



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS
NATURALES

CARRERA DE AGRONOMÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA
EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO
AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA
DE COTOPAXI 2025-2026”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título de
Ingenieras Agrónomas

Autoras:

Fonseca Santos Mercedes Anahi
González Sánchez Fernanda Lizbeth

Tutora:

Tapia Borja Alexandra Isabel

LATACUNGA-ECUADOR

Marzo – 2026

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Fonseca Santos Mercedes Anahi, con cédula de ciudadanía No. 0504804592 y González Sánchez Fernanda Lizbeth, con cédula de ciudadanía No. 0504372277, declaramos ser autoras del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”** Siendo la Ingeniera Mg. Alexandra Isabel Tapia Borja, Tutora del presente trabajo; y, eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 23 de febrero del 2025

Mercedes Anahi Fonseca Santos

C.C: 0504804592

ESTUDIANTE

Fernanda Lizbeth González Sánchez

C.C: 0504372277

ESTUDIANTE

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **FONSECA SANTOS MERCEDES ANAHI**, identificada con cédula de ciudadanía **0504804592** de estado civil soltera, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Agronomía, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”** la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. Alexandra Isabel Tapia Borja, Mg.

Tema: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de febrero del 2026.

Mercedes Anahi Fonseca Santos
LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de una parte **GONZÁLEZ SÁNCHEZ FERNANDA LIZBETH**, identificada con cédula de ciudadanía **0504372277** de estado civil casada, a quien en lo sucesivo se denominará **LA CEDENTE**; y, de otra parte, la Doctora Idalia Eleonora Pacheco Tigselema, en calidad de Rectora, y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez, Barrio El Ejido, Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA. - **LA CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Agronomía, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”** la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad; y, las características que a continuación se detallan:

Historial Académico

Inicio de la carrera: Octubre 2021 – Marzo 2022

Finalización de la carrera: Octubre 2025 – Marzo 2026

Tutor: Ing. Alexandra Isabel Tapia Borja, Mg.

Tema **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”**

CLÁUSULA SEGUNDA. - **LA CESIONARIA** es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA. - Por el presente contrato, **LA CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA. - OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA CEDENTE**, transfiere definitivamente a **LA CESIONARIA** y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio institucional que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- e) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA. - El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LA CEDENTE** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA. - El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA. - CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD. - Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA. - LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS. - **LA CESIONARIA** podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA. - El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en la cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA. - En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA. - Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, a los 23 días del mes de febrero del 2026.

Fernanda Lizbeth González Sánchez
LA CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.
LA CESIONARIA

AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Tutora del Proyecto de Investigación con el título:

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”, de Fonseca Santos Mercedes Anahi y González Sánchez Fernanda Lizbeth, de la carrera de Agronomía, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también han incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la Pre defensa.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Ing. Alexandra Isabel Tapia Borja, Mg.

C.C: 0502661754

DOCENTE TUTORA

AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprobamos el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi; y, por la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; por cuanto, los postulantes: Fonseca Santos Mercedes Anahi y González Sánchez Fernanda Lizbeth, con el título de Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del trabajo de titulación.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, 23 de febrero del 2026

Ing. Wilman Paolo Chasi, Mg.
C.C: 0502409725
LECTOR 1 (PRESIDENTE)

Ing. Diana Elizabeth Toapanta Gallegos, Mg.
C.C: 1002749800
LECTOR 2 (MIEMBRO)

Ing. Mercy Lucila Ilbay Yupa, Ph.D.
C.C: 0604147900
LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a dios y a mi señor de Panzaleo por las bendiciones recibidas hacia mí y mi familia, por la salud y la vida, por ayudarme a culminar una de las muchas metas que tengo en mi vida. Agradecerles a mis padres por ser mi motor de apoyo y por su amor incondicional, por el esfuerzo que hicieron para que yo pudiera alcanzar mi meta de convertirme en profesional, por sus palabras de aliento en los momentos difíciles, a mi hermana por brindarme su apoyo, a mi abuelita y tío por su tiempo y apoyarme en los momentos que los necesitaba.

Agradezco a la Universidad Técnica de Cotopaxi, por abrirme las puertas para formarme profesionalmente, a los docentes de la carrera de Agronomía, quienes han compartido sus conocimientos, a mi tutora de tesis Mg. Alexandra Tapia, gracias por ser la guía, el apoyo infinito de este trabajo, por su paciencia, sus consejos y por compartir sus conocimientos con dedicación sin ella este trabajo no sería posible.

A mi mejor amigo, por no dejarme sola en los momentos difíciles, por escucharme y sus palabras de apoyó, los ánimos y la paciencia que me brindaba.

A mi compañera y amiga de tesis Fernanda por su paciencia, colaboración, comprensión, apoyo incondicional y por formar parte de este paso importante para culminar la carrera universitaria.

Mercedes Anahi Fonseca Santos

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, doy gracias a Dios y a la Virgencita del Cisne por permitirme culminar esta etapa de formación profesional y brindarme la fortaleza necesaria para afrontar cada desafío durante el desarrollo de este trabajo de titulación. Expreso un profundo agradecimiento hacia mi familia por estar presente en cada momento, incluso a pesar de la distancia. Agradezco especialmente a mi esposo Julio, por su amor incondicional y apoyo constante a lo largo de este camino, dedico también estas palabras para mi hijo Liam, quien es mi mayor inspiración y motor para seguir superándome cada día más, reconozco con cariño a mi madre Carmen, por su sacrificio y apoyo incondicional en mis estudios, entrega y ejemplo de vida a seguir. A la estrella más bonita del cielo, a la luz que me guía y me cuida siempre y expreso gratitud a mi madrina Mariana, por su afecto sincero y respaldo permanente en cada etapa de mi vida. Sin ustedes, este logro no habría sido posible su apoyo ha sido la luz que guio mi trayectoria durante este proceso académico. Mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a la carrera de Agronómica por los conocimientos impartidos y el acompañamiento académico brindado a lo largo de mi formación y de manera especial, agradezco a mi tutora de tesis la Ing. Alexandra Tapia por brindarme la orientación necesaria, los consejos, la paciencia y su sabiduría que hicieron posible la realización de este trabajo investigativo. Finalmente, a mi compañera, amiga de tesis Anahí, por su amistad sincera, su paciencia y por acompañarme en cada momento de mí de mi vida académica.

Fernanda Lizbeth González Sánchez

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi señor de Panzaleo y a mi Virgencita por darme la vida, la sabiduría y la fortaleza para alcanzar esta meta. A mis padres Alfredo y Sara, por sus palabras de motivación, paciencia, esfuerzo, por hacerme una persona de bien sin su ayuda en este trabajo no seria posible, a mi abuelita Diocelina, a mi tío Isaías y a mi hermana Nathy por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante cada etapa de mi formación. Este logro también es de ustedes, porque siempre creyeron en mí y me impulsaron a seguir adelante.

Mercedes Anahi Fonseca Santos

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se la dedico a mi virgencita del Cisne, a la estrella más linda del cielo quien ha sido mi mayor inspiración y la luz de mi vida. Al hombre que ha sido mi pilar fundamental que hizo posible este logro, mi compañero de vida quien me ayudado a superar cada obstáculo del camino mi esposo Julio, al motor de mi vida a mi amor chiquito mi hijo Liam quien me guía a prepararme cada día más. A la mujer más valiente y trabajadora que me enseñó a enfrentarme a la vida con valor y sabiduría mi madre Carmen. A la persona que a pesar de la distancia siempre estuvo presente con palabras de amor y comprensión, la que siempre está en cada momento importante de mi vida y siempre ha velado por mi bienestar mi madrina Mariana.

Fernanda Lizbeth González Sánchez

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TÍTULO: “EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN FILTRO MULTICAPA EN LA RETENCIÓN DE ARSÉNICO EN EL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN LA JUNTA DE TILICHE SAN JOSÉ PROVINCIA DE COTOPAXI 2025-2026”

Autoras:

Mercedes Anahi Fonseca Santos
Fernanda Lizbeth González Sánchez

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de un sistema de filtración multicapa para la remoción de arsénico presente en agua de riego proveniente de la Junta de Tiliche San José, con el fin de mejorar su calidad y reducir los posibles impactos ambientales y riesgos de su uso en actividades agrícolas. La metodología experimental se desarrolló mediante ensayos en laboratorio y validación en condiciones reales de campo, se recolectaron 30 muestras de agua de riego para la determinación de parámetros fisicoquímicos antes y después del tratamiento con el sistema de filtración de lecho fijo, el mismo que fue diseñado utilizando materiales adsorbentes con el propósito de optimizar la retención de arsénico disuelto en el agua. La capacidad de adsorción del medio filtrante fue evaluada mediante la aplicación del modelo de isoterma de Langmuir, lo que permitió estimar la cantidad máxima de arsénico retenida por unidad de masa del adsorbente. Adicionalmente, se realizó un análisis de costo-beneficio para determinar la viabilidad técnica y económica del sistema bajo condiciones reales de operación, los resultados obtenidos evidenciaron que el filtro de 10 capas alcanzó una eficiencia de remoción del 88% de arsénico en las muestras tratadas, reduciendo su concentración a valores cercanos al límite máximo permisible ($<0,01$ mg/L), se determinó una capacidad máxima de adsorción de 25,98 mg/g, con un coeficiente de correlación ($R^2 = 0,999$), lo que indica un alto grado de ajuste al modelo de adsorción de Langmuir y confirma la eficiencia del proceso de remoción. En conclusión, el sistema de filtración multicapa representa una alternativa técnicamente viable para el tratamiento de agua de riego contaminada con arsénico, contribuyendo a la mejora de su calidad y a la disminución de riesgos asociados a su uso, aunque su sostenibilidad a largo plazo dependerá de la optimización de los costos de operación y mantenimiento.

Palabras claves: Arsénico, filtración multicapa, adsorción, agua de riego, isoterma de Langmuir, remoción

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS

THEME: “EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A MULTILAYER FILTER IN RETAINING ARSENIC IN WATER USED FOR AGRICULTURAL PURPOSES IN THE TILICHE SAN JOSÉ DISTRICT, COTOPAXI PROVINCE, 2025-2026.”

Authors:

Mercedes Anahi Fonseca Santos
Fernanda Lizbeth González Sánchez

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the efficiency of a multilayer filtration system for removing arsenic from irrigation water from the Tiliche San José Board, in order to improve its quality and reduce the potential environmental impacts and risks of its use in agricultural activities. The experimental methodology was developed through laboratory tests and validation under real field conditions. Thirty irrigation water samples were collected to determine physicochemical parameters before and after treatment with the fixed-bed filtration system, which was designed using adsorbent materials to optimize the retention of arsenic dissolved in the water. The adsorption capacity of the filter medium was evaluated by applying the Langmuir isotherm model, which allowed the maximum amount of arsenic retained per unit mass of adsorbent to be estimated. In addition, a cost-benefit analysis was performed to determine the technical and economic viability of the system under actual operating conditions. The results showed that the 10-layer filter achieved an 88% removal efficiency of arsenic in the treated samples, reducing its concentration to values close to the maximum permissible limit (<0.01 mg/L). A maximum adsorption capacity of 25.98 mg/g was determined, with a correlation coefficient ($R^2 = 0.999$), indicating a high degree of fit to the Langmuir adsorption model and confirming the efficiency of the removal process. In conclusion, the multilayer filtration system represents a technically viable alternative for the treatment of arsenic-contaminated irrigation water, contributing to the improvement of its quality and the reduction of risks associated with its use, although its long-term sustainability will depend on the optimization of operating and maintenance costs.

KEYWORDS: Arsenic, Multilayer filtration, Adsorption, Irrigation water, Langmuir isotherm, Removal

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	v
AVAL DE LA TUTORA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	vii
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	viii
AGRADECIMIENTO	ix
AGRADECIMIENTO	x
DEDICATORIA.....	xi
DEDICATORIA.....	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. Justificación.....	3
3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	3
3.1 Beneficiarios directo	3
3.2 Beneficiarios indirectos	4
4. Problemática.....	4
5. Objetivos	5
5.1 Objetivo General.....	5
5.2 Objetivo específico	5
6. ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANEADOS	6
7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA	8
7.1 Arsénico	8
7.2 Efectos en la agricultura en el agua de riego por metales pesados	8
7.3 Calidad del Agua de riego.....	9
7.4 Integración del arsénico	9
7.5 Parámetros de agua de riego	9
7.5.1 Arsénico	9
7.5.2 El pH del Agua de Riego.....	10
7.5.3 Sólidos totales disueltos TDS.....	10

7.5.4 Conductividad Eléctrica (CE)	10
7.5.5 Potencial redox	11
7.5.6 Materia orgánica.....	11
7.5.7 Hierro (FE)	11
7.5.8 Fosfatos (PO_4^{3-}).....	11
8. Filtro multicapa	12
9. Materiales filtrantes.....	12
9.1 Piedra Caliza	12
9.2 Zeolita	12
9.3 Tela filtrante.....	13
10. Tipos de medios filtrantes	13
10.1 Biológico.....	13
10.2 Mecánico.....	13
10.3 Químico	13
11. PREGUNTA CIENTÍFICA.....	14
12. METODOLOGÍA.....	14
12.1 Área de estudio	14
12.2 Recolección de muestras de agua de riego	15
12.2.1 Preparación del material.....	15
12.2.2 Procedimiento de muestreo	15
12.2.3 Conservación y Transporte.....	16
12.2.4 Parámetros físico-químicos iniciales de agua	16
12.2.5 Recuperación del material filtrante	18
12.2.6 Lavado del filtro	18
12.2.6 Montaje del filtro multicapas en laboratorio	19
12.2.7 Implementación del filtro multicapa	19
12.2.8 Diseño del filtro implementado en campo	20
12.2.9 Distribución del medio filtrante por capa.....	21
12.2.10 Materiales para implementar el filtro en campo.....	21
12.2.11 Procedimiento para la elaboración del filtro multicapa	22
12.2.13 Cálculo de la retención	25
12.2.14 Tiempo de eficiencia de adsorción.....	26
12.2.15 Isoterma de Langmuir	27

12.2.16	Tiempo eficiencia de remoción	28
12.2.17	Cálculo para el caudal	28
12.2.18	Costos y beneficios.....	28
13.	Tipos de investigación	28
13.1	Investigación bibliografía	28
13.2	Investigación de campo	29
13.3	Investigación científica	29
14.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
14.1	Parámetros previos de antes y después al cálculo de agua	29
14.2	Análisis del filtro – Laboratorio.....	39
14.3	Retención del filtro multicapa.....	40
14.4	Correlaciones	42
14.5.	Costos y beneficios del filtro multicapa.....	44
15.	Conclusiones.....	47
16.	Recomendaciones	48
17.	Bibliografía.....	49
18.	Anexos.....	¡Error! Marcador no definido.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Actividades y sistema de tareas de acuerdo a los objetivos.	6
Tabla 2.	Características del área de estudio.....	15
Tabla 3.	Parámetros a evaluar.....	16
Tabla 4.	Materiales filtrantes en <i>cm</i> ³	20
Tabla 5.	Distribución de los medios filtrantes.....	21
Tabla 6.	Composición Química.....	23
Tabla 7.	Análisis Estadístico Descriptivo Comparativo de Arsénico con materiales reutilizados.	39
Tabla 8.	Correlaciones de todos los parámetros.....	43
Tabla 9.	Costos de campo y laboratorio.....	45
Tabla 10.	Análisis de costos y beneficios del filtro multicapa.....	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación del área de estudio.....	14
-----------	------------------------------------	----

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Del antes y después al cálculo de agua.....	38
Gráfico 2. Retención de los materiales nuevos y reutilizados.....	41
Gráfico 3. De los días de lavado.....	42
Gráfico 4. Ajuste del Isoterma de Langmuir.	44

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

“Evaluación de la eficiencia de un filtro multicapa en la retención de arsénico en el agua de uso agrícola en la junta de Tiliche San José Provincia de Cotopaxi 2025-2026.”

Fecha de inicio:

Octubre 2025

Fecha de finalización:

Mayo 2025

Lugar de ejecución

Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, parroquia Tanicuchi dentro de la Junta de Agua de Riego Tiliche San José.

Facultad que auspicia

Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia:

Carrera de Agronomía

Equipo de Trabajo:

Tutora: Ing. Alexandra Isabel Tapia Borja, Mg.

Estudiante: Fonseca Santos Mercedes Anahi

Estudiante: González Sánchez Fernanda Lizbeth

Coordinador del Proyecto:

Nombre: Fonseca Santos Mercedes Anahi

Teléfono: 0995062775

Correo electrónico: mercedes.fonseca4592@utc.edu.ec

Nombre: González Sánchez Fernanda Lizbeth

Teléfono: 0968452905

Correo electrónico: fernanda.gonzalez2277@utc.edu.ec

Área de Conocimiento:

Agricultura, Silvicultura, Pesca y veterinaria.

Línea de investigación:

Procesos tecnológicos, bioquímica, biomateriales, desarrollo y seguridad alimentaria.

Línea de vinculación de la carrera:

Tecnologías para la agricultura, Agua y Suelos.

2. JUSTIFICACIÓN

La presencia de arsénico en fuentes de agua constituye uno de los principales problemas ambientales y de salud pública a nivel mundial. Este metaloide, presente de forma natural en suelos y rocas, puede liberarse al agua subterránea mediante procesos geológicos como la meteorización y disolución de minerales, o por actividades antrópicas tales como la minería, el uso de pesticidas, la combustión de combustibles fósiles y descargas industriales (Hug et al., 2020).

La Junta agua de riego Tiliche San José ubicada en la provincia de Cotopaxi, parroquia Tanicuchi perteneciente al cantón Latacunga, es una organización formada por 55 productores agrícolas, la principal fuente de agua para riego que proviene del complejo volcánico Ilinizas, donde se han llevado a cabo estudios previos que evidenciaron la presencia de arsénico en concentraciones 3.54 mg/l en el ramal 1 superando la normativa del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente TULSMA (Naula Lema, 2024).

La implementación de tecnologías de tratamiento sostenibles, de bajo costo y fácil operación, es fundamental en comunidades rurales con recursos limitados. Entre estas alternativas, el filtro multicapa compuestos por materiales como tela, piedra caliza, y zeolita han mostrado una notable eficiencia en la adsorción y retención del arsénico (Bolisetty & Jimenez, s.f.) . Su aplicación en sistemas de tratamiento descentralizados representa una solución viable y replicable para la gestión del recurso hídrico.

En función de lo expuesto, la presente investigación se planteó con el propósito de evaluar la eficiencia del filtro multicapa diseñado específicamente para las condiciones locales de la junta de Tiliche San José, considerando la composición físico-química del agua. Los resultados permitirán determinar la capacidad de remoción de arsénico del sistema, optimizar los parámetros de operación y generar un modelo de tratamiento adaptable a otras comunidades rurales con problemáticas similares.

3. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

3.1 Beneficiarios directo

El presente trabajo investigativo beneficiará a los estudiantes y miembros de la universidad y los productores agropecuarios de la Junta de Agua de Riego Tiliche San José.

3.2 Beneficiarios indirectos

Los productores de la parroquia de Tanicuchi.

4. Problemática

Este proyecto es una continuación de la investigación sobre recursos hídricos liderada por la Dra. Mercy Ilbay. La contaminación del agua por arsénico es un problema ambiental y de salud pública de impacto global. La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la exposición prolongada a este metaloide a través del agua de riego puede causar enfermedades cardiovasculares y daños en el sistema nervioso central (OMS, 2019). En muchas regiones del mundo, especialmente en Asia y América Latina, los niveles de arsénico en aguas subterráneas superan los límites recomendados de 10 µg/L, lo que pone en riesgo la salud de millones de personas (Smedley & Kinniburgh, 2002). Países como Bangladesh, India y Argentina han experimentado crisis sanitarias debido a la exposición prolongada al arsénico, lo que ha llevado a la implementación de diversas estrategias de mitigación y tratamiento del agua. El control del arsénico en el agua es fundamental en la agronomía para proteger la salud de las plantas, los animales y los seres humanos. Esto requiere un monitoreo regular y la implementación de tecnologías y prácticas sostenibles para reducir la exposición a este elemento (Rahman et al., 2019).

En América Latina, la contaminación por arsénico afecta a comunidades rurales en países como México, Chile, Perú y Argentina, donde los suelos volcánicos y la actividad minera han contribuido a la presencia de este elemento en fuentes de agua subterráneas (Bundschuh et al., 2012). La falta de acceso a sistemas de tratamiento eficientes y económicos ha agravado la crisis, especialmente en comunidades agrícolas que dependen del agua para el riego de cultivos y el consumo humano. Investigaciones realizadas en la región han demostrado que la acumulación de arsénico en el suelo y los productos agrícolas puede afectar la seguridad alimentaria y la comercialización del producto (Alcocer Zuñiga et al., 2024).

En la Provincia de Cotopaxi, Cantón Latacunga, Parroquia Rural de Tanicuchi, se encuentra la Junta de Agua de Riego Tiliche San José, en este sector de donde la bocatoma de agua proviene del complejo volcánico Los Ilinizas donde se ha evidenciado la presencia de arsénico. De acuerdo a Mise (2024) en la Junta Tiliche San José existe presencia de arsénico en el agua de riego en los puntos de muestreados con estos resultados: bocatoma de 2.77 mg/L; en el ramal 1 de 3.54 mg/l y en el reservorio de 1.41 mg/L, estas cifras son extremadamente superiores a la

normativa del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA, 2012), donde los criterios de calidad de aguas de uso agrícola o de riego para Arsénico es de 0.1 mg/l,

La contaminación del agua con arsénico ha generado diversos impactos negativos en las comunidades agrícolas, afectando tanto a la población como a los sistemas productivos. En los cultivos, la absorción de arsénico y otros contaminantes presentes en el agua de riego se ha asociado con la aparición de clorosis foliar, manifestada como un amarillamiento de las hojas, lo que indica alteraciones fisiológicas y nutricionales en las plantas. Adicionalmente, el carácter ácido del agua de riego puede provocar estrés químico en los cultivos, causando daños en tejidos vegetales, reducción del crecimiento y, en casos severos, la pérdida parcial o total de la producción agrícola . (Córdova Cunalata & Molina Jácome, 2022).

5. Objetivos

5.1 Objetivo General

Analizar la capacidad de retención, estabilidad y durabilidad en condiciones reales de operación del filtro multicapa.

5.2 Objetivo específico

- Determinar la capacidad de retención de arsénico del filtro multicapa, mediante ensayos de laboratorio y campo con muestras de agua de la Junta de Tiliche San José.
- Identificar la correlación de la concentración de arsénico con parámetros físicos químicos en el agua.
- Evaluar la capacidad de adsorción de arsénico del material filtrante multicapa mediante la isoterma de Langmuir.
- Realizar el costo-beneficio del filtro en función de su durabilidad y eficiencia a largo plazo.

6. ACTIVIDADES Y SISTEMAS DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANEADOS

Tabla 1. Actividades y sistema de tareas de acuerdo a los objetivos.

Objetivo	Actividades	Metodología	Resultados
Específico 1			
Determinar la capacidad de retención de arsénico del filtro multicapa, mediante ensayos de laboratorio y campo con muestras de agua de la Junta de Tiliche San José.	<ul style="list-style-type: none"> -Revisión bibliográfica sobre la remoción de arsénico. -Selección del área de estudio. -Planificación de frecuencia del Muestreo de agua en la Parcela. - Elaboración del filtro multicapa -Enviar las muestras al laboratorio 	<ul style="list-style-type: none"> -Recolección de muestras en el punto mencionado (parcela) para realizar dos repeticiones. - Determinación de arsénico total mediante análisis en laboratorio; medición de pH, potencial redox y conductividad eléctrica con equipo multiparámetros. - Clasificar los resultados por concentraciones 	<ul style="list-style-type: none"> -Determinación de las concentraciones de arsénico (mg/L) antes y después de la aplicación del filtro multicapa, con el fin de evaluar su capacidad de retención. - Gráficas. Identificar (arsénico total, PH, potencial redox, conductividad, hierro, sulfato, fosfato, materia orgánica).
Específico 2			
Identificar la correlación de la concentración de	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis estadístico de correlación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinación de las condiciones 	<ul style="list-style-type: none"> - Grafica - Tablas

arsénico con parámetros físicos químicos en el agua.	- Interpretación de resultados. - Comparación con estudios previos y normativa. - Medición de parámetros fisicoquímicos	iniciales y finales del Arsénico. - Análisis de los resultados de laboratorio. - Modelo de Langmuir.
--	---	--

Objetivo Especifico 3	Actividades	Metodología	Resultados
Evaluar la capacidad de adsorción de arsénico del material filtrante multicapa mediante la isoterma de Langmuir.	-Revisión bibliográfica. -Recolección de muestras. -Enviar muestras al laboratorio. - Libro de campo	Aplicación de ensayos de adsorción en condiciones controladas para determinar la capacidad de remoción de arsénico del material filtrante multicapa, mediante la medición de concentraciones iniciales y de equilibrio, y el ajuste de los datos experimentales al modelo de la isoterma de Langmuir.	- Determinación de la capacidad máxima de adsorción de arsénico (q_{max}) y de la constante de Langmuir (K_L), así como la evaluación del grado de ajuste del modelo mediante el coeficiente de determinación (R^2).

Objetivo Especifico 4	Actividades	Metodología	Resultados
Realizar el costo-beneficio del filtro en función de su durabilidad y eficiencia a largo plazo.	Recopilar los costos de materiales que se utilizó para armar el filtro.	Medir pérdida de eficiencia del filtro, los desgastes de los materiales y asociar tiempos de falla a costos de reemplazo, mantenimiento.	Cálculo de la relación costo-beneficio en función de su vida útil y rendimiento.

Elaborado por: (Fonseca & Gonzalez, s.f.)

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA TÉCNICA

7.1 Arsénico

El arsénico es un oligoelemento tóxico que representa una gran preocupación ambiental debido a su presencia en el suelo, el agua, las plantas, los animales y los seres humanos. El arsénico facilita su entrada al sistema suelo y planta ya sea de forma natural mediante la meteorización de rocas y minerales arsénicos y el uso de aguas subterráneas contaminadas con arsénico (Kumari et al., 2021) también pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas pasar a la atmósfera por volatilización y movilizarse hacia el agua superficial o subterránea (Mancilla-Villa et al., 2012).

7.2 Efectos en la agricultura en el agua de riego por metales pesados

El agua de riego con metales pesados perjudica la actividad agrícola al inhibir el crecimiento de las plantas al competir con nutrientes esenciales y acumularse en los cultivos, volviéndose tóxicos y peligrosos para la cadena alimentaria y la salud humana. Estos metales no se degradan fácilmente si no afectan la calidad del suelo y redujeron la productividad, generando riesgos a largo plazo incluso con el uso de aguas residuales tratadas. Los metales pesados como plomo, níquel, cadmio, manganeso y el arsénico pueden acumularse en los suelos y en el agua de riego, especialmente cuando se usa agua residual. Lo cual representa un riesgo para la agricultura, ya que estos elementos no se degradan con el tiempo y pueden acumularse y ser tóxicos para los cultivos (inti , s.f.)

7.3 Calidad del Agua de riego

El arsénico es un elemento natural de la corteza terrestre, ampliamente distribuido en el medio ambiente, está presente en el aire, el agua y la tierra. En su forma inorgánica resultó altamente tóxico. Este proceso afecta a los cultivos y a la salud humana, ya que se acumuló en las plantas y pudo incorporarse a la cadena alimentaria, provocando problemas como cáncer tras una exposición prolongada (Organización mundial de la salud , 2022)

En la Junta Tiliche, la presencia de arsénico en el agua de riego (bocatoma, reservorio y parcela) mostró una relación directa con el hierro y la materia orgánica. Esta interacción favoreció la movilidad del arsénico bajo condiciones reductoras. En los suelos agrícolas, variables como la humedad, la conductividad eléctrica y el pH influyeron en la transformación del arsénico a su forma más tóxica, el arsenito (As^{3+}), afectando cultivos como la alfalfa y el maíz (Baltazaca Ante & Oña Masapanta, 2025).

7.4 Integración del arsénico

La interacción química se refiere al conjunto de procesos físicos, químicos y biogeoquímicos mediante los cuales una sustancia se relaciona con otros componentes del medio, influyendo en su movilidad, transformación y biodisponibilidad. En sistemas suelo-agua, estas interacciones determinan si un contaminante permanece disuelto, se adsorbe a las partículas del suelo o se moviliza hacia otros compartimentos ambientales (Strawn, 2021).

La interacción del arsénico (As) en el agua de riego influye en su movilidad, ya que puede adsorberse a las partículas del suelo o permanecer disuelto en el agua, lo que condiciona su comportamiento ambiental y su disponibilidad para las plantas. La interacción del arsénico en el agua de riego está, presente naturalmente o debido a la contaminación, afecta la calidad del agua y su impacto en las plantas y el medio ambiente. El arsénico, incluso en bajas concentraciones, puede ser tóxico y causar problemas de salud, además de afectar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Smedley & Kinniburgh, 2002b).

7.5 Parámetros de agua de riego

7.5.1 Arsénico

El arsénico presente en el agua de riego representa un problema ambiental relevante, debido a su capacidad de contaminar el suelo y ser absorbido por los cultivos, incorporándose posteriormente a la cadena alimentaria humana y animal, con riesgos para la salud como cáncer,

problemas cardiovasculares, diabetes y daños al sistema nervioso, además de reducir la producción y vitalidad de las plantas por el estrés que causa, manifestándose en una menor fotosíntesis y crecimiento, afectando especialmente cultivos como el maíz, alfalfa y las hortalizas. Las normativas establecen límites máximos 0.025 mg/L y la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda 10 ppb (0.01 mg/L) para agua potable, pero el riesgo aumenta al consumir cultivos regados con agua contaminada, siendo crucial la gestión y el monitoreo (Alvaro, 2019).

7.5.2 El pH del Agua de Riego

El pH del agua de riego es un parámetro químico importante que influye en la disponibilidad de nutrientes y en el desarrollo de los cultivos, con un rango óptimo de 6.0 a 7.0 que maximizó la absorción de nutrientes como fósforo, potasio, hierro y manganeso por las raíces de las plantas, ya que un equilibrio adecuado evitó la acidificación excesiva del suelo por debajo de 5.5 o la alcalinidad por encima de 8, la cual produjo insolubilización de sales y taponamientos en los sistemas de riego; se midió mediante tiras reactivas o medidores digitales, y se ajustó gradualmente con ácidos como el nítrico o fosfórico para bajarlo, o bicarbonato de potasio para subirlo, verificando siempre tras la mezcla con fertilizantes, pues el agua ácida limitó la descomposición orgánica y dañó raíces, mientras que la alcalina bloqueó micronutrientes y produjo deficiencias como clorosis (Casanovas @picaronablog, 2016).

7.5.3 Sólidos totales disueltos TDS

Los sólidos totales disueltos (TDS) en el agua de riego corresponden a la concentración total de sales minerales disueltas, tales como calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos y bicarbonatos. Este parámetro es un indicador importante de la calidad del agua, ya que influye directamente en las propiedades del suelo, la disponibilidad de agua para las plantas y la productividad agrícola. Cuando los TDS están en niveles moderados, pueden ser beneficiosos, ya que algunas sales son nutrientes esenciales; sin embargo, concentraciones elevadas pueden provocar problemas como la salinización del suelo, toxicidad iónica y dificultades en la absorción de agua por parte de las plantas. Según (FAO, 1985), un nivel de TDS inferior a 450 mg/L se considera adecuado para la mayoría de los cultivos, mientras que valores superiores pueden requerir manejo especializado o el uso de cultivos tolerantes a la sal.

7.5.4 Conductividad Eléctrica (CE)

Es la capacidad de una solución para conducir la electricidad, lo cual depende directamente de la cantidad de iones disueltos como sales y minerales. El agua pura es un mal conductor, pero

su conductividad aumenta con la presencia de iones, como en el agua de mar o de red, la cual tiene una conductividad mayor que el agua destilada, ya que afecta tanto a la disponibilidad de agua para las plantas como a la estructura y fertilidad del suelo (vitaqua, s.f.)

7.5.5 Potencial redox

Mide su capacidad para oxidar o reducir compuestos, siendo crucial para la calidad del agua, la prevención de patógenos y la gestión de nutrientes; un ORP alto (positivo) indica un medio oxidante con poder desinfectante (bueno para matar bacterias), mientras que un ORP bajo (negativo) señala un ambiente reductor que favorece la descomposición orgánica y puede liberar contaminantes como el arsénico, afectando la salud de las plantas y la eficiencia del riego. Se mide en milivoltios (mV) con respecto a un electrodo de hidrógeno estándar y se suele medir utilizando un electrodo de platino con un electrodo de calomelanos saturado como referencia (Redox Potential, 2009).

7.5.6 Materia orgánica

El contenido de materia orgánica influye principalmente en la reducción del oxígeno disuelto afecta el color, sabor y olor del agua, puede reaccionar con desinfectantes formando subproductos peligrosos (como los THM), y su exceso causa eutrofización, alterando ecosistemas al bloquear la luz solar y promover el crecimiento excesivo de algas, impactando la calidad del agua potable y la vida acuática (adasa, s.f.).

7.5.7 Hierro (FE)

Es un mineral común de la corteza terrestre que se disuelve en aguas subterráneas, pero también puede llegar por corrosión de tuberías metálicas, causando un sabor metálico y manchas marrones o rojizas en ropa y accesorios, aunque generalmente no representa un riesgo grave para la salud en los niveles habituales, pero puede ser un indicador de problemas de calidad si excede los límites (higieneambiental, 2023).

7.5.8 Fosfatos (PO_4^{3-})

Es un nutriente esencial para plantas y algas, pero en exceso causa problemas como la eutrofización (crecimiento excesivo de algas que agota el oxígeno y mata peces), proviniendo de fuentes naturales y actividades humanas como fertilizantes y detergentes, siendo controlado en el agua potable para evitar la corrosión de tuberías (Schwind, s.f.).

8. Filtro multicapa

El filtro multicapa es un sistema de tratamiento de agua que emplea varias capas de materiales filtrantes con diferentes características físicas y químicas, dispuestas de manera estratificada dentro de un medio de filtración, con el objetivo de mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes. Estas capas suelen incluir grava, arena de diferentes granulometrías, carbón activado y otros materiales adsorbentes, los cuales actúan de forma complementaria para eliminar sólidos suspendidos, turbidez, compuestos orgánicos, cloro y metales pesados mediante mecanismos de retención física, adsorción e intercambio iónico. La disposición de múltiples capas permite una mayor profundidad de filtración y un aumento del área de contacto entre el agua y los medios filtrantes, lo que incrementa la eficiencia del proceso y prolonga la vida útil del sistema. Debido a estas características, los filtros multicapa son ampliamente utilizados tanto en aplicaciones domésticas como industriales, siendo considerados una alternativa eficiente y versátil en el tratamiento de agua de riego (Ortega, 2031).

9. Materiales filtrantes

9.1 Piedra Caliza

La piedra caliza es una roca que contiene 50% de carbonato de calcio en forma de calcita. Todas las calizas contienen un mínimo porcentaje de otros materiales (Repositorio Institucional, 2024).

Cumple con las funciones cruciales en el agua: ajusta el pH neutralizando la acidez, elimina contaminantes como metales pesados y sulfatos, ablanda el agua al precipitar minerales, y sirve como filtro natural en sistemas de drenaje para controlar la escorrentía y prevenir inundaciones, además de ser vital para la formación de ecosistemas acuáticos (Pandya, 2025) .

9.2 Zeolita

La Zeolita natural es un grupo de minerales que pertenecen a los aluminosilicatos cristalinos microporosos (*Zeolita - Wikipedia*, s. f.), que permiten absorber agua y otros cationes rellenando así los microporos. Tienen una alta capacidad de intercambio catiónico facilitando la adsorción de moléculas de agua, amonio e iones de metales pesados («Zeolita Natural | Absorbente Ecológico y Versátil - Sercalia», s. f.)

La zeolita se utiliza en sistemas de filtración, su estructura porosa atrapa contaminantes como metales pesados, proporcionando agua más segura y limpia. Este hecho hace que la zeolita se

utilice para diversas aplicaciones naturales relacionadas con la agricultura, la nutrición animal, la depuración de aguas, entre otras aplicaciones (Zeonatec, 2023)

Ensayos demuestran con 500 gramos de zeolita, colocado en la parte inferior al relave, fue el más eficiente para la absorción de metales pesados, con resultados de remoción de 51% en arsénico (Lezama, 2024).

9.3 Tela filtrante

La tela de filtro se utiliza para que el agua fluya mientras evitan el movimiento de las partículas, la elección de la tela filtrante adecuada para sus necesidades específicas depende de varios elementos, como flujo del afluente, si el proceso es continuo o discontinuo, el tipo y el tamaño de las partículas sólidas y las características del agua (Geofantex, 2023).

10. Tipos de medios filtrantes

Un medio filtrante es cualquier elemento colocado en un filtro que cambia la calidad del agua que lo atraviesa. Con la variedad de medios disponibles, se puede escoger tipos específicos para crear un entorno ideal para su aplicación (*Warden Biomedica*, s. f.-a).

Se diferencian 3 tipos de medios filtrantes

10.1 Biológico

Los medios biológicos están constituidos por elementos inertes propicio para bacterias benéficas que descomponen sólidos disueltos de manera menos tóxica. Este medio no debería reemplazarse hasta este se obstruya para funcionar (*Warden Biomedica*, s. f.-a)

10.2 Mecánico

Es la filtración básica en la que todos inicialmente pensamos. Consiste en retener físicamente todas las partículas, grandes y pequeñas, que se encuentran en suspensión en el agua (Ariza & Peña, s. f.).

10.3 Químico

La filtración química es la encargada de retirar los elementos y compuestos no deseados que se encuentran disueltos en el agua, así como añadir otros que pueden ser necesarios para acondicionarla (*Warden Biomedica*, s. f.-b).

11. PREGUNTA CIENTÍFICA

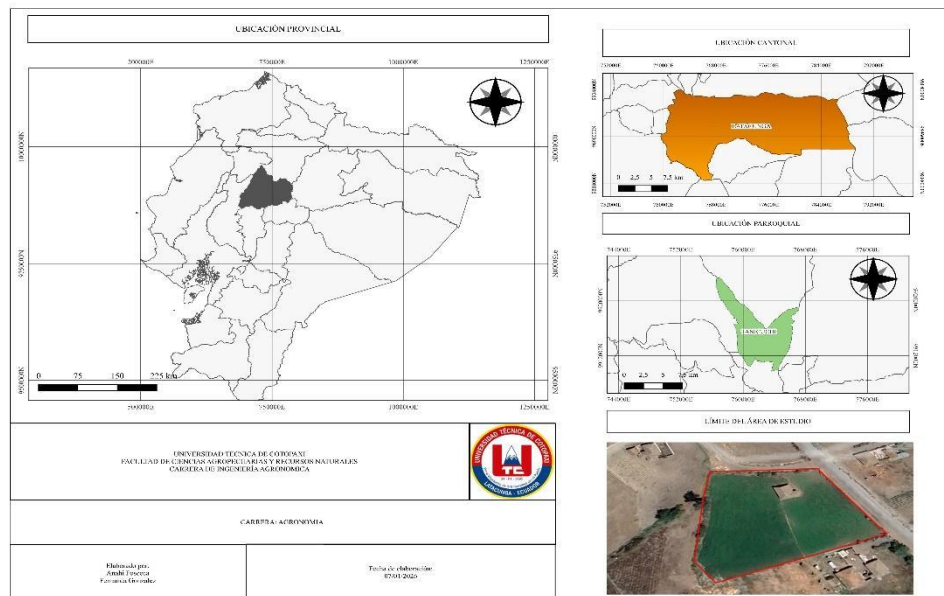
¿Cuál es la eficiencia de un filtro multicapa en la retención de arsénico en el agua de uso agrícola en la Junta de Tiliche San José, Provincia de Cotopaxi?

12. METODOLOGÍA

12.1 Área de estudio

Esta investigación se encuentra en la parcela del usuario de la Junta de Agua de Riego Tiliche San José, ubicado en la Parroquia de Tanicuchi, del Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi, seleccionada como área piloto para la instalación y evaluación del sistema propuesto, se encuentra a una altura de 760658°S de latitud y 9911883° O de longitud. Lo que contribuye a la presencia de temperaturas bajas durante gran parte del año. El rango térmico en la zona poblada va de 14 °C a 22 °C, con un promedio anual de aproximadamente 18 °C. Este proyecto dispone de un caudal de 8 L/s, adicional a los excedentes y residuos que se producen en la quebrada durante la recolección y captación del proyecto.

Figura 1. Ubicación del área de estudio.



Elaborado por: Mapa del área de estudio Elaborado por: (Fonseca & González, 2025)

Tabla 2. Características del área de estudio.

Coordenadas	Altitud	Latitud	Altitud msnm
Parcela	760658	9911883	3130 msnm

Elaborado por: (Fonseca & Gonzalez, 2025).

12.2 Recolección de muestras de agua de riego

Se realizó en la parcela de un usuario que pertenece a la Junta de Agua de Riego Tiliche, San José siguiendo los protocolos establecidos por el laboratorio (Andes Lab) para muestreo ambiental y control de calidad de agua de riego de cada punto evaluado, se realizó un total de 30 muestras.

La recolección se llevó a cabo durante siete días consecutivos, conforme a un cronograma previamente establecido. En cada jornada de muestreo, la válvula de ingreso de agua al sistema de filtración se abrió a las 07:00 a.m., manteniéndose el sistema en operación hasta las 16:00 h, momento en el cual se cerró y se tomó la última muestra diaria para su posterior análisis en laboratorio. En los días destinados únicamente a la evaluación del funcionamiento del sistema, la válvula se abrió a las 08:00 a.m. y se cerró a las 11:00 a.m., lo que permitió el funcionamiento continuo del sistema bajo condiciones controladas, sin realizar toma de muestras.

12.2.1 Preparación del material

- Botellas de plásticos previamente limpias
- Guantes estériles para la recolección
- Hielo y contenedor térmico para preservar la muestra

12.2.2 Procedimiento de muestreo

- Se eliminó el agua estancada dejando correr el flujo durante 2- 3 minutos
- Se enjuaga el recipiente 2- 3 veces con el agua del sitio
- Se llenan las botellas evitando burbujas y dejando mínimo espacio de cabeza para minimizar la oxidación.
- Etiquetar la muestra para llevar a laboratorio para su análisis (Andes Lab 2025).



12.2.3 Conservación y Transporte

- Las muestras se conservaron a 4 C en un contenedor térmico con hielo.
- El transporte al laboratorio se realizó en un máximo de 24 horas para evitar cambios físico químicos.
- Se completó la cadena de custodia correspondiente.



12.2.4 Parámetros físico-químicos iniciales de agua

Tabla 3. Parámetros a evaluar.

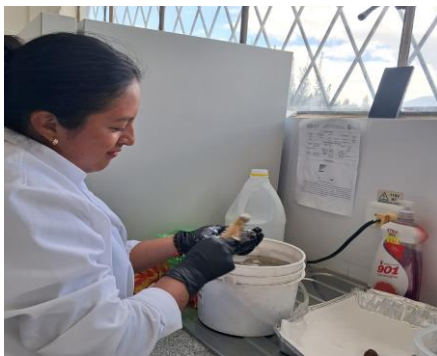
Parámetro	Rangos TUSMA	Laboratorio	Campo
Arsénico	≤ 0.01 mg/L	•	•
Ph	6.5 - 8.5		•

Conductividad eléctrica	50 - 1500 μS/cm	•
Sólidos totales disueltos (TDS)	-200 a 600 mV	•
Potencial redox	5 y 8 mg/L (miligramos por litro)	•
Materia orgánica	<5 mg/L (para evitar la contaminación y mantener el equilibrio ecológico)	•
Hierro (Fe)	< 0.3 mg/L	•
Fosfatos (PO₄³⁻)	< 2 mg/L (en agua de riego para evitar eutroficación y mantener calidad adecuada)	•

Elaborado por: (Fonseca & González, 2025)

12.2.5 Recuperación del material filtrante

El material filtrante implementado en el sistema estuvo constituido por capas granulares previamente empleadas en un sistema multicapa para la remoción de arsénico, conformadas principalmente por piedra caliza, zeolita y un medio adsorbente, dispuestas de manera secuencial para favorecer los procesos de retención física y adsorción (Naula, 2024); sin embargo, pese a su acondicionamiento mediante lavados con agua destilada y secado controlado (Smith, 2020), se evidenció que los materiales reutilizados conservaron sales y arsénico adsorbidos, lo que redujo su capacidad de remoción, confirmando que la regeneración no restituye completamente la eficiencia inicial debido a la fuerte interacción del contaminante con los sitios activos del adsorbente (Yadav et al., 2022), por lo que se determinó que el uso de materiales filtrantes nuevos resultó técnicamente más adecuado para garantizar una mayor eficiencia en la eliminación de arsénico y una mejor calidad del agua tratada.



12.2.6 Lavado del filtro

Durante la operación del filtro multicapa se observó que las partículas y los sólidos en suspensión se acumularon progresivamente en los poros y espacios intergranulares del medio filtrante, lo que incrementó la pérdida de carga y redujo la eficiencia de remoción de contaminantes; por esta razón, se consideró necesario efectuar lavados periódicos, ya que la acumulación de sedimentos sin una limpieza oportuna favoreció la colmatación del lecho y la formación de canales preferenciales, deteriorando la calidad del agua filtrada. Asimismo, se estableció que el retro lavado permitió remover los sólidos retenidos y restaurar la capacidad hidráulica y adsorbida del medio, manteniendo un desempeño estable del sistema y evitando la degradación progresiva de la eficiencia de filtración (Asif, 2012).

12.2.6 Montaje del filtro multicapas en laboratorio

Para la implementación del filtro de 6 capas se utilizó un recipiente de plástico con capacidad de 3 litros, en la base se colocaron 5 cm de piedra caliza de granulometría grande (100-120mm), seguida de una capa de 5cm de piedra caliza mediana (20-60 mm) para luego incorporar una tela filtrante de polietileno la cual ayudará a incrementar el tiempo de retención hidráulica y favorecer a un mayor contacto con el agua (education, 2014).

Posteriormente se añadieron 10 cm de zeolita granular (1mm) sobre la cual se colocó una capa adicional de 5 cm de piedra caliza mediana y se complementó la estructura con 5 cm de piedra caliza grande garantizando la estabilidad del sistema y una distribución adecuada al flujo a través del filtro (Fonseca & Gonzalez, 2025).



El diseño de filtros de 6 y 10 capas permite aumentar el contacto del agua con los materiales filtrantes para evaluar la remoción de arsénico.

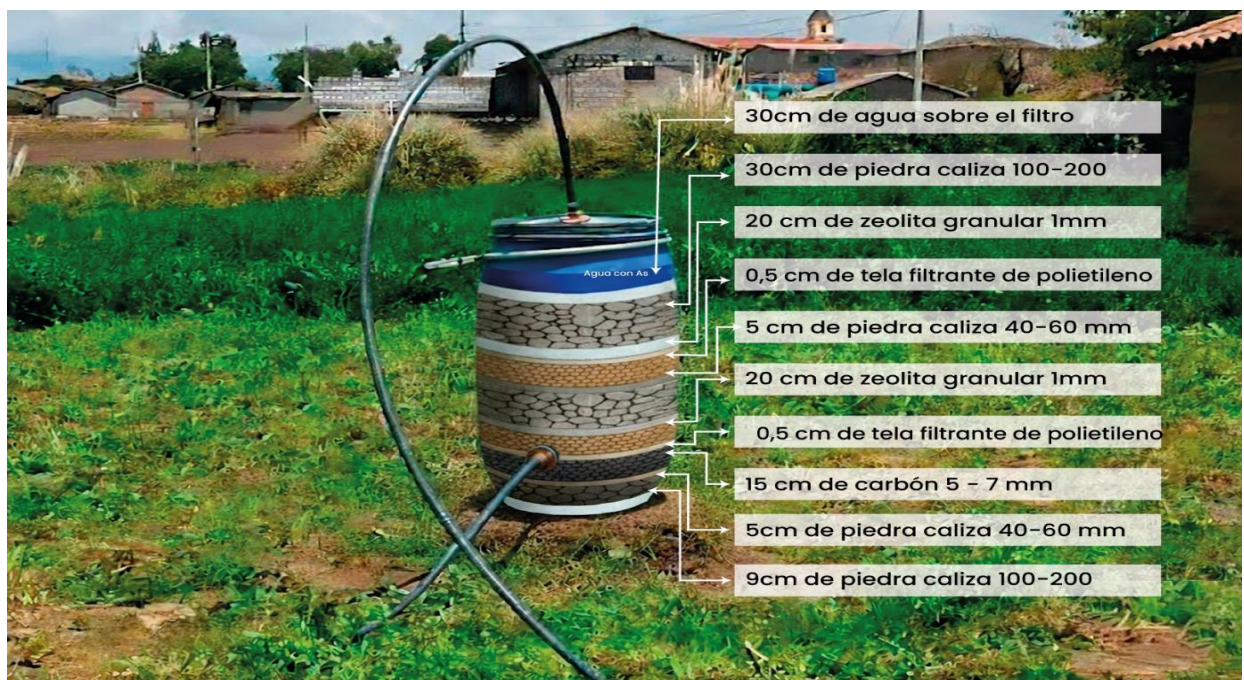
12.2.7 Implementación del filtro multicapa

Primero se incorporaron 9 cm de piedra caliza de granulometría grande (100–120 mm), seguidos de 5 cm de piedra caliza mediana (20–60 mm), se colocó una tela filtrante de polietileno de 0,5 cm, cuya función fue incrementar el tiempo de retención y favorecer un mayor contacto del agua con el medio filtrante, se añadieron 20 cm de zeolita granular de 1 mm, sobre los cuales se dispusieron 5 cm adicionales de piedra caliza mediana. Seguido de ello, se colocó una segunda tela filtrante de 0.5 cm para mantener la estabilidad del sistema y mejorar la distribución del flujo, se incorporaron otros 20 cm de zeolita granular, la estructura se completó con 9 cm de piedra caliza grande, se completó con 30 cm de agua para su funcionamiento asegurando la adecuada estratificación y operatividad del filtro multicapa (wikipedia.org, 2012).



12.2.8 Diseño del filtro implementado en campo

Figura 2. Diseño del filtro multicapa.



Elaborado por: (Fonseca & González, 2025)

Tabla 4. Materiales filtrantes en cm^3 .

Capa	Altura cm	Volumen cm^3
Agua sobre el filtro	30	60 000 cm^3
Piedra caliza (100–200 mm)	30	60 000 cm^3
Zeolita granular	20	40 000 cm^3
Tela filtrante	0.5	1 000 cm^3
Piedra caliza (40–60 mm)	5	10 000 cm^3
Zeolita granular	20	40 000 cm^3
Tela filtrante	0.5	1 000 cm^3
Carbón	15	30 000 cm^3
Piedra caliza (40–60 mm)	5	10 000 cm^3
Piedra caliza (100–200 mm)	9	18 000 cm^3

Elaborado por: (Fonseca & González, 2025)

12.2.9 Distribución del medio filtrante por capa

Tabla 5. Distribución de los medios filtrantes.

Material	Altura de capa (cm)	%
Agua		
Piedra caliza grande	30	15
Zeolita	20	28.6
Tela filtrante	0.5	0.7
Piedra caliza mediana	5	7.1
Zeolita	20	28.6
Tela filtrante	05	0.7
Carbón natural	15	0.15
Piedra caliza mediana	5	7.1
Piedra caliza grande	9	14
Total	100	100

Elaborado por: (Fonseca & González, 2025)

12.2.10 Materiales para implementar el filtro en campo

- Caja de filtro
- 40 lb de zeolita granular
- 1 bulto de piedra caliza grande 100-120mm
- 1 bulto de piedra caliza mediana 20-60mm
- 1 bulto de carbón activado

Materiales Extras

- Manguera ½ pulgada. (m)
- Abrazaderas ½ pulgada. (u)
- Dos cooler. (u)
- Hielo. (kg)
- 30 botellas de 1L. (u)
- Una caja de guantes. (par)
- Micro aspersor ½ pulgada. (u)
- Bayoneta. (u)

12.2.11 Procedimiento para la elaboración del filtro multicapa

- Se agregó una capa de 10 cm de piedra caliza gruesa con un diámetro (100–120 milímetros), la cual sirvió como base del sistema de filtración y permitió el adecuado soporte y distribución del flujo del agua a través de las capas superiores del filtro.



- Se añadió una capa de 5 cm de piedra caliza mediana con una dimensión (20–60 mm), la cual tuvo la función de contribuir a la remoción de impurezas y al ajuste del pH del agua durante el proceso de filtración.



- Seguidamente de la tela filtrante con un diámetro de 0.5 cm, garantizando su correcta extensión y posicionamiento para evitar el paso de partículas indeseadas. Posteriormente, se añadió una capa de 20 cm de zeolita granular con un tamaño de partícula de 1 mm, asegurando una distribución homogénea que optimiza la capacidad de filtración y adsorción del material.



Tabla 6. Composición Química.

Composición Química de la Zeolita	
Zeolita Natural	% Óxido
<i>SiO₂</i>	66.66
<i>Al₂O₃</i>	22.71
<i>Fe₂O₂</i>	0.65
CaO	0.52
MgO	0.10
<i>Na₂O</i>	1.94
<i>K₂O</i>	6.97
P. Fuego	6.45
Humedad	15.42

Elaborado por: (Fonseca & González, 2025)

- Se ubican 5 cm de piedra caliza de tamaño mediano, distribuidos de manera uniforme para garantizar una compactación adecuada. La piedra caliza presenta dimensiones entre 40 y 60 mm, asegurando la estabilidad y resistencia necesaria para la estructura o base correspondiente.



- Se colocó la segunda tela filtrante, asegurándose de que quedara correctamente extendida para garantizar la separación y estabilidad de las capas subsiguientes. Esta tela permitió la retención de partículas finas, evitando la mezcla de los diferentes materiales y favoreciendo un drenaje adecuado dentro del sistema. Posteriormente, se añadieron 20 cm de zeolita natural, los cuales fueron distribuidos de manera uniforme con el fin de optimizar su capacidad de adsorción y filtración dentro del sistema multicapa.



- Se añadió una capa de aproximadamente 10 cm de piedra caliza gruesa y 5cm de piedra caliza mediana la cual se colocó de manera uniforme para asegurar una adecuada distribución del flujo y mejorar la eficiencia del proceso de filtración



- Se agregó agua con una altura aproximada de 30 cm, asegurando una distribución sobre toda la superficie del sistema. Esta operación se llevó a cabo con el fin de mantener las

condiciones óptimas de humedad necesarias para el correcto funcionamiento y estabilidad del sistema instalado.



Luego de dos muestras de agua analizadas en laboratorio, no detectó materia orgánica, se realizó una investigación complementaria en la que se determinó que el carbón activado, se puede utilizar en filtros multicapa, se emplea ampliamente en la remoción del color, olor y sabor en distintos productos incluido las plantas de tratamiento de aguas residuales. Este actúa como bloqueador del contaminante por adsorción, atrapando impurezas y resultando especialmente eficaz en la eliminación de arsénico que es el principal agente perjudicial para la salud y los cultivos (Gerardo & Katherine, 2025).



El control del flujo se efectuó mediante la instalación de una llave tipo brazo ubicada en la salida del sistema, lo que permite regular con precisión el caudal de alimentación al lecho filtrante. Esta disposición evitó variaciones bruscas en el flujo, constituyendo a mantener la eficiencia del proceso de filtración y la estabilidad de las capas filtrantes.

12.2.13 Cálculo de la retención

El cálculo de la retención se realizó a partir de la diferencia entre concentración inicial y final del arsénico en el agua tras su filtración dando el resultado en porcentaje, de esta manera se

evaluó la capacidad del filtro para reducir la carga contaminante bajo las condiciones de operación real.

$$R = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100$$

R= Retención o eficiencia de remoción

C_i = Concentración inicial se utiliza como referencia para evaluar la magnitud de la reducción.

C_f = Concentración final este valor permitió determinar cuánto contaminante permaneció en la solución.

×100= Se multiplicó por 100 para expresar el resultado en forma porcentual, lo cual facilita la interpretación de la eficiencia del proceso.

12.2.14 Tiempo de eficiencia de adsorción

El tiempo de eficiencia de adsorción se define con un intervalo donde el material filtrante mantuvo su capacidad óptima de retención del contaminante previo a la saturación, así se estableció la vida útil bajo condiciones concentradas.

$$Q = \frac{(C_i - C_f) * V}{m}$$

Q =Capacidad de adsorción específica, indicó cuánta carga contaminante logró retener el adsorbente.

C_i = Concentración inicial se usa como referencia para medir la eficiencia del material.

C_f = Concentración final es el reflejo de cuánto contaminante permaneció sin remover.

V = Volumen de la solución para calcular la masa total de contaminante removido.

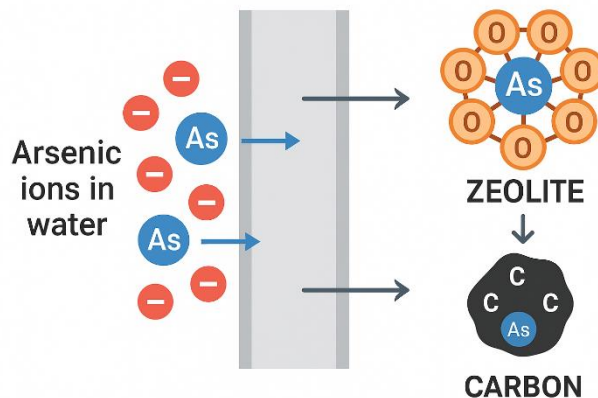
m= Masa del adsorbente, material filtrante utilizado en el experimento

12.2.15 Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir es un modelo que describe la adsorción de un soluto sobre la superficie del material es decir cómo el arsénico se adhiere a los materiales filtrantes como la zeolita, piedra caliza y carbón, este modelo permite conocer el punto de saturación del filtro multicapa.

El arsénico se adhiere ocupando únicamente una capa superficial, cada sitio solo puede alojar un ion activo del contaminante, lo que da lugar a una cobertura de monocapa, todos los sitios tienen la misma afinidad energética, lo que implica que la energía de adsorción es constante para cada uno, y por ello el proceso se ajusta al modelo de Langmuir (Domínguez & Quispe, 2023).

Figura 3. Modelo de Langmuir.



Elaborado por: (Fonseca & Gonzalez, 2025).

Fórmula del isoterma de Langmuir

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) * v}{m}$$

qe = Cantidad de arsénico adsorbido por el material en equilibrio expresada en mg de As / g de adsorbente (mg/g).

C0 = Concentración inicial del arsénico antes de ponerse en contacto con el adsorbente en mg/L.

Ce = Concentración final o en equilibrio, después del proceso de adsorción en mg/L.

V = Volumen de la solución donde se hizo la prueba en L (litros).

m = Masa del adsorbente (zeolita, caliza, carbón) en g (gramos). (García-Rubio, 2023)

12.2.16 Tiempo eficiencia de remoción

El tiempo de eficiencia de remoción se definió en un periodo de 3 meses durante el cual el filtro multicapa mantuvo la concentración del efluente por debajo del umbral antes de llegar a su punto crítico de ruptura del lecho filtrante, las inspecciones visuales y el monitoreo del caudal (Ghazi, 2017).

Fórmula:

$$Eficiencia \% = \left(\frac{C\ inicial - C\ final}{C\ inicial} \right) * 100$$

Ci = concentración inicial del contaminante (antes de filtrar)

Cf = concentración final del contaminante (después de filtrar)

12.2.17 Cálculo para el caudal

El caudal se evaluó midiendo el volumen de agua que atravesó el filtro en un tiempo determinado, se dividió el volumen registrado entre el tiempo empleado, obteniendo así la cantidad de agua filtrada por unidad de tiempo. (Valdibieso, 2024)

Fórmula:

$$Q \left(\frac{L}{S} \right)$$

12.2.18 Costos y beneficios

El costo del filtro multicapa se determina por los materiales que fueron seleccionados para su construcción, los accesorios extras para su montaje y control de flujo adicional se consideró los gastos de mano de obra y transporte.

13. Tipos de investigación

13.1 Investigación bibliografía

Basada en la revisión, análisis de la información recolectando de fuentes documentales de artículos científicos, tesis y publicaciones académicas disponibles en bases digital ya que permite comprender el tema de estudio desde diferentes enfoques sobre la interacción de arsénico en el agua de riego y suelo para uso agrícola.

13.2 Investigación de campo

La investigación de campo consiste en la recolección y análisis directo de muestras de agua en las fuentes naturales o sistemas de abastecimiento donde se sospecha contaminaciones por metaloides. Este tipo de estudio permite obtener datos reales mediante observaciones, mediciones y análisis de laboratorio, proporcionando una base científica para proponer medidas de mitigación, tratamiento o gestión sostenible del recurso hídrico afectado.

13.3 Investigación científica

La investigación científica evaluó la remoción de arsénico mediante un filtro multicapa y determinó que sus materiales adsorbieron eficazmente los elementos de arsénico. El análisis demostró que el proceso se ajustó al modelo de Langmuir, confirmando la afinidad superficial y la eficiencia del sistema en la reducción del contaminante. (Mudzielwana & Gitari, 2020).

14. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

14.1 Parámetros previos de antes y después al cálculo de agua

En la Gráfica 1 se evidenció que previo al tratamiento del agua todos los parámetros evaluados fueron comparados con los valores establecidos en la normativa TULSMA, observándose incumplimientos relevantes en la mayoría de ellos. Luego del tratamiento los parámetros bajan en notables cantidades llegándose a acercarse a la normativa ecuatorial.

El arsénico ($7,6 \pm 1,6$ mg/L) se ubicó por encima del límite máximo permisible de 0,1 mg/L superándolo aproximadamente 76 veces lo que evidenció un problema crítico en la Junta de Riego de Tiliche. Estudios recientes confirmaron que la calidad fisicoquímica del agua de riego constituyó uno de los factores determinantes en la sostenibilidad agrícola debido a su influencia directa sobre la productividad, la degradación del suelo y la seguridad alimentaria (FAO, 2020). Después del tratamiento la concentración se redujo con valores entre ($3,10 \pm 1,63$ mg/L), lo que demuestra que redujo el 31 veces aproximadamente una remoción efectiva del metal esta disminución indica que el sistema de filtración favorece procesos de adsorción y retención del arsénico en los medios filtrantes, reduciendo su movilidad y toxicidad lo cual mejora la calidad del agua y disminuye el riesgo de acumulación de arsénico en suelos agrícolas y cultivos Villa, Cortes, & Chulim, (2021).

El pH presentó un valor medio de ($8,5 \pm 0,4$) manteniéndose dentro del rango permitido por el TULSMA (6,5–8,5), estudios recientes como los de Rengel (2020) y Zhang et al. (2021) demostraron que aguas con pH fuera del rango óptimo alteraron significativamente la solubilidad del fósforo, hierro y micronutrientes generando deficiencias nutricionales o

toxicidades que impactaron negativamente el rendimiento de los cultivos. Tras el tratamiento, el pH disminuyó a un rango entre $(7,88 \pm 0,38)$ este comportamiento sugiere que el sistema de filtración contribuye a la estabilización química del agua, lo cual es relevante ya que el pH influye en la solubilidad de metales y en la eficiencia de los procesos fisicoquímicos favoreciendo una mayor aptitud del agua para riego Huanca & Arohuanca, (2020).

La conductividad eléctrica presentó un valor medio de $(1,43 \pm 0,16 \mu\text{S}/\text{cm})$, lo que indica un nivel de salinidad ligera a moderada en el agua de riego. Después del tratamiento la conductividad eléctrica mostró valores entre $(1,15 \pm 0,05 \mu\text{S}/\text{cm})$ esta reducción indica que el sistema de filtración contribuye a la remoción parcial de iones disueltos lo cual es relevante desde el punto de vista agronómico ya que una menor salinidad reduce el riesgo de salinización del suelo y el estrés osmótico en los cultivos.

Los sólidos totales disueltos antes del tratamiento presentaron valores aproximados entre $(682,4 \pm 60,0 \text{mg}/\text{L})$, indicando una elevada carga de sustancias disueltas. Después del tratamiento el valor disminuyó a aproximadamente entre $(572,27 \pm 31,76 \text{mg}/\text{L})$. Esta reducción confirma la eficiencia del sistema de filtración en la remoción de compuestos disueltos y partículas finas lo cual se correlaciona con la disminución de la conductividad eléctrica y demuestra una reducción de la carga iónica del agua Ontiveros, Capurata, Diakite-Diakite, Álvarez-Sánchez, & Coras-Merino, (2012).

El potencial redox antes del tratamiento presentó un valor central cercano a $(-72,6 \pm 14,5 \text{mV})$ al comparar estos resultados con la normativa ecuatoriana TULSMA $(-200 \text{ a } 600 \text{mV})$ en estas condiciones, los metales pueden permanecer en formas más móviles y biodisponibles, lo que representa un mayor riesgo de contaminación del suelo y de absorción por los cultivos. Posterior al tratamiento tiene una concentración de $(-55,59 \pm 9,37 \text{mV})$ este cambio electroquímico indica una mejora en la estabilidad química del agua tratada, reduce la reactividad y movilidad de contaminantes y contribuye a una mayor calidad del agua para su uso en riego al disminuir el riesgo de acumulación de metales y alteraciones en el sistema suelo-planta Gómez, (2010).

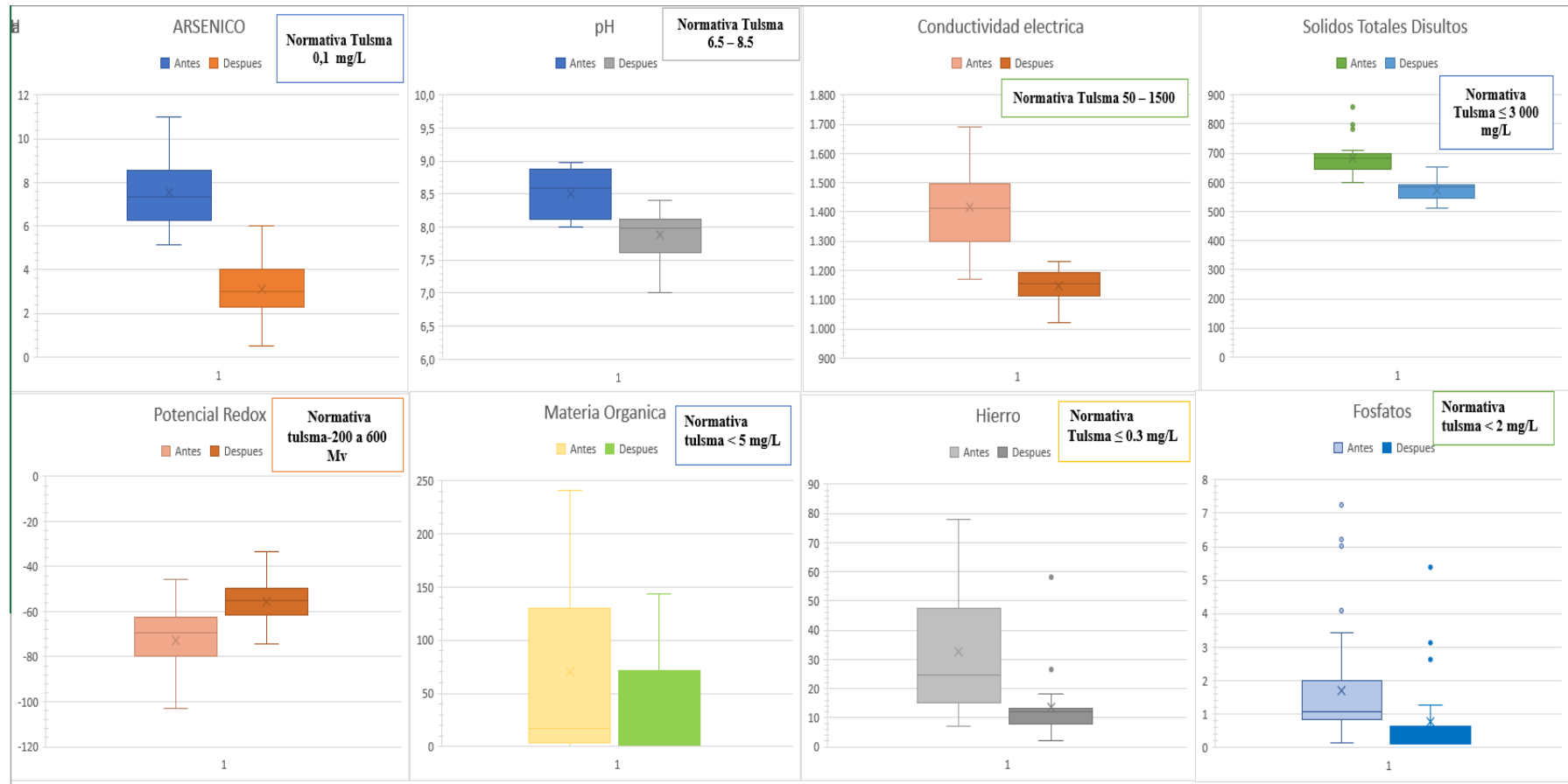
El contenido de materia orgánica en el agua de la Junta de Riego Tiliche San José presentó una concentración elevada de $(70,4 \pm 79,5 \text{mg}/\text{L})$ lo que evidenció una condición desfavorable para su uso agrícola ya que pudo provocar disminución del oxígeno disuelto desarrollo de microorganismos, obstrucción de sistemas de riego y reducción de la eficiencia de los fertilizantes aplicados. Altos niveles de materia orgánica favorecieron procesos de eutrofización y la formación de subproductos indeseables durante eventuales tratamientos Cachipundo & Pacheco, (2025) quienes indicaron que concentraciones superiores a $50 \text{mg}/\text{L}$ representaron un riesgo significativo para la calidad del agua destinada al riego. Después del tratamiento, la

concentración disminuyó a una media de $(36,48 \pm 48,89 \text{ mg/L})$ esta reducción indica que el sistema de filtración es eficiente en la remoción de compuestos orgánicos, probablemente mediante procesos de adsorción y retención en los medios filtrantes, la disminución de la materia orgánica es relevante ya que reduce el consumo de oxígeno la proliferación microbiana y el riesgo de eutrofización Cachipundo & Pacheco, (2025).

Se evidenciaron altos contenidos de hierro con valores de $(32,7 \pm 21,7 \text{ mg/L})$ los cuales sobrepasaron aproximadamente 6,5 veces la normativa ecuatoriana de 5,0 mg/L estas concentraciones pueden generar problemas en el sistema de riego, como incrustaciones en tuberías, obstrucción de emisores o taponamiento, alteraciones en la calidad del suelo y posibles efectos fitotóxicos en los cultivos, además de favorecer la acumulación de hierro en el suelo (Haddade & Monaco, 2024). Después del tratamiento la disminución de la concentración se refleja en $(13,42 \pm 10,54 \text{ mg/L})$ la transformación del hierro hacia formas menos solubles mediante procesos de oxidación, precipitación y adsorción en el medio filtrante, lo que reduce su movilidad y reactividad química, este cambio implica una mejora en la estabilidad fisicoquímica del agua disminuye el riesgo de obstrucción de sistemas de riego y de acumulación metálica en el suelo y contribuye a una mayor aptitud del agua para uso agrícola al minimizar impactos negativos en el sistema.

Finalmente, una concentración de fosfatos se $(1,7 \pm 1,9 \text{ mg/L})$ en el agua de riego indica una carga elevada de nutrientes asociada a aportes de origen natural o antrópico capaz de favorecer procesos de eutrofización y alterar el equilibrio ecológico de los sistemas acuáticos, además de incrementar el riesgo de acumulación de fósforo en el suelo agrícola, Rojas-Rodríguez, Coronado-García, Rossetti-López, & Beltrán-Morales, (2020). Después del tratamiento, la concentración se redujo a $(1,62 \pm 1,93 \text{ mg/L})$ evidenciando la eficiencia del sistema de filtración en la remoción de especies fosfatadas mediante procesos de adsorción y retención en los medios filtrantes esta reducción implica una disminución de la carga nutritiva del agua mejora su estabilidad fisicoquímica y reduce el potencial de eutrofización y de acumulación de fósforo en el suelo lo que contribuye a una mayor aptitud del agua para uso agrícola y a un manejo más sostenible del recurso hídrico.

Gráfico 1. Del antes y después al cálculo de agua.



14.2 Análisis del filtro – Laboratorio

La Tabla 6 presentó el análisis estadístico descriptivo comparativo de la concentración de arsénico antes y después de la aplicación del sistema de filtración con materiales reutilizados, evidenciándose que el agua sin tratar registró un valor inicial de 8,31 mg/L, tras el uso del filtro de 6 capas, la concentración disminuyó a 8,20 mg/L y con el filtro de 10 capas se redujo a 8,00 mg/L, lo que reflejó una diferencia de $-0,2$ mg/L y una mejora porcentual del $-2,5$ %, indicando una reducción limitada del arsénico. Si bien los resultados mostraron una tendencia a la disminución del contaminante, las concentraciones obtenidas continuaron siendo significativamente superiores al límite máximo permisible establecido por la normativa ambiental ecuatoriana TULSMA ($\leq 0,1$ mg/L), por lo que el sistema de filtración evaluado no logró cumplir con los estándares ambientales vigentes, evidenciándose la necesidad de optimizar el proceso de tratamiento para alcanzar niveles aceptables de calidad del agua. arsénico antes y después del tratamiento con materiales filtrantes nuevos. Se observó que, previo al filtrado, el arsénico registró un valor inicial de 8,31, mientras que tras la aplicación del filtro de 6 capas se alcanzó una eficiencia de remoción del 44 %, incrementándose notablemente al 88 % con el filtro de 10 capas. La diferencia evidenció una disminución significativa del contaminante, con una mejora del 50 %, lo que confirmó que el aumento del número de capas optimizó el proceso de filtración. Asimismo, los resultados indicaron una reducción efectiva del arsénico, acercándose a los valores establecidos por la normativa TULSMA ($\leq 0,1$ mg/L), demostrando el mejor desempeño del filtro de mayor complejidad.

Tabla 7. Análisis Estadístico Descriptivo Comparativo de Arsénico con materiales reutilizados.

Parametros	Antes del filtrado	Filtro de 6	Filtro de 10	Diferencia	Mejora %	Diferencia	Normativa Tulsma
Arsenico mg/L, material reutilizado	8,31	8,20		0,11	1,32	Disminuye	≤ 0.1 mg/L
Arsenico mg/L, material reutilizado	8,31		8,00	0,31	3,73	Disminuye	≤ 0.1 mg/L
Arsenico mg/L, material nuevo	8,31	4,60		3,71	44,65	Disminuye	≤ 0.1 mg/L
Arsenico mg/L, material nuevo	8,31		1,00	7,31	87,97	Disminuye	≤ 0.1 mg/L

Elaborado por: (Fonseca & Gonzales, 2025).

La Tabla 7 presentó el análisis estadístico descriptivo comparativo de la concentración de arsénico antes y después del tratamiento con materiales filtrantes nuevos. Se observó que, previo al filtrado, el arsénico registró un valor inicial de 8,31, mientras que tras la aplicación del filtro de 6 capas se alcanzó una eficiencia de remoción del 44 %, incrementándose notablemente al 88 % con el filtro de 10 capas. La diferencia evidenció una disminución significativa del contaminante, con una mejora del 50 %, lo que confirmó que el aumento del número de capas optimizó el proceso de filtración. Asimismo, los resultados indicaron una reducción efectiva del arsénico, acercándose a los valores establecidos por la normativa TULSMA ($\leq 0,1$ mg/L), demostrando el mejor desempeño del filtro de mayor complejidad.

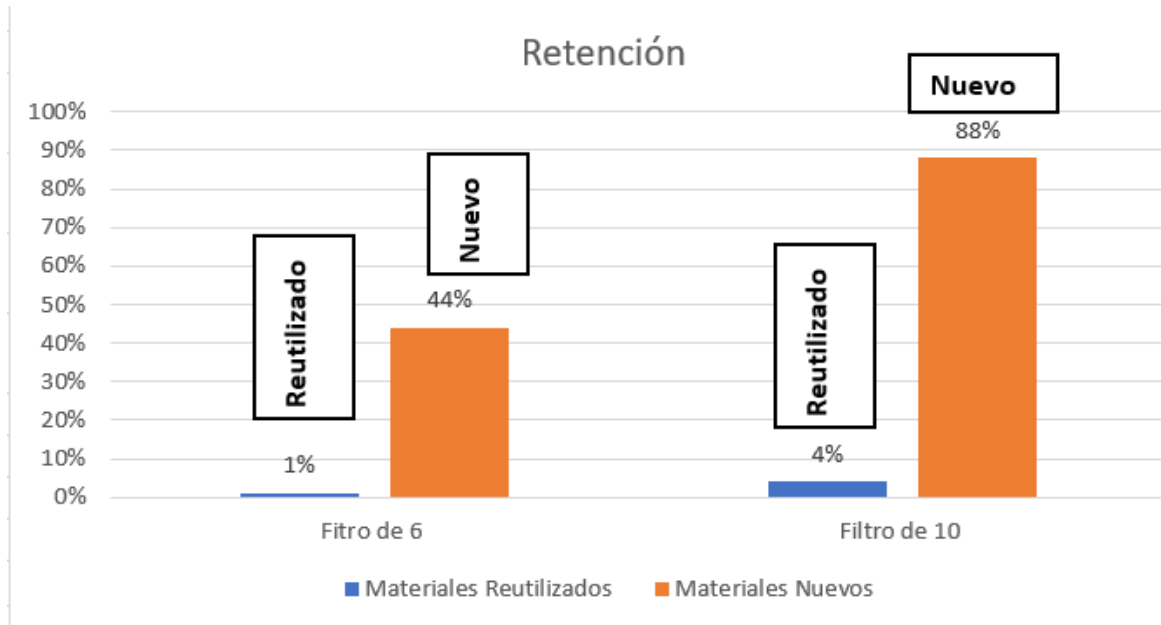
14.3 Retención del filtro multicapa

➤ Materiales reutilizados y nuevos

En el gráfico 2 se observa la retención del material reutilizado en el filtro de 6 capas alcanzó el 1 %, valor inferior en comparación con el filtro de 10 capas, el cual presentó una retención del 4 %, evidenciándose un incremento notable en la capacidad de retención del arsénico pero no alcanzado a superar los límites de TUSMA. En el filtro multicapa con material nuevo se observó que el filtro de 6 capas presentó un porcentaje de retención aproximado del 40 %, lo que evidenció una capacidad limitada para la remoción de partículas. Posteriormente, el filtro de 10 capas mostró un desempeño considerablemente superior, alcanzando valores cercanos al 88 a 90 % de retención, lo cual se atribuyó al uso de materiales nuevos que incrementaron la superficie de contacto y mejoraron el proceso de filtración. Estos resultados demostraron que el aumento del número de capas y la incorporación de materiales adecuados influyeron de manera positiva y significativa en la eficiencia del sistema de filtración, por lo que fue seleccionado para su aplicación en campo.

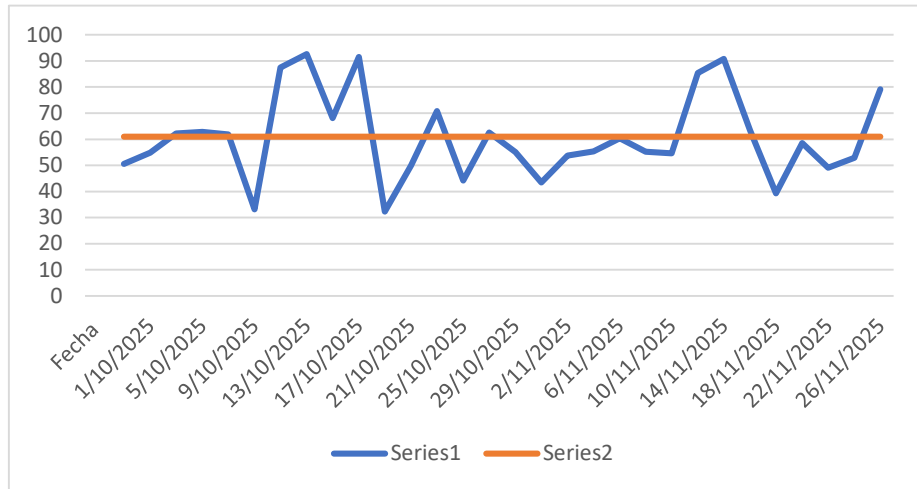
Gráfico 2.

Retención de los materiales nuevos y reutilizados.



➤ Grafica de retención

La gráfica muestra la variación temporal de los valores registrados durante el periodo de 3 meses de operación del filtro multicapa en campo comprendido entre el 29 de septiembre y el 26 de noviembre de 2025, cuando la serie presenta picos elevados con valores aproximados entre 80 y 95% el filtro evidencia un funcionamiento adecuado con una alta eficiencia del medio filtrante, asociada a una mayor capacidad de retención y a una adecuada permeabilidad del lecho. En cambio, los descensos marcados por debajo del promedio 60 %, con valores que disminuyen hasta rangos cercanos a 35–45% reflejan la acumulación progresiva de sólidos en los espacios del material filtrante, provocando obstrucción, aumento de la resistencia hidráulica y reducción de la eficiencia del proceso. Este comportamiento alcanza un estado de saturación operativa condición bajo la cual se hace necesaria la aplicación de una limpieza o retro lavado para recuperar los valores óptimos de operación y restituir el desempeño del sistema.

Gráfico 3. De los días de lavado

La saturación del filtro multicapa ocurre cuando la retención continua de sólidos suspendidos y partículas finas provoca un llenado de los poros del medio filtrante reduciendo la porosidad efectiva y la conductividad hidráulica del lecho lo que se traduce en un aumento de la pérdida de carga y una disminución significativa de la eficiencia de remoción de arsénico u otros metales. En este estado el filtro deja de operar adecuadamente ya que se limita el paso uniforme del agua y se favorece la formación de flujos preferenciales, comprometiendo la calidad del agua tratada. La normativa y guías técnicas recientes establecen que esta condición operativa indica el fin del ciclo funcional del filtro y exige la aplicación inmediata de procesos de limpieza o retro lavado para restablecer las condiciones hidráulicas, pero no las eficiencias iniciales que garantizan el cumplimiento de los criterios de operación y calidad del agua establecidos en sistemas de tratamiento (World Health Organization, 2022).

14.4 Correlaciones

Las comparaciones realizadas entre 30 análisis para los 8 parámetros evaluados evidenciaron, en general, correlaciones débiles a moderadas entre las variables fisicoquímicas. La concentración de arsénico presentó coeficientes de correlación bajos con el pH ($r = 0,030$), conductividad eléctrica ($r = -0,214$), potencial redox ($r = -0,220$), sólidos disueltos totales ($r = -0,192$) y hierro ($r = 0,121$), lo que indicó una relación limitada y ausencia de dependencia directa.

El pH mostró asociaciones débiles con la mayoría de parámetros, destacando una correlación moderada con los TDS ($r = 0,3$). No obstante, las relaciones más relevantes desde el punto de vista fisicoquímico correspondieron a las correlaciones moderadas y positivas observadas entre

la conductividad eléctrica (CE) y la materia orgánica (MO) ($r = 0,48$), así como entre la CE y los sólidos disueltos totales (TDS) ($r = 0,48$), lo que sugirió que el incremento de la carga iónica del agua estuvo principalmente asociado a la presencia de compuestos orgánicos disueltos y sales totales. Por su parte, el potencial redox presentó correlaciones negativas débiles con pH, MO y Fe, mientras que el fosfato no mostró correlación con ninguna variable, evidenciando que, en conjunto, la variabilidad de la CE estuvo controlada por la concentración de especies disueltas más que por cambios en el pH o en las condiciones redox, y que el resto de parámetros, incluido el arsénico, mostró un comportamiento mayormente independiente.

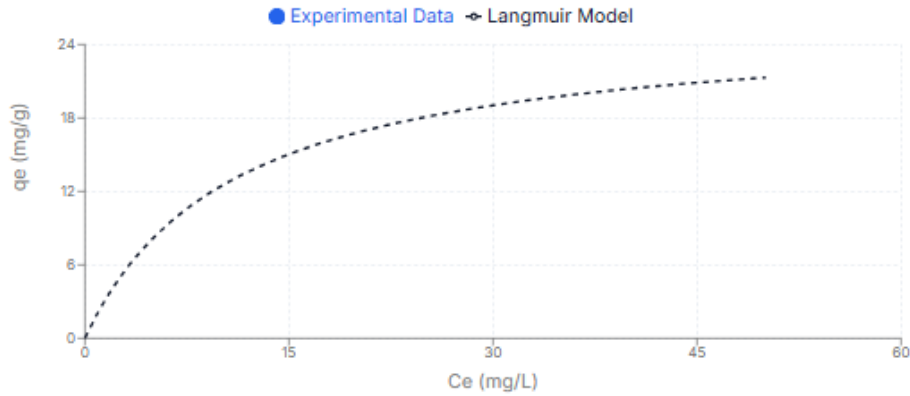
Tabla 8. Correlaciones de todos los parámetros.

PARAMETROS	As (mg/L)	pH	CE (mg/L)	Redox (mV)	MO (mg/l)	PO ₄ (mg/L)	TDS (mg/L)	Fe (mg/L)
As (mg/L)	1							
Ph	0,03	1						
CE (mg/L)	-0,21	-0,17	1					
Redox (mV)	-0,22	-0,31	-0,01	1				
MO (mg/l)	-0,03	-0,23	0,48	-0,17	1			
PO ₄ (mg/L)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
TDS (mg/L)	-0,19	0,29	0,48	0,13	0,06	0,0	1	
Fe (mg/L)	0,12	0,05	0,01	-0,26	0,10	0,0	0,11	1

Isoterma de Langmuir

En la gráfica 10 indica que la adsorción de arsénico total presentó una capacidad máxima de **Q_m = 25,93 mg/g**, evidenciando una elevada disponibilidad de sitios activos en el adsorbente la constante de afinidad **KL = 0,09 L/mg** favorable entre el arsénico y la superficie del material, el coeficiente **R² = 0,999** validó un ajuste casi perfecto al modelo de Langmuir característico de un proceso de adsorción en monocapa.

Gráfico 4. Ajuste del Isoterma de Langmuir.



Langmuir	Parámetro	GC1	GC2	GM1	GM2	Gcu2
	$Q_{mL} (mg \cdot g^{-1})$	8,738	11,743	14,415	5,909	7,517
$q_e = \frac{Q_{mL} K_L C_E}{1 + K_L C_e}$	$K_L (L \cdot mg^{-1})$	0,021	0,030	0,023	0,045	0,006
	r^2	0,997	0,989	0,992	0,987	0,962

(Moreno Marengo, 2019).

14.5. Costos y beneficios del filtro multicapa

La tabla 7 presenta el presupuesto destinado a la implementación y evaluación del sistema de filtración, donde se detallan los principales insumos, servicios y costos asociados. El material filtrante (zeolita y la piedra caliza) representó un costo de USD 45,00 mientras que la adquisición de tela filtrante (10 metros) ascendió a USD 22,50. El carbón activado utilizado como medio adsorbente tuvo un costo de USD 2,50 y los coolers empleados para el almacenamiento y transporte de muestras alcanzaron USD 7,50 la compra de 30 botellas para el muestreo representó un valor de USD 4.50. El rubro de mayor incidencia correspondió al análisis de 30 muestras con 9 parámetros en laboratorio con un valor de USD 3.080,85 evidenciando que la mayor inversión estuvo orientada al control de calidad y validación de resultados. Los costos adicionales incluyeron transporte al lugar del muestreo de USD 10,00 en la ferretería la compra de (teflón, abrazaderas de 11-20 y 11-17, codo roscable de 1P, adaptador Flex de 1P adaptador hembra de 1/2, adaptador 3/4 a 1/2) un valor de USD 4,80, esponjas de lavar, cepillos y recipientes para poner el material filtrante para el uso en laboratorio un costo de USD 10,00. En conjunto, el costo total del proyecto ascendió a USD 7.642,65, reflejando que la mayor proporción del

presupuesto se destinó a la caracterización fisicoquímica del agua, aspecto clave para garantizar la confiabilidad del estudio.

Tabla 9. Costos de campo y laboratorio.

Concepto	Unidad	Costo \$
Material filtrante	10	45
Tela	10 metros	22,50
Carbón (kilogramos)	2	2,50
Cooler	2	7,50
Botellas	30	4,50
Análisis de los parámetros en laboratorio	30	3,080,85
Transporte		10,00
Ferretería		4,80
Esponja de lava platos	10	10,00
Total		7,642.65

Elaborado por: (Fonseca & Gonzalez, 2025)

El análisis de la relación beneficio–costo del sistema de implementado permitió establecer que el mantenimiento operativo se efectuó con una frecuencia de dos veces por semana durante un periodo de tres meses, sin posibilidad de recuperación económica de los materiales empleados, debido a su carácter consumible y desgaste funcional desde el punto de vista técnico, el sistema evidenció una capacidad efectiva de remoción de contaminantes contribuyendo a la mejora de los parámetros fisicoquímicos del agua tratada. En el ámbito sanitario se registró una optimización de la calidad del agua destinada al riego reduciendo riesgos potenciales asociados a la exposición a contaminantes no obstante, el beneficio económico resultó no cuantificable, al no generarse retornos monetarios directos ni ahorros financieros inmediatos derivados de su implementación, la evaluación económica determinó la inexistencia de un retorno financiero directo y la no recuperación total de la inversión, concluyéndose que la viabilidad del proyecto

se sustentó principalmente en sus beneficios técnicos, ambientales y sanitarios más que en su rentabilidad económica.

Tabla 10. Análisis de costos y beneficios del filtro multicapa.

Categoría	Concepto	Periodo	Valor (USD)
Mantenimiento	2 veces / semana	3 meses	No se recupera el material
Beneficios	Beneficio técnico	-	Remoción de contaminantes del agua
	Beneficio sanitario	-	Mejora de la calidad del agua de riego
	Beneficio económico	-	No cuantificable
Relación beneficio–costo	Evaluación económica	-	No existe retorno monetario
Periodo de recuperación	Recuperación de la inversión	-	No se recupera totalmente

Elaborado por: (Fonseca & Gonzales, 2025)

Discusión

Los resultados demostraron que el sistema de filtración multicapa mejoró significativamente la calidad fisicoquímica del agua de riego, aunque sin alcanzar completamente los límites normativos para arsénico. Inicialmente el agua presentó un estado de contaminación severa, principalmente por metales y carga iónica elevada, lo que representaba un riesgo para el suelo, los cultivos y la salud humana. La reducción simultánea de arsénico, hierro, materia orgánica, sólidos disueltos y conductividad eléctrica evidenció que el proceso dominante fue la adsorción en medios granulares combinada con retención física, confirmando el comportamiento descrito para filtros naturales de tratamiento de aguas agrícolas FAO, (2020); Villa et al., (2021). La estabilización del pH y el incremento del potencial redox indicaron además una mejora en la estabilidad química del agua, disminuyendo la biodisponibilidad de metales y, por tanto, su transferencia al sistema suelo-planta Rengel, (2020); Gómez, (2010).

El desempeño del sistema dependió principalmente de la composición del medio filtrante y del número de capas. El material reutilizado mostró eficiencias mínimas, mientras que el material

nuevo alcanzó remociones cercanas al 90 %, demostrando que la superficie activa disponible controla la capacidad adsorbente. Este comportamiento fue corroborado por el ajuste al modelo de Langmuir ($R^2 \approx 0,999$), que evidenció adsorción en monocapa sobre sitios homogéneos, característica típica de procesos químicos superficiales en adsorbentes minerales (Moreno Marengo, 2019). Sin embargo, la eficiencia disminuyó progresivamente por saturación del medio filtrante, fenómeno asociado a la obstrucción de poros y reducción de la conductividad hidráulica, lo cual coincide con lo descrito para filtros granulares que requieren mantenimiento periódico mediante lavado para recuperar su rendimiento WHO, (2022).

Las correlaciones débiles entre arsénico y el resto de parámetros confirmaron que su presencia responde principalmente a procesos geoquímicos independientes, mientras que la conductividad eléctrica se relacionó con materia orgánica y sólidos disueltos, indicando que la carga iónica del agua estuvo dominada por sales y compuestos orgánicos más que por condiciones de pH o redox. Esto explica por qué el sistema logró mejorar la calidad general del agua, pero no eliminar completamente el arsénico, ya que la remoción de metales metaloides depende de mecanismos específicos de adsorción más que de cambios globales en las propiedades fisicoquímicas. Finalmente, el análisis económico determinó que el costo total del proyecto ascendió a USD 7.642,65, concentrándose la mayor inversión en los análisis de laboratorio (USD 3.080,85), lo que reflejó la importancia asignada a la validación técnica de los resultados. Si bien no existió un retorno monetario directo ni recuperación total de la inversión, el sistema demostró beneficios técnicos, ambientales y sanitarios relevantes, sustentando su viabilidad principalmente desde una perspectiva de gestión sostenible del recurso hídrico más que desde un enfoque de rentabilidad económica.

15. Conclusiones

- El filtro de diez capas logró una remoción del 88% de arsénico en muestras de agua de la Junta de Tiliche San José, reduciendo su concentración a valores cercanos al límite permisible ($<0,01$ mg/L) establecido por la normativa TULSMA. Esto confirma su eficiencia y viabilidad técnica en condiciones reales, mejorando la calidad del agua y disminuyendo riesgos para la salud.
- El análisis de correlación mostró que el aumento de la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y la materia orgánica se asocia con un incremento de hasta 0,48 mg/L de arsénico en el agua. La mayor carga iónica, evidenciada por el incremento de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales, favorece la solubilidad y movilidad de las especies arsenicales; mientras que la materia orgánica contribuye a su

estabilidad en solución. En conjunto, estos parámetros influyen en la disponibilidad del arsénico y en su potencial riesgo para el uso del agua en riego agrícola.

- La evaluación de la capacidad de adsorción de arsénico del material filtrante multicapa, mediante la isoterma de Langmuir, mostró que el proceso se ajusta a un modelo de adsorción mono molecular, lo que indica la presencia de sitios activos homogéneos en la superficie del material. El alto coeficiente de correlación ($R^2 = 0,999$) confirma la validez del modelo, mientras que la capacidad máxima de adsorción ($q_m = 25,98$ mg/g) evidencia una alta afinidad del sistema por el arsénico y una adecuada eficiencia en su retención.
- El análisis costo-beneficio del filtro multicapa demostró que, aunque el sistema es eficiente en la remoción de arsénico, su viabilidad económica a largo plazo se ve limitada por los altos costos de operación y las exigencias de mantenimiento continuo.

16. Recomendaciones

- Implementar un protocolo integral de mantenimiento del filtro multicapa de los materiales filtrantes y del tiempo óptimo de lavado del sistema.
- Evaluar las distintas condiciones operativas y el tiempo de contacto para optimizar la capacidad de retención, así como su regeneración a fin de determinar la estabilidad estructural y la eficiencia en ciclos sucesivos, asegurando la viabilidad técnica y económica del proceso.
- Considerar la incorporación de pretratamientos físicos (rejillas o sedimentación) para reducir la carga orgánica antes del filtrado.
- Evaluar la implementación de estrategias complementarias que permitan mejorar la rentabilidad económica del sistema, como la optimización de procesos o la búsqueda de incentivos sanitarios y ambientales, y realizar un seguimiento a largo plazo para determinar si el beneficio sanitario justifica la inversión pese a la falta de retorno monetario inmediato.

17. Bibliografía

- Asif, M. (2012, 02 27). From <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591011005924?via%3Dihub>
- Cachipuendo, C., & Pacheco, A. (2025, 09 08). From https://www.mdpi.com/2073-4441/17/21/3037?utm_source
- education*. (2014). From *education*: https://www.mheducation.com/highered/product/wastewater-engineering-treatment-and-resource-recovery-metcalf-and-eddy.html?utm_source=chatgpt.com&viewOption=student
- Fonseca, M., & Gonzalez, F. (2025).
- Gómez, M. (2010). From https://www.academia.edu/91075609/Interpretaci%C3%B3n_de_procesos_redox_en_suelos_sulfatados_%C3%A1cidos_del_distrito_de_riego_del_Alto_Chicamocha_Boyac%C3%A1
- Haddade, I. R., & Monaco, P. A. (2024, 12 04). From https://www.mdpi.com/2624-7402/7/2/26?utm_source
- Huanca, J. W., & Arohuanca, S. B. (2020). From <https://www.aacademica.org/jesus.wiliam.huancaarohuanca/10.pdf>
- Ontiveros, R. E., Capurata, Diakite-Diakite, L., Álvarez-Sánchez, M. E., & Coras-Merino, P. M. (2012, 12 04). From https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222013000400008&script=sci_arttext
- Rojas-Rodríguez, I. S., Coronado-García, M. A., Rossetti-López, S. R., & Beltrán-Morales, F. A. (2020, 06 20). From https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792020000300247&script=sci_arttext
- Villa, O. R., Cortes, B. N., & Chulim, Á. C. (2021, 11 22). From <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2298>
- education*. (2014). From *education*: https://www.mheducation.com/highered/product/wastewater-engineering-treatment-and-resource-recovery-metcalf-and-eddy.html?utm_source=chatgpt.com&viewOption=student
- Fonseca, M., & Gonzalez, F. (2025).
- wikipedia.org*. (2012). From *wikipedia.org*: https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_arena?utm_source

- Alcocer Zuñiga, J. A., Córdova Alarcón, E. J., Hernández Zavala, A., Alcocer Zuñiga, J. A., Córdova Alarcón, E. J., & Hernández Zavala, A. (2024). Arsénico en agua y su impacto en la salud mexicana. *Epistemus (Sonora)*, 18(37). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i37.374>
- Ariza, J. D. G., & Peña, Y. O. (s. f.). *DISEÑO MECÁNICO DE SISTEMA PRODUCCIÓN ALIMENTARIA SOSTENIBLE Y CIRCULAR*.
- Baltazaca Ante, D. K., & Oña Masapanta, L. T. (2025). *Interacción del arsénico en el agua de riego y suelo agrícola en la Junta de Tliche de la provincia de Cotopaxi 2025*. [Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/15064>
- Bundschuh, J., Litter, M. I., Parvez, F., Román-Ross, G., Nicolli, H. B., Jean, J.-S., Liu, C.-W., López, D., Aurora Armienta, M., Guilherme, L. R. G., Gomez Cuevas, A., Cornejo, L., Cumbal, L., & Toujaguez, R. (2012). *One century of arsenic exposure in Latin America: A review of history and occurrence from 14 countries*. <https://repositorio.ufla.br/handle/1/42139>
- Casanovas @picaronablog, E. (2016, septiembre 5). La importancia del pH del agua de riego en el huerto • PicaronaBlog. *PicaronaBlog*. <https://www.picaronablog.com/materiales-huerto-urbano/riego/la-importancia-del-ph-del-agua-de-riego-en-el-huerto/>
- Hug, S. J., Winkel, L. H. E., Voegelin, A., Berg, M., & Johnson, A. C. (2020). Arsenic and Other Geogenic Contaminants in Groundwater – A Global Challenge. *CHIMIA*, 74(7-8), 524-524. <https://doi.org/10.2533/chimia.2020.524>
- Kumari, P. B., Singh, Y. K., Mandal, J., Shambhavi, S., Sadhu, S. K., Kumar, R., Ghosh, M., Raj, A., & Singh, M. (2021). Determination of safe limit for arsenic contaminated irrigation water using solubility free ion activity model (FIAM) and Tobit Regression Model. *Chemosphere*, 270, 128630. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128630>
- Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., Ramos-Bello, R., & Reyes-Ortigoza, A. L. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 28(1), 39-48.
- Naula Lema, C. C. (2024). “Remoción de arsénico en agua de uso agrícola utilizando un filtro, en la Junta de Tliche San José Provincia De Cotopaxi período 24-24” [Ecuador : Latacunga : Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)]. <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/123456789/12456>

- P, J. (2021, marzo 14). Caliza roca: Descripción, propiedades y características. *geotecniafacil.com*. <https://geotecniafacil.com/caliza-roca/>
- Rahman, M., Sohel, N., Yunus, F. M., Alam, N., Nahar, Q., Streatfield, P. K., & Yunus, M. (2019). Arsenic exposure and young adult's mortality risk: A 13-year follow-up study in Matlab, Bangladesh. *Environment International*, *123*, 358-367. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.006>
- Redox Potential*. (2009). 852-859. <https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00115-0>
- Shakeri, R., Amini, H., Fakheri, F., Lam, M. Y., & Zahraie, B. (2025). Comparative analysis of correlation and causality inference in water quality problems with emphasis on TDS Karkheh River in Iran. *Scientific Reports*, *15*(1), 2798. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-85908-0>
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002a). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, *17*(5), 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002b). A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, *17*(5), 517-568. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00018-5)
- Verma, S. (2025). Analysis and Correlation of Total Dissolved Solids (TDS) and Electrical Conductivity in Drinking Water Samples. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, *13*(11), 1245-1247. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.75304>
- Warden Biomedica*. (s. f.-a). Recuperado 9 de diciembre de 2025, de https://es.wardenbiomedica.com/process/filter.htm?utm_source=chatgpt.com
- Warden Biomedica*. (s. f.-b). Recuperado 9 de diciembre de 2025, de https://es.wardenbiomedica.com/process/filter.htm?utm_source=chatgpt.com
- Zeolita Natural | Absorbente Ecológico y Versátil—Sercalia. (s. f.). *sercalia.com*. Recuperado 9 de diciembre de 2025, de <https://sercalia.com/zeolita-natural/>
- Zeolita—Wikipedia, la enciclopedia libre*. (s. f.). Recuperado 9 de diciembre de 2025, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Zeolita>
- adasa*. (n.d.). From *adasa*: <https://www.adasasystems.com/es/tecnologia/medida-de-materia-organica.html#:~:text=El%20exceso%20de%20materia%20org%C3%A1nica,correspondientes%20para%20evitar%20da%C3%B1os%20medioambientales>.
- Alvaro. (2019, 9 17). From <https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/182-El-Arsenico-en-las-Aguas-de-Riego.pdf>

- Bolisetty, 2., & Jimenez, 2. (n.d.). From <https://www.chemistryworld.com/news/iodine-ion-drive-propels-satellite-in-space-for-the-first-time/4014793.article>
- Bujakiewicz, B. (2020, 09 25). From <https://www.infobae.com/america/medio-ambiente/2025/09/20/como-se-origina-el-color-naranja-en-los-rios-y-que-consecuencias-tiene-para-el-ecosistema/>
- carbotecnia*. (2022, 02 04). From *carbotecnia*: <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/filtracion-liquidos/>
- Dima, M. Z. (2022).
- Domínguez, C., & Quispe, P. (2023). From <https://www.proyectoinma.org/contaminacion-y-salud/contaminantes-ambientales/arsenico/>
- FAO. (1985). From FAO: <https://www.fao.org/4/t0234e/t0234e00.htm>
- Fonseca, M., & Gonzales, F. (2025, 11 26).
- Fonseca, M., & Gonzales, F. (2025, 12 09).
- Fonseca, M., & Gonzalez, F. (n.d.). Retrieved 12 09, 2025
- Fonseca, M., & Gonzalez, F. (2025, 12 09).
- Fonseca, M., & Gonzalez, F. (2025, 12 09).
- Fonseca, M., & Gonzalez, F. (2025).
- García-Rubio, D. R.-M. (2023).
- Geofantex*. (2023). From Geofantex: <https://es.geofantex.com/blog/que-es-el-material-de-tela-de-filtro/>
- Gerardo, M. T., & Katherine, Q. M. (2025, 06 18). From <https://rest-dspace.ucuenca.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e57e5903-9e9b-4774-8f21-a10b7cec0605/content>
- Ghazi. (2017).
- higieneambiental*. (2023, 05 17). From *higieneambiental*: <https://higieneambiental.com/calidad-del-agua-de-consumo-hierro#:~:text=El%20hierro%20y%20la%20calidad,lavaplatos%20o%20accesorios%20de%20plomer%C3%ADa.>
- inti* . (n.d.). From inti: <https://inti.pe/como-los-metales-pesados-afectan-el-desarrollo-de-los-cultivos/#:~:text=Los%20metales%20pesados%20como%20plomo%2C%20n%C3%ADquel%2C%20cadmio,acumularse%20y%20ser%20t%C3%B3xicos%20para%20los%20cultivos.>

- Lezama, A. (2024, 02 27). From file:///C:/Users/Downloads/Dialnet-UseOfCalciumZeoliteAsAnAbsorptionAgentForArsenicAn-9425467%20(2).pdf
- Mojiri, A. (2024). From <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2024.1301648/>
- Moreno Marenco, M.-P. (2019, 10 04). From file:///C:/Users/ANAHY/Downloads/lidiasirera,+07_4428_587%20(1).pdf
- OMS. (2019, 12 20). From OMS: https://www.who.int/publications/i/item/arsenic-in-drinking-water-background-document-for-development-of-who-guidelines-for-drinking-water-quality?utm_source=chatgpt.com
- Onyutha, C. (2024 , 03 08). From file:///C:/Users/ANAHY/Downloads/s42834-024-00209-x%20(1).pdf
- Organizacion mundial de la salud . (2022, 11 07). From Organizacion mundial de la salud : <https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/arsenic#:~:text=Panorama%20general,cut%C3%A1neas%20y%20c%C3%A1ncer%20de%20piel.>
- Pais, V., Mota, C., Bessa, J., Guilherme, J., Cunha, F., & Figueiro, R. (2021). From <https://doi.org/10.3390/ma14237147>
- Pandya, R. (2025, 02 27). From <https://www.coherentmarketinsights.com/blog/the-role-of-limestone-in-water-treatment-applications-and-benefits-972#:~:text=La%20piedra%20caliza%20se%20compone,impurezas%20y%20ablandar%20el%20agua.>
- pureaqua*. (2013, 10 10). From pureaqua: <https://es.pureaqua.com/blog/los-filtros-multimedia-o-multicapa-representan-una-mejora-significativa-con-respecto-a-los-filtros-de-un-solo-medio/#:~:text=Los%20filtros%20de%20profundidad%20multimedia,y%20la%20puesta%20en%20servicio.>
- Schwind, K. (n.d.). From <https://www.sigmaaldrich.com/EC/en/technical-documents/technical-article/environmental-testing-and-industrial-hygiene/soil-solid-waste-and-groundwater-testing/phosphate-in-groundwater-surface-water>
- Smith, J. (2020). Manual de procedimientos de laboratorio clínico (2.^a ed.). Editorial Científica. (n.d.).
- TULSMA . (2012, 4 11). From TULSMA: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

- Valdibieso, A. (2024). From [https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudal#:~:text=Un%20caudal%20se%20calcula%20mediante,volumen\)%20y%20t%20\(tiempo](https://www.iagua.es/respuestas/que-es-caudal#:~:text=Un%20caudal%20se%20calcula%20mediante,volumen)%20y%20t%20(tiempo)
- wikipedia.org*. (2012). From *wikipedia.org*: https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_de_arena?utm_source
- vitaqua*. (n.d.). From *vitaqua*: <https://vitaqua.es/que-es-la-conductividad-en-el-agua-y-como-afecta-al-tratamiento-de-aguas-residuales/#:~:text=La%20conductividad%20el%C3%A9ctrica%20del%20agua,de%20la%20salinidad%20del%20agua>.
- Zeonatec. (2023). From <https://sercalia.com/zeolita-natural/>

