor en agua potable.

Cuadro 12. Predicción mensual de 1 año de ppm de Fluoruros y sus Intervalos de Confianza del 95% en agua potable en Meoqui, Chih., México.

Mes	ICI	Predicción	ICS
Enero	-3.306	-0.396	2.514
Febrero	-3.308	-0.398	2.512
Marzo	-2.481	0.429	3.339
Abril	-0.187	2.723	5.633
Mayo	-2.153	0.757	3.668
Junio	-2.938	-0.028	2.882
Julio	-1.064	1.847	4.757
Agosto	-2.788	0.122	3.032
Septiembre	-3.326	-0.416	2.494
Octubre	-3.359	-0.449	2.461
Noviembre	-1.359	1.55	4.461
Diciembre	-2.996	-0.086	2.825

La figura 8 presenta (izquierda) el gráfico de la serie temporal y (derecha) el gráfico del pronóstico. Pendiente de Sen=0.00, Mann-Kendal Test $S = -2.33 \times 10^2$, $p < 0.5432$, lo que indica que no existe una pendiente estadísticamente significativa.

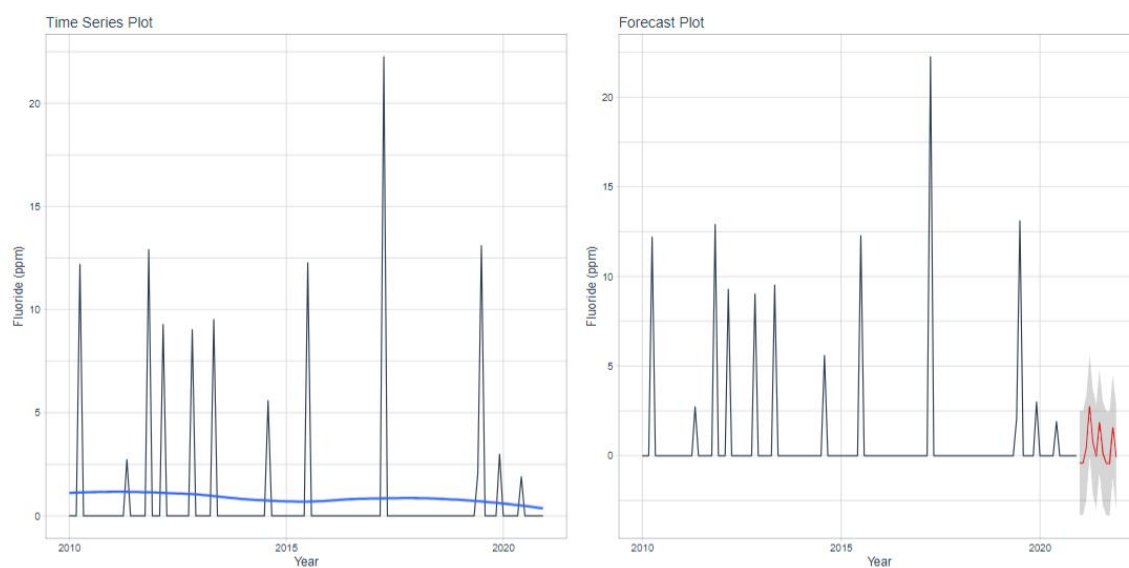


Figura 8. Concentración de fluoruros en ppm en agua en Meoqui, Chihuahua, México, de enero de 2010 a diciembre de 2023. Izquierda: Gráfica de series de tiempo. Derecha: Gráfica de pronóstico.

V. DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio fue evaluar la variabilidad en los pozos que abastecen de agua potable a Meoqui, Chihuahua, en relación con tres de los contaminantes más recurrentes en el agua potable debido a sus reconocidas implicaciones para la salud pública. El As, el Pb y el F son componentes integrales de la estrategia integral que las autoridades competentes están implementando para garantizar la seguridad del agua potable de la comunidad y mitigar cualquier riesgo potencial para los consumidores. El estudio estableció que dicha variabilidad existe y que, en ciertos casos, representa una amenaza real para la salud pública.

El As se ha identificado en la literatura pertinente; este problema constituye un problema de salud pública mundial en relación con las aguas subterráneas, dado que son la principal fuente de agua potable. Además, es crucial reconocer la importancia de las aguas subterráneas como recurso hídrico, dado que más de dos tercios de las fuentes de agua potable en los países en desarrollo provienen de ellas (Thakur & Devi, 2024). Además, el F se encuentra con mayor frecuencia en las aguas subterráneas y se ha convertido en uno de los riesgos ambientales toxicológicos más importantes a nivel mundial. Su presencia en las aguas subterráneas se atribuye a la erosión y lixiviación de minerales fluorados de rocas y sedimentos, como ya documentaron (Burgstahler, 1967) y Jha (2013). En consecuencia, el flúor de fuentes naturales está presente en determinados sistemas hídricos comunitarios, como lo demuestra (K. W. Taylor et al., 2025).

5.1 Concentraciones de arsénico, plomo y flúor.

Se analizaron las concentraciones medias de As, Pb y F durante el período especificado, con resultados de 0,06 ppm para As, 0,001 ppm para Pb y 2,07 ppm para F. Según la norma, los valores máximos permitidos son 0,025 ppm, 0,01 ppm y 1,5 ppm, respectivamente. Respecto a la media, solo el flúor presentó

niveles que superaron la norma establecida. Sin embargo, los valores máximos registrados fueron 0,9 ppm, 0,01 ppm y 5,1 ppm para As, Pb y F, respectivamente. Este hallazgo demuestra que los valores obtenidos para As y F superan los límites permisibles, mientras que, para el plomo, el valor máximo se encuentra ligeramente por debajo del límite superior. Los resultados sugieren un posible efecto tóxico del agua potable debido a los niveles de As y F, que han demostrado causar graves daños a la salud.

En el contexto de las aguas subterráneas, la presencia del As constituye un problema de salud pública mundial debido a que éstas representan una fuente principal de agua potable y siguen siendo un recurso hídrico importante. Como demuestran (Thakur & Devi, 2024), una proporción significativa de las fuentes de agua potable en los países en desarrollo provienen de aguas subterráneas, y los datos indican que más de dos tercios de estas fuentes provienen de aguas subterráneas. Además, el F se encuentra con mayor frecuencia en las aguas subterráneas y se ha convertido en uno de los riesgos ambientales toxicológicos más importantes a nivel mundial. Su presencia en las aguas subterráneas se atribuye a la erosión y lixiviación de minerales fluorados de rocas y sedimentos, como ya documentaron (Burgstahler, 1967) y Jha (2013). En consecuencia, el F de fuentes naturales está presente en ciertos sistemas hídricos comunitarios, como lo demuestra (K. W. Taylor et al., 2025).

5.2 Pozos y niveles de As, Pb y F

En cuanto a la correlación entre el patrón de los pozos y sus niveles de As, cabe destacar que, con excepción de los pozos F-4, F-5 y F-6, en algún momento todos los pozos del sistema presentaron niveles superiores al estándar. Estos pozos son los principales proveedores de agua a la industria cervecera regional. Cabe destacar también que no existen reportes de niveles superiores al estándar en

los años 2010 a 2016 ni en los años 2020, 2022 y 2023, así como que los pozos 6, 5 y 7, F1 y F1 y F2 solo presentaron niveles superiores al estándar en uno de los años del estudio. Finalmente, también se observó una disminución anual en los niveles de arsénico en el agua potable. Para los años 2017, 2018, 2019 y 2021, los niveles promedio fuera de norma se registraron como 0,065, 0,050, 0,052 y 0,044 ppm, respectivamente.

Con respecto a F, al igual que en el caso de los niveles de As en el agua de pozo, todos los pozos, con excepción de F-4, F-5 y F-6, mostraron niveles superiores al estándar en algún momento. Es fundamental reiterar que los pozos designados F-4, F-5 y F-6 abastecen de agua a la industria cervecera de la región. Durante el período especificado (2002 a 2023), no se identificaron informes que excedieran los parámetros normales establecidos. A diferencia del As, en el caso de F, no se observó una tendencia a la disminución de los niveles durante los años con datos anormales. De hecho, se observaron dos picos: uno en 2011 y 2012, y otro en 2015 y 2017.

De acuerdo con los resultados, se evidencia una amenaza latente a la integridad física de las personas, atribuida a los periodos en que las concentraciones de As y F superan los umbrales establecidos por la NOM mexicana. Es importante destacar que ambos contaminantes presentan una alta toxicidad, particularmente cuando se ingieren durante periodos prolongados. (Thakur & Devi, 2024) señalan que se ha demostrado que la ingestión de agua que contiene niveles elevados de arsénico puede provocar el desarrollo de gangrena y lesiones cutáneas o, peor aún, un *corpus* emergente de evidencia sugiere un posible vínculo entre esta práctica y un riesgo elevado de desarrollar cáncer de útero y de hígado a largo plazo, además de diversas complicaciones de salud. Por otra parte, los mismos autores indican que existe evidencia documentada a corto y largo plazo de su propensión a inducir lesiones cutáneas, gastroenteritis, insuficiencia renal y hepática, y gangrena (Thakur & Devi, 2024). El presente estudio aborda la

relevancia de la exposición crónica al arsénico en la afectación de órganos internos en humanos. Entre los diversos órganos internos afectados, se ha encontrado que el hígado es de relevancia significativa. Los hallazgos clínicos reportados incluyeron hepatomegalia, esclerosis hepatoportal, fibrosis hepática y cirrosis hepática. En relación con F, la investigación ha identificado una correlación entre la fluorosis dental, las anomalías esqueléticas y la densidad mineral ósea. Por ejemplo, se encontró que la densidad de la columna lumbar era 112% más alta en adultos afectados por fluorosis dental en comparación con aquellos sin fluorosis dental. Además, el 86,5% de los niños afectados por fluorosis dental avanzada exhibieron indicios de desarrollo esquelético anormal en la muñeca, en comparación con sujetos de control del mismo sexo y edad (Mndez-Estrada, 2025).

Como se mencionó previamente, el Pb no presentó niveles que excedieran el estándar designado. En consecuencia, todos los pozos analizados exhibieron niveles que se ajustaron a la norma oficial. Sin embargo, dada la existencia de registros en el límite permitido por la NOM, es imperativo adherirse a un estricto proceso de monitoreo para evitar la ocurrencia de valores que excedan estos límites y el consiguiente daño al organismo, como se describió previamente. De acuerdo con Hu (2025), es imperativo enfatizar que la exposición perinatal al Pb ejerce una influencia sustancial en el comportamiento reproductivo masculino. Este fenómeno puede estar asociado con una reducción en las concentraciones de hormonas sexuales, así como en el número de células que expresan sus receptores y en la población neuronal teñida con Nissl. Esta situación tiene un efecto perjudicial en la calidad de vida del individuo.

5.3 El mejor modelo para predecir los niveles de As, Pb y F en el agua subterránea de Meoqui.

El modelo más adecuado para todos los elementos analizados en el agua de pozo de Meoqui, Chihuahua, fue Prophet, lo cual coincide con los resultados obtenidos por (Ahmed et al., 2020); Armouti (2025) y Grekov (2024), aunque difiere de los resultados reportados por otros autores, quienes mencionan ARIMA-LSTM Grekov (2024) y XGBoost según Bonkounoou (2024) como los modelos predictivos más efectivos. Si bien Prophet se considera generalmente el modelo estándar para medir los niveles de agua subterránea y sus compuestos, las discrepancias entre los autores respecto a la opción óptima para el pronóstico sugieren que se requieren más pruebas para asegurar la eficiencia predictiva de los modelos.

El modelo Prophet genera gráficos de pronóstico que describen los niveles de los tres contaminantes, que se proyecta se mantendrán por debajo de los niveles permisibles de la NOM-127-SSA1 para el año siguiente. Este hallazgo sugiere que las actividades correctivas y preventivas de monitoreo del agua de pozo que llevan a cabo los administradores de recursos se están llevando a cabo de manera efectiva.

VI. CONCLUSIONES

El sujeto de este estudio es el agua potable de la ciudad de Meoqui en el estado de Chihuahua, México. Esta localidad, ubicada en el desierto chihuahuense, en la zona centro-norte del país, ha experimentado, entre 2010 y 2023, episodios de concentraciones de As y F superiores a los niveles regulados oficialmente. Estos episodios podrían representar desafíos para los consumidores del agua potable.

Los niveles de As y F han disminuido en los últimos años, lo que podría estar relacionado con las medidas correctivas implementadas por las autoridades encargadas de la gestión del agua. Esta hipótesis puede extenderse a los niveles de Pb, que no han superado el límite establecido por la NOM-127-SSA1-1994 modificación 2000.

Las proyecciones para las próximas décadas sugieren que los niveles de As, Pb y F se mantendrán por debajo del umbral máximo establecido por la Norma Oficial Mexicana para estos contaminantes.

El modelo que ha proporcionado las predicciones más precisas de las concentraciones de As, Pb y F en el agua subterránea de Meoqui es Facebook Prophet. Este modelo debería considerarse en futuros estudios de análisis del agua en la región.

VII. REFERENCIAS

- Agaj, T., Budka, A., Janicka, E., & Bytyqi, V. (2024). Using ARIMA and ETS models for forecasting water level changes for sustainable environmental management. *Scientific Reports*, 14(1), 22444. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73405-9>
- Ahmed, A., Ghosh, P. K., Hasan, M., & Rahman, A. (2020). Surface and groundwater quality assessment and identification of hydrochemical characteristics of a south-western coastal area of Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8227-0>
- Anand, B., Karunanidhi, D., Subramani, T., Srinivasamoorthy, K., & Suresh, M. (2020). Long-term trend detection and spatiotemporal analysis of groundwater levels using GIS techniques in Lower Bhavani River basin, Tamil Nadu, India. *Environment, Development and Sustainability*, 22, 2779–2800. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00318-3>
- Aquil, M. A. I., & Ishak, W. H. W. (2023). Comparison of Machine Learning Models in Forecasting Reservoir Water Level. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 31(3), 137–144. <https://doi.org/10.37934/araset.31.3.137144>
- Barth, M. (2025). *tinylabls: Lightweight variable labels*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.tinylabls>
- Bozorg-Haddad, O., Delpasand, M., & Loáiciga, H. A. (2021). 10 - Water quality, hygiene, and health. In O. Bozorg-Haddad (Ed.), *Economical, Political, and Social Issues in Water Resources* (pp. 217–257). Elsevier. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90567-1.00008-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90567-1.00008-5)
- Burgstahler, A. W. (1967). Fluorides in drinking water [2]. In A. K. Sharma (Ed.), *Chemical and Engineering News* (Vol. 45, Issue 49, p. 7). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-77247-4_14#citeas
- Couch, S. P., Bray, A. P., Ismay, C., Chasnovski, E., Baumer, B. S., & Çetinkaya-Rundel, M. (2021). infer: An R package for tidyverse-friendly statistical inference. *Journal of Open Source Software*, 6(65), 3661. <https://doi.org/https://doi.org/10.21105/joss.03661>
- da Silva, A. C., das Graças Braga da Silva, F., de Mello Valério, V. E., Silva, A. T. Y. L., Marques, S. M., & Reis, J. A. T. Dos. (2024). Application of data prediction models in a real water supply network: comparison between arima and artificial neural networks. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230057>
- Dancho, M. (2024). *modeltime: The Tidymodels Extension for Time Series Modeling*.
- Dancho, M., & Vaughan, D. (2023). *timetk: A Tool Kit for Working with Time Series*.

- Dinerstein, E., Olson, D., Atchley, J., Loucks, C., Contreras-Balderas, S., Abell, R., Iñigo-Elias, E., Enkerlin, E., Williams, C., & Castilleja, G. (2001). *Ecoregion-based Conservation in the Chihuahuan Desert: a Biological Assessment*.
- Frick, H., Chow, F., Kuhn, M., Mahoney, M., Silge, J., & Wickham, H. (2024). *rsample: General Resampling Infrastructure*.
- Grolemund, G., & Wickham, H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3), 1–25. <https://www.jstatsoft.org/v40/i03/>
- Herrera-González, J. L., Rodríguez-Venegas, R., Legarreta-González, M. A., Robles-Trillo, P. A., De-Santiago-Miramontes, Á., Loya-González, D., & Rodríguez-Martínez, R. (2024). Time series (ARIMA) as a tool to predict the temperature-humidity index in the dairy region of the northern desert of Mexico. *PeerJ*, 12, e18744. <https://doi.org/10.7717/peerj.18744>
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020: Principales Resultados por Localidad ITER. 3a edición*.
- Jaya, N. A., Arsyad, M., & Palloan, P. (2024). View of Estimation of Groundwater River Availability in Leang Lonrong Cave Using ARIMA Model and Eco. 2, 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.46799/adv.v2i5.240>
- Jomova, K., Alomar, S. Y., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2024). Heavy metals: toxicity and human health effects. In *Archives of Toxicology* (Vol. 99, Issue 1). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s00204-024-03903-2>
- Kuhn, M. (2024a). *modeldata: Data Sets Useful for Modeling Examples*.
- Kuhn, M. (2024b). *tune: Tidy Tuning Tools*.
- Kuhn, M., & Couch, S. (2024). *workflowsets: Create a Collection of “tidymodels” Workflows*.
- Kuhn, M., & Frick, H. (2024). *dials: Tools for Creating Tuning Parameter Values*.
- Kuhn, M., & Vaughan, D. (2024). *parsnip: A Common API to Modeling and Analysis Functions*.
- Kuhn, M., Vaughan, D., & Hvitfeldt, E. (2024). *yardstick: Tidy Characterizations of Model Performance*.
- Kuhn, M., Wickham, H., & Hvitfeldt, E. (2024). *recipes: Preprocessing and Feature Engineering Steps for Modeling*.
- Kumar, D. V. N., Mohan, M. R., Krishnaiah, C. V., Prasad, G. L. N., Sreedevi, B., & Naik, R. M. S. (2024). TOXICOLOGICAL EFFECTS OF LEAD ON HUMAN HEALTH: A COMPREHENSIVE REVIEW. *Journal of Experimental Zoology India*, 27(2), 1583–1588. <https://doi.org/10.51470/jez.2024.27.2.1583>
- Legarreta-González, M. A., Meza-Herrera, C. A., Rodríguez-Martínez, R., Loya-González, D., Chávez-Tiznado, C. S., Contreras-Villarreal, V., & Véliz-Deras, F. G. (2024a). Selecting a Time-Series Model to Predict Drinking Water Extraction in a Semi-Arid Region in Chihuahua, Mexico. *Sustainability*, 16(22), 9722. <https://doi.org/10.3390/su16229722>

- Legarreta-González, M. A., Meza-Herrera, C. A., Rodríguez-Martínez, R., Loya-González, D., Chávez-Tiznado, C. S., Contreras-Villarreal, V., & Véliz-Deras, F. G. (2024b). Selecting a Time-Series Model to Predict Drinking Water Extraction in a Semi-Arid Region in Chihuahua, Mexico. *Sustainability*, 16(22), 9722. <https://doi.org/10.3390/su16229722>
- Miltner, R. (2024). Applying water quality standards to pollution from diffuse sources. *Journal of Environmental Management*, 351, 119816. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119816>
- Müller, K., & Wickham, H. (2023). *tibble: Simple Data Frames*.
- Patle, G. T., Singh, D. K., Sarangi, A., Rai, A., Khanna, M., & Sahoo, R. N. (2015). Time series analysis of groundwater levels and projection of future trend. *Journal of the Geological Society of India*, 85, 232–242. <https://doi.org/10.1007/s12594-015-0209-4>
- Pohlert, T. (2023). *trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.trend>
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.R-project.org/>
- Raj, K., & Das, A. P. (2023). Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 79–85. <https://doi.org/10.1016/J.ENCECO.2023.02.001>
- Robinson, D., Hayes, A., & Couch, S. (2024). *broom: Convert Statistical Objects into Tidy Tibbles*.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Taylor, K. W., Eftim, S. E., Sibrizzi, C. A., Blain, R. B., Magnuson, K., Hartman, P. A., Rooney, A. A., & Bucher, J. R. (2025). Fluoride Exposure and Children's IQ Scores: A Systematic Review and Meta-Analysis. *JAMA Pediatrics*, 27719(3), 282–292. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2024.5542>
- Taylor, S. J., & Letham, B. (2018). Forecasting at scale. *The American Statistician*, 72(1), 37–45. <https://doi.org/10.1080/00031305.2017.1380080>
- Thakur, A., & Devi, P. (2024). A Comprehensive Review on Water Quality Monitoring Devices: Materials Advances, Current Status, and Future Perspective. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(2), 193–218. <https://doi.org/10.1080/10408347.2022.2070838>
- Vaughan, D., & Couch, S. (2024). *workflows: Modeling Workflows*.
- Walker, S. J. (1977). What is a "Heavy Metal" machine? *Journal of Chemical Education*, 74(11), 1374. <https://doi.org/https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ed074p1374>
- Wickham, H. (2007). Reshaping Data with the reshape Package. *Journal of Statistical Software*, 21(12), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.18637/jss.v021.i12>

- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
- Wickham, H. (2023). *stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations*.
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*.
- Wickham, H., & Henry, L. (2023). *purrr: Functional Programming Tools*.
- Wickham, H., Hester, J., & Bryan, J. (2024). *readr: Read Rectangular Text Data*.
- Wickham, H., Pedersen, T. L., & Seidel, D. (2023). *scales: Scale Functions for Visualization*.
- Wickham, H., Vaughan, D., & Girlich, M. (2024). *tidyr: Tidy Messy Data*.
- Xu, J. (2024). Forecasting Water Demand With the Long Short-Term Memory Deep Learning Mode. *International Journal of Information Technologies and Systems Approach*, 17(1), 1–18. <https://doi.org/10.4018/ijitsa.338910>