



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS
SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO,
PARROQUIA DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI.**

Proyecto de Investigación presentando previo a la obtención del Título de Ingeniero
Ambiental

Autor:

González Cadena Ernesto Israel

Tutor:

Moreno Ávila Andrés Sebastián

LATACUNGA – ECUADOR

FEBRERO 2025

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

González Cadena Ernesto Israel, con cédula de ciudadanía No. 1720850625, declaro ser autor del presente Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO, PARROQUIA DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, siendo el Ingeniero Mg. Moreno Ávila Andrés Sebastián, Tutor del presente trabajo; y, eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

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

Latacunga, 20 de febrero del 2025



Ernesto Israel González Cadena

C.C: 1720850625

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 **GONZÁLEZ CADENA ERNESTO ISRAEL**, identificado con cédula de ciudadanía 1720850625 de estado civil soltero, a quien en lo sucesivo se denominará **EL 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. - **EL CEDENTE** es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado “**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO, PARROQUIA DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI**”, 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 2020 – Marzo 2021

Finalización de la carrera: Octubre 2024 – Marzo 2025

Aprobación en Consejo Directivo: 12 de diciembre del 2024 Tutor:

Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.

Tema: “**EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO, PARROQUIA DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI**”

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, **EL 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 **EL 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 **EL 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 **EL 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 **EL 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 21 días del mes de febrero del 2025.



Ernesto Israel González Cadena

EL CEDENTE

Dra. Idalia Pacheco Tigselema, Ph.D.

LA CESIONARIA

AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

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

“EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO, PARROQUIA DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”, Moreno Ávila Andrés Sebastián, de la carrera de Ingeniería Ambiental, considero que el presente trabajo investigativo es merecedor del Aval de aprobación al cumplir las normas, técnicas y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuestas en la pre-defensa.

Latacunga, 20 de febrero del 2025



Ing. Andrés Sebastián Moreno Ávila, Mg.
C.C: 0503220063
DOCENTE TUTOR

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, el postulante: González Cadena Ernesto Israel, con el título del Proyecto de Investigación: **“EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO, PARROQUIA DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**, ha 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, 20 de febrero del 2025



Lced. Patricio Clavijo Cevallos, M.Sc.
C.C.: 0501444582

LECTOR 1 (PRESIDENTE)



Lic. Kalina Marcela Fonseca Largo, M.Sc.
C.C.: 1723534457

LECTOR 2 (MIEMBRO)



Ing. Isaac Eduardo Cajas Cayo, M.Sc.
C.C.: 0502205164

LECTOR 3 (MIEMBRO)

AGRADECIMIENTO

A lo largo de este camino académico, he contado con el apoyo invaluable de personas que han sido fundamentales para la

culminación de esta tesis, a quienes deseo expresar mi más profundo agradecimiento.

En primer lugar, a mi madre, cuyo amor incondicional, sacrificio y constante apoyo han sido el pilar sobre el cual he construido mis sueños. Su dedicación y esfuerzo han sido mi mayor inspiración para seguir adelante.

A mi hermana Diana, por ser una guía en mi vida y motivarme siempre a convertirme en un profesional. Su ejemplo, consejos y enseñanzas han sido determinantes en mi formación personal y académica.

A mis hermanos Vicente y Andrea, por estar siempre dispuestos a brindarme su ayuda incondicional en cualquier circunstancia. Su apoyo y confianza han sido un gran respaldo en este proceso.

A mis cuñados Wagner y Fernando, por la colaboración y la ayuda brindada. Su apoyo ha sido una muestra del valor de la familia y la solidaridad.

Un especial reconocimiento al Ingeniero Andrés Moreno, mi tutor de tesis, por compartir conmigo su conocimiento, orientación y tiempo. Su guía ha sido clave para la culminación de esta investigación, permitiéndome desarrollar este trabajo con mayor claridad y precisión.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han contribuido a la realización de esta tesis EG. A todos ustedes, mi más sincera gratitud.

Ernesto Israel González Cadena

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico a mis ángeles, Leopoldo y Elvira, quienes, aunque ya no estén físicamente, siempre vivirán en mi corazón. Su recuerdo y enseñanzas me han acompañado en cada paso de este camino.

A mi familia, cuyo esfuerzo, sacrificio y amor incondicional han sido la base de mi crecimiento personal y profesional. Gracias por creer en mí y brindarme el apoyo necesario para alcanzar mis metas.

Finalmente, dedico este trabajo a un mejor futuro, con la esperanza de que este sea solo el inicio de nuevos desafíos y logros.

Ernesto Israel González Cadena

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**TÍTULO: “EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR ARSÉNICO EN LOS
SUELOS ADYACENTES AL RÍO BLANCO EN EL BARRIO PINTZE CHICO, PARROQUIA
DE TOACASO, PROVINCIA DE COTOPAXI”**

Autor:

González Cadena Ernesto Israel

RESUMEN

La presente investigación evalúa la contaminación por arsénico en los suelos adyacentes al río Blanco, en la parroquia de Toacaso, Cotopaxi, con el propósito de determinar su impacto ambiental y los posibles riesgos para la salud humana. La problemática radica en la presencia de metales pesados en suelos volcánicos, lo que motivó un estudio detallado para comprender la magnitud y distribución del arsénico en la zona. Mediante un enfoque transversal, se recolectaron muestras de suelo en puntos estratégicos, las cuales fueron analizadas mediante espectrofotometría UV-visible y absorción atómica, permitiendo una caracterización química precisa del área de estudio. Los resultados mostraron que la mayoría de las muestras superan los límites permisibles establecidos en la normativa ecuatoriana, con concentraciones que alcanzan hasta 36 mg/kg, más del triple del umbral permitido. Se identificó que la acidez del suelo y su baja materia orgánica favorecen la solubilidad del arsénico, incrementando su biodisponibilidad y potencial toxicidad. Asimismo, se determinó que la geología volcánica de los Ilinizas podría estar contribuyendo a la liberación natural del metal, lo que enfatiza la necesidad de comprender la interacción entre procesos geogénicos y edáficos. Estos hallazgos evidencian un riesgo ambiental significativo, con posibles repercusiones en la salud pública y la seguridad alimentaria, ya que el arsénico puede incorporarse a la cadena trófica a través de los cultivos. Ante esta situación, se recomienda implementar estrategias de monitoreo continuo y aplicar métodos de remediación como la fitorremediación, además de

fortalecer la regulación ambiental y promover la concienciación en la comunidad local para minimizar la exposición y prevenir impactos adversos en el ecosistema.

Palabras Clave: Absorción Atómica, Arsénico, Contaminación, Espectrofotometría UVVisible, Factores Edáficos, Fitorremediación, Geología

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TITLE: “EVALUATION OF ARSENIC CONTAMINATION IN SOILS ADJACENT TO THE BLANCO RIVER IN THE PINTZE CHICO NEIGHBORHOOD, TOACASO PARISH, COTOPAXI PROVINCE”

Author:

González Cadena Ernesto Israel

ABSTRACT

This research evaluates arsenic contamination in soils adjacent to the Blanco River in the parish of Toacaso, Cotopaxi, to determine its environmental impact and risks to human health. The problem lies in the presence of heavy metals in volcanic soils, which motivated a detailed study to understand the magnitude and distribution of arsenic in the area. Using a cross-sectional approach, soil samples were collected at strategic points and analyzed by UV-visible spectrophotometry and atomic absorption, allowing a precise chemical characterization of the study area. The results showed that most of the samples exceeded the permissible limits established in Ecuadorian regulations, with concentrations reaching up to 36 mg/kg, more than three times the permitted threshold. It was identified that the acidity of the soil and its low organic matter favor the solubility of arsenic, increasing its bioavailability and potential toxicity. It was also determined that the volcanic geology of the Ilinizas could be contributing to the natural release of the metal, which emphasizes the need to understand the interaction between geogenic and edaphic processes. These findings indicate a significant environmental risk, with repercussions on public health and food safety since arsenic can be incorporated into the trophic chain through crops. In view of this situation, it is recommended to implement continuous monitoring strategies and apply remediation methods such as phytoremediation, in addition to strengthening environmental regulation and promoting awareness in the local community to minimize exposure and prevent adverse impacts on the ecosystem.

Key Words: Atomic Absorption, Arsenic, Contamination, UV-Visible Spectrophotometry, Edaphic Factors, Phytoremediation, Geology

Índice de Contenidos

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR	iii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	vi
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN	vii
AGRADECIMIENTO	viii
DEDICATORIA	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
Índice de Contenidos	xii
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
1 INFORMACIÓN GENERAL	1
2 INTRODUCCIÓN	2
3 JUSTIFICACIÓN	4
4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	6
4.1 Beneficiarios	6
4.1.1 Comunidades locales de Toacaso:	6
4.1.2 Junta de Aguas de Toacaso:	6

	4.2 Beneficiarios	Indirectos
	.....	6
	4.2.1 Especies étnicas del páramo y habitantes de la Parroquia:	.....
	6	
5	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	..... 7
6	OBJETIVOS	..... 8
	6.1 General:	..... 8
	6.2 Específico:	..... 8
7	ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS DE RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	..... 8
8	HIPÓTESIS	..... 10
	8.1 Hipótesis	..... 10 principal
	8.2 Hipótesis	nula (H ₀)
	8.3 Hipótesis	alternativa (H ₁)
	8.4 Variables	..... 10
	8.4.1 Variable Independiente	..... 10
	8.4.2 Variable Dependiente	..... 11
9	FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA	..... 11
	9.1 Arsénico y su Impacto en el Ambiente	..... 11
	9.2 Arsénico en Suelos	..... 11
	9.3 Suelo	..... 12

9.3.1	Propiedades del suelo	12
9.3.2	Propiedades Físicas del Suelo.....	13
9.3.3	Propiedades Químicas del Suelo	13
9.3.4	Propiedades Microbiológicas del Suelo	14
9.3.5	Composición Fisicoquímica del suelo	14
9.3.6	Tipos de Suelos predominantes en Ecuador	15
9.4	Calidad del Suelo y su Conservación	15
9.5	Uso de Software para el Análisis de Suelos	16
9.5.1	QGIS en Estudios de Impacto Ambiental	16
9.6	Marco Legal	16
9.6.1	Constitución de la República del Ecuador	16
9.6.1.1	Artículos de preservación Ambiental	17
9.6.2	Acuerdo Ministerial 097-A (2015)	18
9.6.3	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)	19
9.6.4	Código Orgánico del Ambiente (COA)	19
9.6.5	Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)	20
9.6.6	Ley de Gestión Ambiental	20

9.6.7	Acuerdo Ministerial No. 061 (2015)	20
9.6.8	Normas INEN	20
10	ÁREA DE ESTUDIO	20
11	METODOLOGÍA	22
	11.1 Tipo de Investigación	22
	11.2 Recolección de Muestras de Suelo	23
	11.2.1 Coordenadas de la zona de Pintze Chico	24
	11.2.2 Tratamiento para Análisis de Muestras	25
	11.3 Fase de Laboratorio Cualitativo y Cuantitativo	26
	11.4 Análisis cuantitativo para arsénico mediante el método de Absorción Atómica (AAS)	29
	11.5 Metodología para la elaboración del Diagrama de PRISMA	31
12	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	32
	12.1 Resultados basados en el Diseño de Investigación	33
	12.2 Caracterización Física del Suelo mediante bibliografía	34
	12.3 Caracterización Química del Suelo	34
	Tabla 6 <i>Análisis Químico en muestra de Toacaso</i>	35
	12.4 Comparación de Valores de la Caracterización Química del Suelo	36
	12.5 Resultados del análisis de arsénico de cada muestra por UV-Visible	37

	12.6	Resultados del análisis de arsénico mediante Absorción Atómica.....	39
	12.7	Comparación química del suelo con Arsénico	40
	12.8	Análisis Estadístico	41
	12.9	Análisis de la influencia de los factores edáficos en la movilidad de arsénico .	43
en el suelo	12.10	Relación entre la geología volcánica de los Ilinizas y la presencia de arsénico	44
	12.11	Estrategias para Remediación en Suelos Contaminados por Arsénico en base a su aplicabilidad	45
	12.11.1	Comparación de Métodos de Remediación	45
	12.11.2	Diagrama de PRISMA	49
13		COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS	51
14		CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
	14.1	Conclusiones	52
	14.2	Recomendaciones	53
15		REFERENCIAS	54

Índice de Tablas

Tabla 1 Actividades en relación con los Objetivos	8
Tabla 2 Valores Máximos Permisibles	18
Tabla 3 Parámetro de arsénico inorgánico en suelos	19
Tabla 5 Coordenadas de la Zona de Estudio	24
Tabla 6 <i>Análisis Químico en muestra de Toacaso</i>	35
Tabla 7 Comparación de los análisis químicos de muestra de suelo de Toacaso con valores de la normativa	36
Tabla 8 Resultado del análisis de arsénico mediante Absorción Atómica	39
Tabla 9 Análisis estadístico mediante t-Student	41
Tabla 10 Prueba t-Student para la diferencia entre la concentración observada y esperada de arsénico	42
Tabla 11 Comparación de Métodos de Fitorremediación.....	46
Tabla 12 Comparación de Métodos de Biorremediación	47
Tabla 13 Comparación de Métodos de Biochar	48

Índice de Figuras	
Figura 1 Parroquia de Toacaso	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2 Puntos de Muestreo riveras del Río Blanco	25
Figura 3 Curva de Calibración para la Cuantificación de Arsénico	29
Figura 4 Diagrama de Flujo UV-Visible	30
Figura 5 Diagrama de Flujo Absorción Atómica	32
Figura 6 <i>Análisis de concentración de arsénico mediante espectrofotometría UV-visible</i>	39
Figura 7 Comparación de la concentración de arsénico en suelo de Toacaso con la normativa ecuatoriana.....	41
Figura 8 Comparación de la concentración observada y esperada de arsénico en suelo ...	43
Figura 9 Comparación de la concentración observada y esperada de arsénico en muestras de suelo.....	44
Figura 10 Diagrama de Prisma	50

1 INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto: “Evaluación de la Contaminación por Arsénico en los Suelos Adyacentes al Río Blanco en el Barrio Pintze Chico, Parroquia de Toacaso, Provincia de Cotopaxi”

Fecha de inicio: Octubre del 2024

Fecha de finalización: Febrero del 2025

Lugar de ejecución: Pintze Chico, Toacaso, Latacunga, Cotopaxi

Institución: Universidad Técnica de Cotopaxi

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia: Ingeniería Ambiental

Nombres del equipo de trabajo:

Ing. Mg., Andrés Sebastián Moreno Ávila

Ernesto Israel González Cadena

Área de conocimiento: Estudio de Impacto Ambiental

Línea de Investigación: Contaminación Ambiental

Línea de Vinculación: Gestión y Mitigación Ambiental con Enfoque Comunitario

2 INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es un metal pesado tóxico presente de forma natural en la corteza terrestre, cuya elevada concentración en suelos y aguas ha generado preocupación a nivel mundial por sus impactos en la salud humana y el medio ambiente. Tradicionalmente, se ha asociado la presencia de arsénico con actividades antropogénicas como la minería, el uso de pesticidas y fertilizantes; sin embargo, en la región de Toacaso se evidencia que la principal fuente de este contaminante es de origen geogénico, derivada de la liberación natural de arsénico desde la actividad volcánica y la composición mineralógica de los Ilinizas.

Los Ilinizas, un complejo volcánico ubicado en la Cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos, han sido una fuente natural de elementos químicos que influyen en la composición del suelo en sus alrededores. Las formaciones geológicas de origen volcánico contienen altos niveles de minerales arsenicales, como la arsenopirita (FeAsS), realgar (As_4S_4) y oropimente (As_2S_3), los cuales pueden ser liberados al medio ambiente a través de procesos de erosión y disolución química. A lo largo del tiempo, estos minerales se han movilizado hacia los suelos y cuerpos de agua de la parroquia de Toacaso, incluyendo el río Blanco, afectando indirectamente a las comunidades rurales que dependen de estos recursos para la agricultura y el consumo diario (Rodríguez-Lado et al., 2013).

Esta investigación planteó, por un lado, la necesidad de evaluar la calidad del suelo a través de un análisis integral de sus propiedades químicas, y por otro, la de comprender cómo los procesos geológicos asociados a los Ilinizas influyen en la liberación de arsénico. Así, el estudio no solo se centra en comparar los niveles obtenidos con la normativa ambiental, sino en contextualizar la problemática dentro de un marco en el que las fuentes naturales juegan un papel determinante, interactuando con las prácticas agrícolas locales.

La exposición crónica a altos niveles de arsénico puede causar una variedad de problemas de salud, incluyendo lesiones cutáneas, cáncer y daño neurológico (Galán & Romero, 2008). Asimismo, la contaminación por arsénico tiene implicaciones significativas para la productividad agrícola, la salud de los ecosistemas y el desarrollo económico.

La ingestión de arsénico a lo largo de la cadena alimentaria puede llevar a una pérdida sustancial de salud. Esto incluye una variedad de enfermedades, como el cáncer de piel, pulmón, vejiga y varias enfermedades cardiovasculares (Smedley & Kinniburgh, 2002; Mandal & Suzuki, 2020). Las investigaciones recientes han demostrado que la contaminación por arsénico en los suelos puede estar asociada a la geología de la región (Nath et al., 2009; Zhao et al., 2020).

Estos hallazgos recalcan la necesidad de una gestión integral de los recursos hídricos y del suelo para mitigar los impactos ambientales y de salud pública. El arsénico en suelos puede movilizarse a través de varios mecanismos, incluyendo la lixiviación, la erosión y la volatilización. Estos procesos son influenciados por factores ambientales como el pH del suelo, la materia orgánica y las condiciones redox (Smith et al., 1998).

Los estudios han mostrado que en suelos ácidos y con baja materia orgánica, la movilidad del arsénico puede ser mayor, acrecentando el riesgo de contaminación de las aguas subterráneas (Matschullat, 2000). En Ecuador, la problemática del arsénico no solo se limita a sus efectos tóxicos directos, sino que también implica desafíos socioeconómicos y políticos. Las comunidades rurales que dependen del agua del río Blanco para sus actividades agrícolas enfrentan un riesgo elevado de exposición al arsénico, lo que puede afectar su salud y su seguridad alimentaria (Bundschuh et al., 2012).

El marco regulatorio ecuatoriano necesita fortalecerse para abordar eficazmente la contaminación por arsénico. La implementación de políticas públicas basadas en evidencia científica y la promoción de prácticas agrícolas sostenibles son esenciales para proteger la salud de las comunidades y preservar el medio ambiente. Programas de educación y concienciación pueden empoderar a las comunidades locales para adoptar medidas preventivas y exigir acciones gubernamentales (Hug et al., 2021).

La presencia de arsénico en el suelo es un problema ambiental y de salud con efectos negativos a corto y largo plazo. Este elemento químico se encuentra de forma natural en la corteza terrestre. Los problemas asociados con el arsénico generan que las plantas tengan limitaciones en el desarrollo y crecimiento porque afecta a la absorción de los nutrientes, eso reduce el rendimiento

agrícola en la zona. Asimismo, la contaminación de los alimentos se da cuando las plantas absorben arsénico desde el suelo, se acumula en las raíces, frutos y hojas lo que conlleva a una contaminación alimentaria que ha puesto en riesgo la salud humana. Entre los riesgos más relevantes está el cáncer de piel, pulmón, vejiga y riñones; las enfermedades cardiovasculares, daños en el sistema nervioso; y, los trastornos digestivos como vómitos, dolor abdominal y diarrea.

En los suelos adyacentes al río Blanco, ubicados en el barrio Pintze Chico, se han detectado niveles de arsénico que en la mayoría de las muestras superan el límite permisible establecido por la normativa ecuatoriana (12 mg/kg), siendo la muestra 1 la que presenta la concentración más elevada (36 mg/kg). Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar los procesos naturales que influyen en la movilización y concentración del arsénico, tales como la acidez del suelo y la baja materia orgánica, factores que potencian su biodisponibilidad.

3 JUSTIFICACIÓN

La contaminación por arsénico en suelos representa un problema de gran trascendencia tanto para la salud pública como para la productividad agrícola y la integridad de los ecosistemas. En contextos tradicionales, este contaminante se ha vinculado mayormente a actividades antropogénicas, como el uso excesivo de pesticidas y fertilizantes; sin embargo, en la parroquia de Toacaso, la evidencia indica que la principal fuente de arsénico es de origen natural, derivada de la actividad volcánica y la composición mineralógica de los Ilinizas.

La liberación de arsénico desde fuentes geológicas es un fenómeno documentado en regiones volcánicas activas y extintas. En el caso de los Ilinizas, los procesos hidrotermales y la descomposición de minerales ricos en arsénico han permitido la dispersión de este elemento en el suelo y en cuerpos de agua superficiales. La movilidad del arsénico en los suelos de Toacaso se ve favorecida por las condiciones edáficas locales, como un pH ligeramente ácido y bajos niveles de materia orgánica, factores que facilitan la solubilización del arsénico y su incorporación en la cadena trófica a través de los cultivos agrícolas. Por lo tanto, comprender la interacción entre los procesos geológicos y las características del suelo es clave para el desarrollo de estrategias efectivas de monitoreo y mitigación.

Los niveles de arsénico encontrados en las muestras, que en la mayoría de los casos superan el límite permisible de 12 mg/kg –alcanzando en algunos casos concentraciones de hasta 36.20 mg/kg– revelan una situación de contaminación significativa. Esta alta concentración se ve amplificada por las características intrínsecas del suelo, como su acidez, la baja presencia de materia orgánica y una limitada capacidad para retener nutrientes, factores que facilitan la movilización y acumulación natural del arsénico. Por ello, es imprescindible comprender la interacción entre estos procesos geogénicos y las condiciones edáficas para poder desarrollar estrategias de manejo y mitigación adecuadas.

Igualmente, la presencia de arsénico en niveles tan elevados implica riesgos directos para la salud de la población local, ya que este metal pesado altamente tóxico puede ingresar a la cadena alimentaria a través de los cultivos, afectando la seguridad alimentaria y generando potenciales problemas de salud a largo plazo. Este contexto exige un abordaje que no se limite únicamente a medidas correctivas sobre las actividades humanas, sino que también integre la dinámica natural del entorno, lo que resulta esencial para la formulación de políticas públicas y estrategias de manejo ambiental que sean realistas y sostenibles.

Por otro lado, este estudio aporta de manera significativa al conocimiento científico, ya que la revisión de casos en los que la liberación natural de arsénico predomina aún es escasa en la literatura, especialmente en regiones con características similares a las de Toacaso. La información generada no solo permitirá evaluar la situación actual del suelo, sino que también contribuirá a la construcción de un marco de referencia para futuras investigaciones y para el diseño de estrategias de remediación que contemplen tanto los procesos naturales como las prácticas agrícolas locales. En definitiva, abordar esta problemática de manera integral es fundamental para proteger la salud de la comunidad y asegurar la sostenibilidad de los recursos naturales en la región.

4 BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

4.1 Beneficiarios Directos

4.1.1 Comunidades locales de Toacaso:

Los principales beneficiarios directos son los 7591 habitantes de la parroquia de Toacaso, en la provincia de Cotopaxi, según el último censo del GAD parroquial. Estas comunidades dependen en gran medida de la agricultura, ya que el 83.06% de los suelos se destinan a esta actividad. La identificación de la presencia y concentración de arsénico en los suelos permitirá a los agricultores y residentes tomar medidas preventivas para proteger su salud y garantizar la seguridad de sus cultivos (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Toacaso, 2024).

4.1.2 Junta de Aguas de Toacaso:

Este organismo, que ha colaborado en el estudio, se beneficiará al obtener datos precisos sobre la contaminación por arsénico. Esta información es esencial para la gestión adecuada de los recursos hídricos y para implementar estrategias que mitiguen posibles riesgos asociados al uso de agua contaminada en actividades agrícolas y de consumo humano.

4.2 Beneficiarios Indirectos

4.2.1 Especies étnicas del páramo y habitantes de la Parroquia:

El ecosistema del páramo en Toacaso alberga flora como el pajonal (*Stipa ichu*) y la almohadilla (*Plantago rigida*), y fauna que incluye lobos (*Pseudalopex culpaeus*), conejos (*Silvilagus brasiliensis*) y zorros (*Lycalopex culpaeus reissii*). La reducción de la contaminación por arsénico contribuirá a la conservación de estas especies y al equilibrio ecológico del páramo, evitando la bioacumulación de metales pesados en el suelo que pueden ser absorbidos por las plantas agrícolas que sirven como consumo para el ser humano. Los beneficiarios del trabajo de investigación alcanzan las 2830 familias (11037 habitantes / 3.9 personas por hogar) que actualmente existen en la Parroquia de Toacaso, Provincia de Cotopaxi (Herrera, 2021).

5 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El arsénico es un metal pesado tóxico presente de forma natural en suelos y aguas subterráneas, cuya exposición prolongada puede generar graves efectos en la salud humana y en la calidad ambiental. En la parroquia de Toacaso, provincia de Cotopaxi, se ha identificado la presencia de arsénico en los suelos aledaños al río Blanco, una fuente de agua vital para la

comunidad, utilizada tanto para el riego agrícola como para otras actividades cotidianas (Podgorski & Berg, 2020).

Una de las posibles fuentes de esta contaminación es el sistema volcánico de los Ilinizas, que debido a su composición mineralógica podría estar liberando arsénico en el suelo y el agua de manera natural. Sin embargo, en el barrio Pintze Chico, una comunidad que depende del agua del río Blanco para sus cultivos, la presencia de arsénico en el suelo y el agua plantea preocupaciones sobre su impacto en la salud de las personas y en la producción agrícola. El arsénico inorgánico, altamente tóxico, tiene la capacidad de acumularse en los cultivos, afectando la seguridad alimentaria de las familias de la zona (Mandal & Suzuki, 2020).

Las comunidades rurales de Toacaso han dependido históricamente de sus tierras y del agua del río para su sustento, sin saber si el suelo y el agua que utilizan pueden representar un riesgo. La ingestión prolongada de arsénico, incluso en bajas concentraciones, está relacionada con enfermedades graves como el cáncer de piel, pulmón y vejiga, así como con problemas cardiovasculares y neurológicos. Esto hace que la situación no solo sea un problema ambiental, sino también una preocupación de salud pública (Hug et al., 2021).

El problema que se ha descrito fue la presencia de arsénico en los suelos adyacentes al Río Blanco en el barrio Pintze chico, Parroquia de Toacaso, Provincia de Cotopaxi, al ser un problema complejo y de largo alcance porque tiene efectos devastadores para la salud humana y el medio ambiente. Entre los riesgos para la salud humana está el cáncer de piel, pulmones, vejigas y riñones. Asimismo, daño al sistema nervioso, enfermedades cardiovasculares, manchas y engrosamiento en la piel de los habitantes de la parroquia han generado preocupación en la población de la comunidad.

La importancia del trabajo de investigación busca el desarrollo de soluciones mediante el tratamiento, monitoreo, análisis del suelo, educación y sensibilización mediante una capacitación y formación a las familias del barrio Pintze chico, Parroquia de Toacaso, Provincia de Cotopaxi.

6 OBJETIVOS

6.1 General:

Evaluar la presencia de arsénico en los suelos aledaños al Río Blanco en la Parroquia de Toacaso, Provincia de Cotopaxi, mediante el uso de técnicas analíticas como la espectrofotometría UV-Visible y la Absorción Atómica.

6.2 Específico:

- ✓ Caracterizar químicamente la zona de estudio mediante el análisis de parámetros edáficos del suelo aledaño al Río Blanco en la Parroquia de Toacaso.
- ✓ Cuantificar la concentración de arsénico en muestras de suelo mediante espectrofotometría UV-visible y Absorción Atómica.
- ✓ Sugerir estrategias de remediación para la contaminación por arsénico en suelos y su potencial de aplicabilidad en la zona de estudio.

7 ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS DE RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

Tabla 1 *Actividades en relación con los Objetivos*

Objetivo Específico	Metodología	Actividades	Resultados Esperados
Caracterizar químicamente la zona de estudio mediante el análisis de parámetros edáficos del suelo aledaño al Río Blanco en la Parroquia de Toacaso.	Exploratoria y descriptiva: levantamiento de información en campo y revisión de literatura científica y técnica sobre las características químicas de la zona.	- Planificación de visitas de campo para identificar características químicas y fuentes potenciales de contaminación. - Revisión documental sobre actividades	Un perfil químico detallado de la zona, incluyendo posibles fuentes de contaminación por arsénico.

		<p>contaminantes en la zona.</p> <p>- Se entrevistó a pobladores y autoridades locales para recopilar información sobre prácticas históricas que pudieran haber contribuido a la contaminación.</p>	
<p>Cuantificar la concentración de arsénico en muestras de suelo mediante espectrofotometría UV-visible y Absorción Atómica.</p>	<p>Cuantitativa: análisis de laboratorio empleando espectrofotometría UV-visible para determinar las concentraciones de arsénico en las muestras de suelo.</p>	<p>-Se seleccionaron estratégicamente los puntos de muestreo basándose en las zonas más propensas a la contaminación, considerando la cercanía al río y actividades humanas.</p> <p>-Se recolectaron las muestras siguiendo protocolos estándar para evitar contaminación cruzada, utilizando equipos desinfectados y etiquetando cuidadosamente cada muestra.</p>	<p>Datos cuantitativos sobre la concentración de arsénico en el suelo, expresados en mg/kg o µg/g según normativa.</p>

Sugerir estrategias de remediación para la contaminación por arsénico en suelos y su potencial de aplicabilidad en la zona de estudio.	Comparativa: Recopilación y tabulación de los datos obtenidos en el estudio (concentraciones de arsénico y parámetros edáficos como pH, materia orgánica y capacidad de intercambio), y comparar estos valores con la normativa ambiental vigente.	- Realización de una revisión bibliográfica enfocada en los procesos geogénicos asociados a la liberación natural de arsénico, especialmente en relación con la actividad y composición de los Ilinizas; relacionar estos hallazgos con la información experimental.	Tendencias y correlaciones entre las variables edáficas y las concentraciones de arsénico, determinando cuáles de estos parámetros facilitan la movilización del metal pesado en el suelo. Grado de influencia de los procesos naturales (liberación de arsénico a partir de los Ilinizas) en los
		-Búsqueda de bibliografía que hable sobre métodos de remediación de arsénico en suelos, filtrando la información por relevancia, costo y aplicabilidad en zonas rurales.	niveles de contaminación, complementando la interpretación de los datos edáficos. Diagrama de PRISMA para la comparación de fuentes bibliograficas

Elaborado. Autor

8 HIPÓTESIS

8.1 Hipótesis principal

"Las concentraciones de arsénico en los suelos aledaños al Río Blanco en la parroquia de Toacaso superan el límite permisible de 12 mg/kg debido a la influencia de fuentes geogénicas y en menor medida las actividades antropogénicas como la actividad agrícola, lo que genera impactos negativos en la calidad del suelo y en la salud pública."

8.2 Hipótesis nula (H_0)

"No existen diferencias significativas entre las concentraciones de arsénico en los suelos de Toacaso y los valores de referencia establecidos en la normativa ecuatoriana."

8.3 Hipótesis alternativa (H_1)

"Las concentraciones de arsénico en los suelos de Toacaso superan significativamente los valores de referencia establecidos en la normativa ecuatoriana TULSMA, 2023, lo que indica una contaminación relevante en la zona."

8.4 Variables

8.4.1 Variable Independiente

- La concentración de arsénico detectada en las muestras de suelo.

8.4.2 Variable Dependiente

- Los factores geológicos, como la geogenia y la actividad volcánica de la zona que incluyen la liberación natural de arsénico proveniente de los Ilinizas.

9 FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA

9.1 Arsénico y su Impacto en el Ambiente

El arsénico (As) es un componente natural de la corteza terrestre que se encuentra ampliamente distribuido en el medio ambiente, incluyendo el aire, el agua y el suelo. Además, puede causar contaminación debido a actividades humanas Medina-Pizzali et al. (2018). Según la Organización Mundial de la Salud (2022), el arsénico inorgánico es reconocido como un agente cancerígeno comprobado. Este elemento se ha convertido en uno de los contaminantes químicos más críticos a nivel global, especialmente en el agua potable, donde representa una amenaza significativa para la salud pública.

El arsénico ha sido objeto de estudio como contaminante ambiental desde hace décadas, debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente. Históricamente, se ha utilizado en diversas aplicaciones industriales, lo que ha llevado a su acumulación en fuentes de agua y suelos.

La contaminación por arsénico en aguas subterráneas ha sido reconocida como un problema de salud pública en muchas regiones del mundo, afectando a millones de personas. Investigaciones recientes han manifestado que la exposición prolongada al arsénico inorgánico puede causar efectos adversos significativos en la salud, incluyendo cáncer y enfermedades cardiovasculares (Podgorski & Berg, 2020).

9.2 Arsénico en Suelos

El arsénico en los suelos constituye un problema ambiental significativo debido a su toxicidad y persistencia. Este elemento está presente naturalmente o por actividades humanas como la minería, movilizándose en el ambiente y contaminando fuentes de agua, causando la acumulación en los cultivos agrícolas. Las principales causas son; la explotación minera y el uso de fertilizantes y pesticidas contaminados (World Health Organization: WHO, 2022)

Los suelos de origen volcánico, como los que predominan en Toacaso, presentan características particulares que favorecen la presencia de arsénico en concentraciones elevadas. Estudios realizados en suelos formados a partir de cenizas volcánicas han demostrado que estos materiales pueden contener hasta 100 mg/kg de arsénico, dependiendo de la composición mineralógica y del grado de meteorización de las rocas parentales. En este contexto, la contaminación por arsénico en Toacaso no puede atribuirse exclusivamente a fuentes antropogénicas, sino que debe considerarse la contribución de los procesos geológicos en la acumulación de este elemento en el suelo.

Las consecuencias son graves, afectando la salud humana a través de la cadena alimentaria y provocando la degradación de los ecosistemas. Las estrategias de remediación, como el uso de fitorremediadores y la agricultura sostenible, son esenciales para mitigar su impacto (Blanco et al., 2018; Villa et al., 2020).

9.3 Suelo

El suelo es la capa más externa de la corteza terrestre compuesta principalmente de fragmentos de roca que resultan de procesos erosivos y otras alteraciones tanto físicas como químicas, además de materia orgánica producto de la actividad biológica en la superficie. Es la

parte más visible de la Tierra y una superficie extremadamente variada donde ocurren fenómenos climáticos como la lluvia y el viento (Día Mundial del Suelo de 2022: La FAO Publica el Primer Informe Mundial Sobre Suelos Negros, 2022)

Los suelos se forman a partir de la desintegración de rocas y la acumulación de diversos materiales a lo largo de siglos, en un proceso que incluye múltiples factores físicos, químicos y biológicos. Esto resulta en una disposición en capas bien definidas, similar a una torta, que puede observarse en áreas de falla o fractura de la corteza terrestre. (European Environment Agency, 2019).

9.3.1 Propiedades del suelo

En cuanto a sus propiedades físicas, la textura, estructura y porosidad son fundamentales, ya que afectan directamente la retención de agua y la aireación, los factores clave para el crecimiento de las plantas. Químicamente, el suelo contiene nutrientes vitales como nitrógeno, fósforo y potasio, indispensables para los cultivos agrícolas (Álvarez-González et al., 2021).

9.3.2 Propiedades Físicas del Suelo

Las condiciones normales y sin contaminación, las propiedades físicas del suelo en el Ecuador son cruciales para su utilización tanto agrícola como ecológica. Estas propiedades están determinadas por su textura, estructura, densidad y capacidad de retención de agua. La textura del suelo que se basa en la proporción de arena, limo y arcilla; y, es fundamental para la infiltración y almacenamiento de agua, eso hace adecuado para la agricultura en diversas regiones del país como la costa y la sierra (Gómez et al., 2020).

La estructura del suelo está definida por la disposición de sus partículas, estas influyen en la aireación y la penetración de las raíces, creando un entorno favorable para el crecimiento de las plantas. En Ecuador, los suelos sin contaminación, que presentan una estructura granular bien desarrollada, suelen tener una buena capacidad de intercambio de nutrientes y retención de humedad. Esto es particularmente favorable para cultivos de ciclo corto y de exportación, como el cacao y el banano (Martínez & Torres, 2021).

9.3.3 Propiedades Químicas del Suelo

Los suelos en Ecuador, cuando no han sido afectados por contaminantes, muestran una composición química favorable para las actividades agrícolas, exhibiendo niveles apropiados tanto de nutrientes fundamentales como de otros componentes. Los niveles de nitrógeno total oscilan típicamente entre 0.1% y 0.5%, con variaciones según la región y las características específicas del terreno, proporcionando una base nutricional adecuada para el desarrollo de cultivos básicos (Rojas & Espinoza, 2021).

El fósforo disponible en suelos fértiles de Ecuador fluctúa entre 10 y 30 mg/kg, un rango adecuado para el desarrollo de plantas y óptimo para suelos con cultivos de alto rendimiento (Molina et al., 2020).

Los niveles de potasio disponible para intercambio en el suelo se encuentran en un rango de 0.3 a 1.5 cmol/kg, un elemento fundamental que contribuye tanto a los procesos metabólicos de los cultivos como a su capacidad para resistir patógenos (García & Rivera, 2019).

9.3.4 Propiedades Microbiológicas del Suelo

Los microorganismos del suelo son aliados clave para la agricultura sostenible, ya que mejoran la estructura del suelo, potencian su fertilidad y actúan como protectores naturales contra patógenos que dañan los cultivos. Estas funciones no solo mantienen la salud del suelo, sino que también aseguran una producción agrícola más equilibrada y respetuosa con el medio ambiente. (Castro et al., 2020).

La actividad de estos microorganismos es vital para que las plantas obtengan los nutrientes que necesitan. Gracias a procesos como la descomposición de materia orgánica y la liberación de nutrientes, los microorganismos ayudan a que las plantas absorban mejor los recursos disponibles, lo que se traduce en suelos más fértiles y cultivos más saludables (Jiménez & Suárez, 2021).

9.3.5 Composición Físicoquímica del suelo

El suelo está formado por cuatro elementos principales: componentes minerales, sustancias orgánicas, componente hídrico y gases, los cuales determinan sus propiedades y roles específicos.

Los minerales presentes se categorizan en tres grupos principales - arenosos, limosos y arcillosos - que en conjunto establecen la textura del terreno e influyen directamente en su capacidad para almacenar agua y elementos nutritivos (Amangandi Sinchipa et al., 2023).

Un suelo cuando es rico en materia orgánica generalmente presenta mejores condiciones de fertilidad y retención de agua, convirtiéndose en un medio óptimo para el desarrollo de cultivos (Martínez & Gómez, 2021).

Según López et al., 2019, la composición química incluye elementos como el nitrógeno, fósforo y potasio, que son absorbidos por las plantas y son esenciales para su crecimiento y desarrollo. La presencia de estos nutrientes en equilibrio es clave para mantener la salud del suelo y de las plantas, ya que deficiencias o excesos pueden afectar negativamente la productividad agrícola.

9.3.6 Tipos de Suelos predominantes en Ecuador

En Ecuador, los tipos de suelo varían considerablemente debido a la diversidad de ecosistemas y climas que se encuentran en el país. Entre los suelos más abundantes están los andisoles, que se localizan en la región andina. Estos suelos son conocidos por su alta fertilidad y excelente capacidad de retención de agua, lo que los convierte en opciones ideales para cultivos como el maíz y las hortalizas (Paredes & Zambrano, 2019).

9.4 Calidad del Suelo y su Conservación

La calidad y la salud del suelo son esenciales para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas terrestres. Un suelo sano no solo promueve la productividad agrícola al proporcionar nutrientes fundamentales para las plantas, sino que también actúa como un filtro natural, regulando el ciclo hidrológico y reduciendo los impactos de contaminantes (Ruiz, 2023)

Los suelos ricos en materia orgánica contribuyen al almacenamiento de carbono, desempeñando un papel crucial en la lucha contra el cambio climático. No obstante, la degradación del suelo, impulsada por prácticas agrícolas intensivas y la urbanización, representa una amenaza creciente para estos beneficios ecológicos y sociales (EPA, 2024).

Para equilibrar la degradación y mejorar la salud del suelo, se han desarrollado prácticas de conservación y manejo sustentable que buscan mantener su fertilidad y estabilidad. Entre estas prácticas destacan la rotación de cultivos, la agroforestería y el uso de coberturas vegetales, las cuales ayudan a reducir la erosión y mantener la biodiversidad del suelo (Mendoza & Pérez, 2020).

En Ecuador, el manejo sustentable del suelo incluye además el uso de abonos orgánicos y la reducción de agroquímicos, prácticas que promueven la fertilidad y disminuyen la contaminación (Zamora & Ruiz, 2019).

9.5 Uso de Software para el Análisis de Suelos

QGIS es un software de código abierto que permite a los usuarios crear mapas detallados mediante la manipulación de datos geoespaciales. Ofrece herramientas avanzadas para la composición de mapas, permitiendo la inclusión de elementos como leyendas, escalas gráficas y flechas de norte, lo que facilita la representación visual de información geográfica. Al mismo tiempo, su capacidad para manejar diversos formatos de datos y su integración con otros sistemas de información geográfica lo convierten en una herramienta versátil para la cartografía digital (QGIS Development Team, 2022).

9.5.1 QGIS en Estudios de Impacto Ambiental

En el ámbito de los estudios de impacto ambiental, QGIS se utiliza para analizar y representar datos ambientales, facilitando la evaluación de posibles efectos de proyectos sobre el entorno. Su capacidad para gestionar bases de datos espaciales y realizar análisis geoespaciales permite a los profesionales identificar áreas sensibles y planificar medidas de mitigación adecuadas. Incluyendo la posibilidad de elaborar mapas temáticos específicos contribuye a una mejor comunicación de los resultados de estos estudios (Navia, 2022).

9.6 Marco Legal

En la presente tesis, el marco legal se basará en la Constitución de la República del Ecuador, el Código Orgánico Ambiental, el Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA) y el Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD). Estos instrumentos legales proporcionan las bases fundamentales

y normativas necesarias para abordar el tema de manera rigurosa y alineada con el marco jurídico vigente en el país.

9.6.1 Constitución de la República del Ecuador

La Constitución de la República del Ecuador, aprobada en 2008 mediante referéndum popular, representa el fundamento y la norma jurídica suprema del Estado ecuatoriano. Se destaca por ser pionera en el reconocimiento de los derechos de la naturaleza (Pachamama) y su protección integral, estableciendo un marco jurídico innovador para la gestión ambiental y el desarrollo sostenible (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

La carta magna establece en su artículo 14 el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, garantizando la sostenibilidad y el buen vivir (Sumak Kawsay). Este enfoque constitucional promueve la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la prevención del daño ambiental, mientras establece responsabilidades ciudadanas para su preservación. Además, incorpora principios fundamentales como la participación comunitaria en la gestión ambiental y el uso sostenible de los recursos naturales, constituyéndose en un referente internacional en materia de derecho ambiental constitucional (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

9.6.1.1 Artículos de preservación Ambiental

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, sumak kawsay. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto. La soberanía energética no se alcanzará en detrimento de la soberanía alimentaria, ni afectará el derecho al agua (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Art. 74.- Las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades tendrán derecho a beneficiarse del ambiente y de las riquezas naturales que les permitan el buen vivir (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Art. 83.- Son deberes y responsabilidades de las ecuatorianas y los ecuatorianos, sin perjuicio de otros previstos en la Constitución y la ley: 6. Respetar los derechos de la naturaleza, preservar un ambiente sano y utilizar los recursos naturales de modo racional, sustentable y sostenible (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Art. 395.- La Constitución reconoce los siguientes principios ambientales:

1. El Estado garantizará un modelo sustentable de desarrollo, ambientalmente equilibrado y respetuoso de la diversidad cultural, que conserve la biodiversidad y la capacidad de regeneración natural de los ecosistemas, y asegure la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

2. Las políticas de gestión ambiental se aplicarán de manera transversal y serán de obligatorio cumplimiento por parte del Estado en todos sus niveles y por todas las personas naturales o jurídicas en el territorio nacional (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

3. El Estado garantizará la participación y permanente de las personas, comunidades, pueblos y nacionalidades afectadas, en la planificación, ejecución y control de toda actividad que genere impactos ambientales (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

4. En caso de duda sobre el alcance de las disposiciones legales en materia ambiental, éstas se aplicarán en el sentido más favorable a la protección de la naturaleza (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Art. 396.- El Estado adoptará las políticas y medidas oportunas que eviten los impactos ambientales negativos, cuando exista certidumbre de daño. En caso de duda sobre el impacto ambiental de alguna acción u omisión, aunque no exista evidencia científica del daño, el Estado adoptará medidas protectoras eficaces y oportunas (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

Art. 397.- En caso de daños ambientales el Estado actuará de manera inmediata y subsidiaria para garantizar la salud y la restauración de los ecosistemas. Además de la sanción correspondiente, el Estado repetirá contra el operador de la actividad que produjera el daño las obligaciones que conlleve la reparación integral, en las condiciones y con los procedimientos que la ley establezca.

La responsabilidad también recaerá sobre las servidoras o servidores responsables de realizar el control ambiental (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

9.6.2 Acuerdo Ministerial 097-A (2015)

Tabla 2 *Valores Máximos Permisibles*

Parámetro	Unidades	USO DEL SUELO			
		Residencial	Comercial	Industrial	Agrícola
Parámetros Generales					
Conductividad	μS/cm	200	400	400	200
pH	N/A	6 a 8	6 a 8	6 a 8	6 a 8
Relación de Adsorción de Sodio Índice (S.A.R.)	N/A	5	12	12	5
Parámetros Inorgánicos					
Arsénico	mg/Kg	12	12	12	12

Nota. Datos tomados del Acuerdo Ministerial 097-A (2015)

9.6.3 Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)

Libro VI: Calidad Ambiental

Anexo 2: Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados

Tabla 3 *Parámetro de arsénico inorgánico en suelos*

Parámetro	Unidades (Concentración en Peso Seco de Suelo)	Valor
Parámetros Generales		
Conductividad	μS/m	200
pH		6 a 8

Relación de Adsorción de Sodio (Índice S.A.R.)		4*
Parámetros Inorgánicos		
Arsénico (Inorgánico)	mg/Kg	12

Nota. Datos tomados del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio de Ambiente (2023).

Artículo 3.1: Define las responsabilidades del generador de contaminación para remediar suelos que excedan los límites permisibles.

9.6.4 Código Orgánico del Ambiente (COA)

Título IV: De la Gestión Ambiental

Capítulo IV: Control y Prevención de la Contaminación Ambiental

Artículo 45: Establece que la contaminación del suelo por sustancias químicas, incluyendo metales pesados, debe ser gestionada de manera preventiva.

Artículo 46: Dispone la obligación de remediar los suelos contaminados en caso de exceder los estándares de calidad ambiental definidos en el TULSMA.

9.6.5 Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización (COOTAD)

Artículo 142: Asigna a los gobiernos autónomos descentralizados la competencia para regular y controlar la contaminación ambiental, incluyendo la calidad del suelo.

Artículo 55, numeral 8: Autoriza a los municipios a emitir ordenanzas sobre la preservación del ambiente, enfocándose en suelos contaminados.

9.6.6 Ley de Gestión Ambiental

Artículo 19: Obliga a prevenir, mitigar y remediar la contaminación del suelo causada por actividades humanas, especialmente en el manejo de sustancias peligrosas.

9.6.7 Acuerdo Ministerial No. 061 (2015)

Establece criterios para la remediación de suelos contaminados.

Artículo 6: Detalla los procedimientos para evaluar la contaminación del suelo y establecer medidas correctivas basadas en los estándares del TULSMA.

9.6.8 Normas INEN

NTE INEN 2176:2013: Métodos para la determinación de arsénico y otros metales pesados en suelos utilizando técnicas de absorción atómica o espectrometría.

NTE INEN 2169:2013: Proporciona directrices para el manejo de muestras destinadas al análisis de contaminantes, incluyendo suelos.

10 ÁREA DE ESTUDIO

La parroquia de Toacaso, ubicada en la provincia de Cotopaxi, se destaca por la riqueza de sus recursos hídricos y naturales. Este territorio se beneficia de la presencia de páramos, pantanos, bosques nativos y el majestuoso nevado Los Ilinizas. La red hidrográfica de la zona se distribuye en dos importantes cuencas: la cuenca del Toachi-Pilatón y la cuenca Pastaza. Este sistema hídrico juega un rol crucial en las actividades económicas y sociales de la parroquia, dado que las comunidades que ocupan el 70% del territorio gestionando sus recursos de manera autónoma, mientras que el 30% corresponde a propiedades de haciendas.

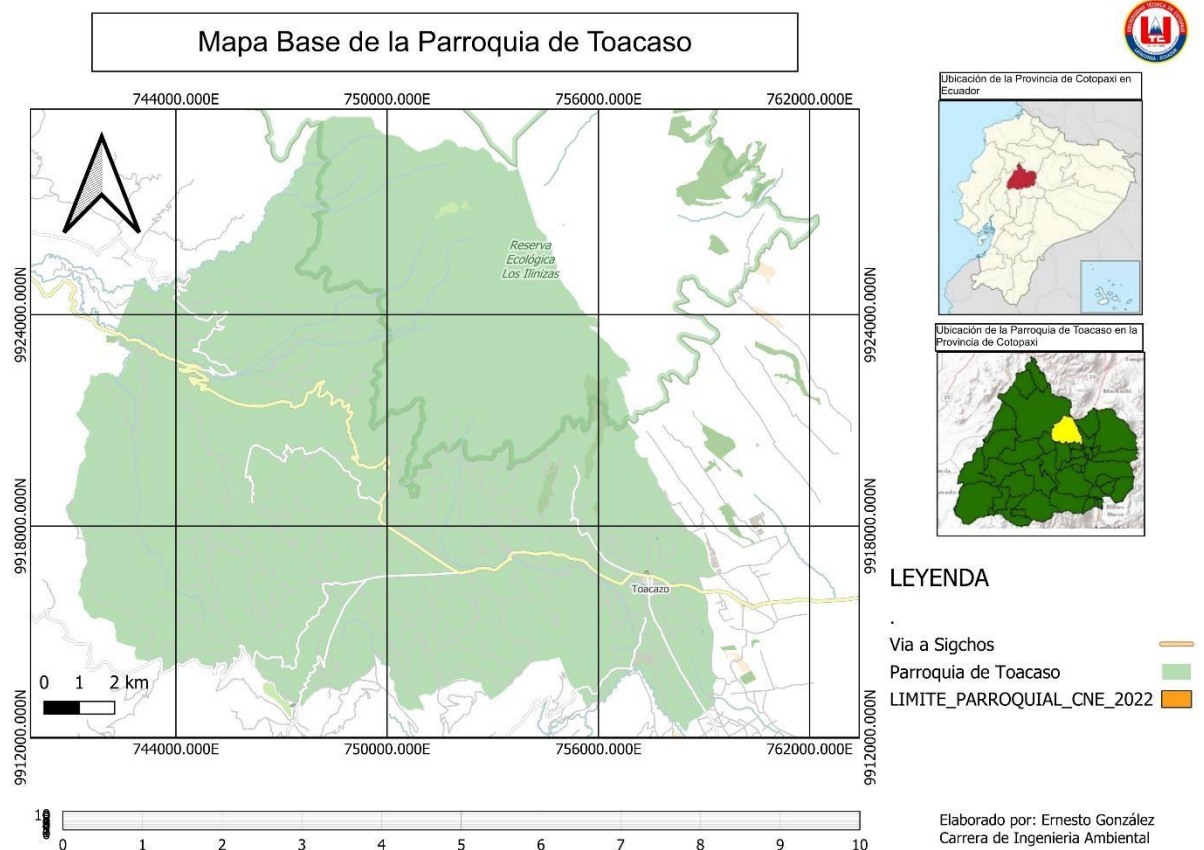
El clima de Toacaso, influenciado por su altitud y la proximidad al nevado los Ilinizas, presenta temperaturas promedio que varían entre 6°C y 12°C. Dicha zona es clasificada como una zona ecuatorial de alta montaña, la parroquia muestra microclimas con diferencias de hasta 2°C entre niveles específicos. Asimismo, las precipitaciones anuales oscilan según la ubicación: entre 500 y 750 mm en los valles andinos, y de 750 a 1.000 mm en el flanco occidental de la cordillera. Esta última área recibe mayores lluvias debido a la influencia de vientos cálidos provenientes del trópico y la condensación de niebla, lo que genera condiciones únicas de humedad y temperatura.

En cuanto a la actividad agrícola, la parroquia de Toacaso centra su economía en la producción agrícola a partir de la diversidad de microclimas y suelos fértiles que presenta. Por consiguiente, los productos de cultivo en Toacaso son maíz, papa, hortalizas y frutas, productos necesarios para la dieta alimenticia y han favorecido al comercio con las zonas aledañas. La producción agropecuaria de Toacaso se ha acentuado según su peculiaridad geográfica y

condiciones climáticas, ofreciendo a la economía y alimentación de la parroquia, además del sustento de los habitantes de la zona.

El relieve de Toacaso es variado y moldeado por factores como el movimiento de placas tectónicas, la erosión del viento y el agua, y procesos que han evolucionado a lo largo de miles de años. Altitudes que van desde los 2.680 msnm hasta los 4.000 msnm caracterizan la parroquia, alcanzando su punto máximo en el nevado Los Ilinizas, con una elevación de 5.248 msnm. Estas condiciones topográficas influyen tanto en las actividades humanas como en el desarrollo económico, cultural y social de la zona (Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Toacaso, 2020).

Figura 1 Parroquia de Toacaso



Nota. Mapa del área de estudio elaborado en QGis. **Elaborado.** Autor

11 METODOLOGÍA

11.1 Tipo de Investigación

El presente proyecto de investigación tiene como objeto una metodología cuantitativa y transversal; lo cual, según Vera et al., (2024) el diseño de investigación transversal es factible para evaluar contaminantes ambientales en un contexto específico, ya que permite recolectar datos en un solo momento, capturando la condición del ambiente en un instante determinado. Este método proporciona el análisis de la contaminación por arsénico en los suelos cercanos al río Blanco, suministrando una visión actual y representativa de la presencia de este contaminante en la zona de estudio.

Conjuntamente, Mekuria et al. (2023) destacan que la investigación transversal es especialmente útil cuando se busca identificar correlaciones entre variables, como la concentración de arsénico en el suelo y la distancia al río, sin tener que observar cambios a lo largo del tiempo. De este modo, permite hacer comparaciones entre diferentes puntos de muestreo, lo cual es fundamental en estudios de contaminación ambiental (Valbuena et al., 2018).

A diferencia de los estudios longitudinales, el diseño transversal requiere menos recursos y tiempo, lo que lo convierte en una opción viable para investigaciones con limitaciones de tiempo y financiamiento. El diseño de investigación transversal y cuantitativo se complementa efectivamente en esta investigación sobre contaminación por arsénico en suelos adyacentes al río Blanco, ya que el enfoque transversal permite capturar datos en un momento determinado del tiempo a través de un muestreo sistemático en puntos estratégicamente seleccionados, mientras que el aspecto cuantitativo facilita la medición precisa de las concentraciones de arsénico y su posterior análisis estadístico.

El estudio tiene un enfoque cuantitativo, según Sampieri (2014) la investigación cuantitativa utiliza herramientas de análisis matemático y estadístico; el objetivo es la descripción y exploración del problema de estudio. En el mismo se realizó la recolección de muestras para el diseño experimental mediante el uso de técnicas analíticas como la espectrofotometría UV-Visible y Absorción Atómica.

11.2 Recolección de Muestras de Suelo

Para la recolección de muestras en la zona determinada se implementó una metodología de muestreo aleatorio, cuyo principio fundamental radicó en la selección fortuita de puntos dentro de un área previamente delimitada. Este método garantizó la imparcialidad de los datos, ya que elimina la influencia de factores externos que pudieran sesgar la elección de las muestras. En la práctica, se utilizaron un barreno manual de acero inoxidable, diseñado para extraer muestras a una profundidad precisa de 20 cm, conforme a lo indicado por Gallardo et al. (2018), lo que permite capturar un perfil representativo del suelo.

La recolección de muestras del suelo requiere una cuidadosa selección y preparación de materiales específicos que garanticen la precisión y confiabilidad del muestreo. Estos implementos son fundamentales para el trabajo de campo, se deben mantener en óptimas condiciones y estar debidamente limpios para evitar la contaminación cruzada entre diferentes muestras.

La correcta utilización de estas herramientas no solo facilita el proceso de recolección, sino que también aseguro la integridad de las muestras desde el momento de su extracción hasta su análisis en el laboratorio. Es esencial que cada instrumento cumpla con los estándares de calidad requeridos para obtener resultados confiables que permitan una adecuada caracterización del suelo en estudio. (Tito, 2020).

11.2.1 Coordenadas de la zona de Pintze Chico

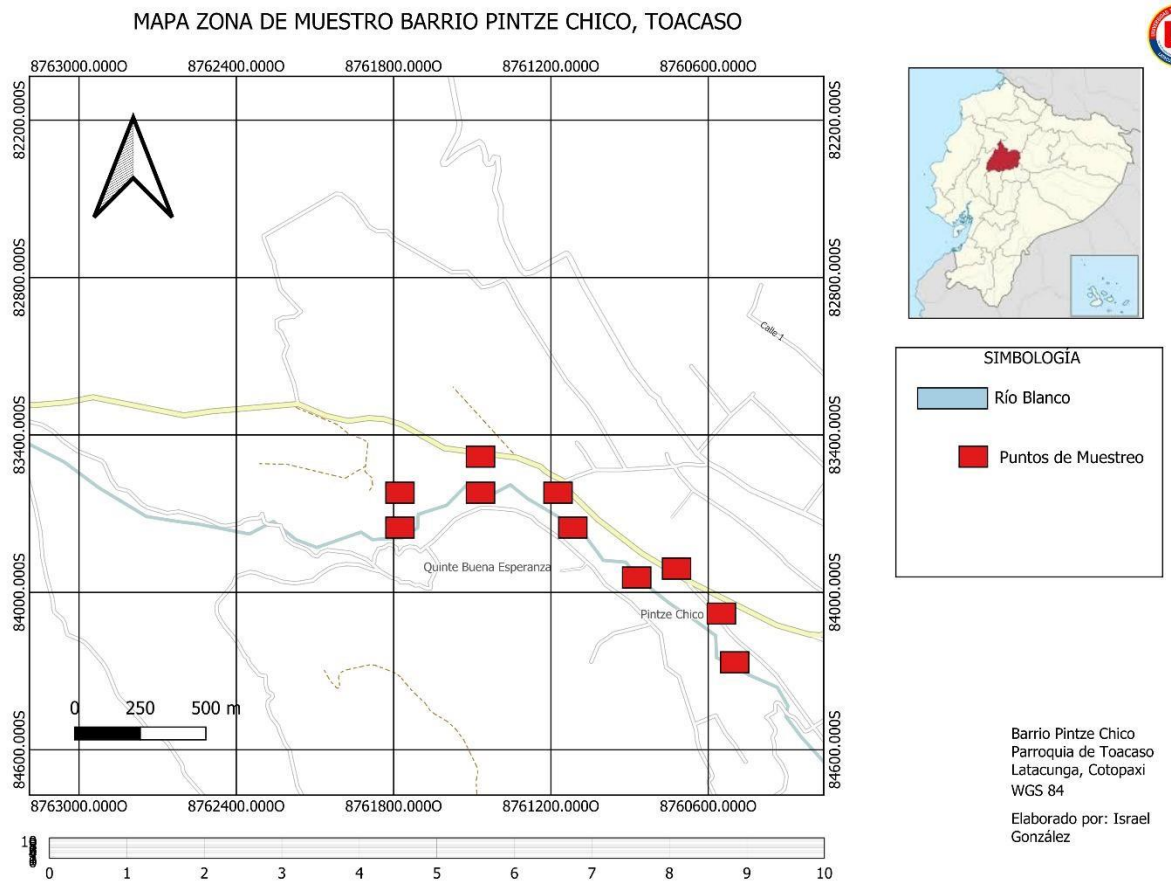
La zona de recolección de muestras de suelo para el respectivo estudio fue tomada de las siguientes coordenadas del Barrio Pintze Chico.

Tabla 4 *Coordenadas de la Zona de Estudio*

Puntos	Latitud	Longitud
1	-0.75125	-78.70570
2	-0.75083	-78.70591
3	-0.75208	-78.70253
4	-0.75232	-78.70257
5	-0.75376	-78.70051
6	-0.75371	-78.70060
7	-0.75344	-78.70072
8	-0.75282	-78.70117

Nota. Las coordenadas fueron tomadas mediante GPS. **Elaborado.** Autor

Figura 2 *Puntos de Muestreo riveras del Río Blanco*



Elaborado. Autor

11.2.2 Tratamiento para Análisis de Muestras

Una vez recolectadas las muestras en los puntos de la zona mencionada, se procedió con su preparación para los análisis cualitativos y cuantitativos respectivamente. Las muestras de suelo serán secadas a temperatura a 40°C durante 24 horas, luego pulverizarlas y tamizadas hasta obtener una consistencia homogénea de 2 mm. Este paso es crucial para asegurar que el análisis sea representativo de la totalidad de la muestra. Posteriormente, las muestras serán sometidas a un proceso de digestión ácida utilizando una mezcla de ácido nítrico, siguiendo el método estándar de digestión de metales para muestras de suelo y sedimentos, conocido como EPA 3050B.

El análisis de la concentración de arsénico en las muestras se llevará a cabo utilizando espectrofotometría UV-visible y Absorción Atómica, así como lo indica la investigación de Coral Carrillo, A., et al. (2019). A continuación, se detalla el material base para la recolección de muestras y su proceso analítico para su respectivo análisis químico.

- Palas de plástico
- Contenedores de plástico
- GPS
- Cinta Métrica
- Estacas
- Bolsas de plástico
- Rotulador
- Etiquetas

11.3 Fase de Laboratorio Cualitativo y Cuantitativo

Preparación de muestras para identificación de arsénico en suelos mediante el método colorimétrico de Permanganato de Potasio $KMNO_4$ y Lugol con medición en UV-Visible

- Tubos de ensayo de vidrio de borosilicato
- Tapones de teflón
- Placa calefactora
- Agitador Magnético

- Papel Filtro
- Cinta
- Vasos de precipitados de 100 ml
- Pipetas y puntas desechables
- Guantes y gafas de protección

Reactivos

- Ácido clorhídrico concentrado (HCl)
- Permanganato de Potasio al 10% ($KMnO_4$)
- Agua destilada
- Zinc Metálico

Preparación de Muestras:

-
- Pesar aproximadamente 5 g de muestra seca y homogénea en un vaso de precipitación de 100 ml.
- Verter 50 ml de agua destilada para realizar una solución homogénea.
- El vaso de precipitación con la muestra seca y agua destilada, colocarla en el agitador magnético con su respectiva capsula de agitación.
- Encender el agitador a 90 rpm por 30 minutos, después de transcurrido este tiempo dejar reposar la solución por 1 hora para la sedimentación total de las partículas sólidas.
- Añadir 1 mL de HCl para acidificar la solución y facilitar la reacción de generación de arsina.

Adición de Zinc Metálico:

- Pesar 0.2 g de zinc metálico en polvo utilizando una balanza de precisión.
- Añadir el polvo de zinc al tubo de ensayo. Esto iniciará la reacción entre el ácido y el zinc, generando hidrógeno (H_2) y arsina (AsH_3).

Sellado del Tubo con Papel Impregnado de $KMnO_4$:

- Colocar un papel impregnado con permanganato de potasio ($KMnO_4$) seco en una tapa hermética.
- Sellar el tubo de ensayo con la tapa, asegurando que el papel quede bien sujeto y no entre en contacto directo con la solución.

Tiempo de Reacción:

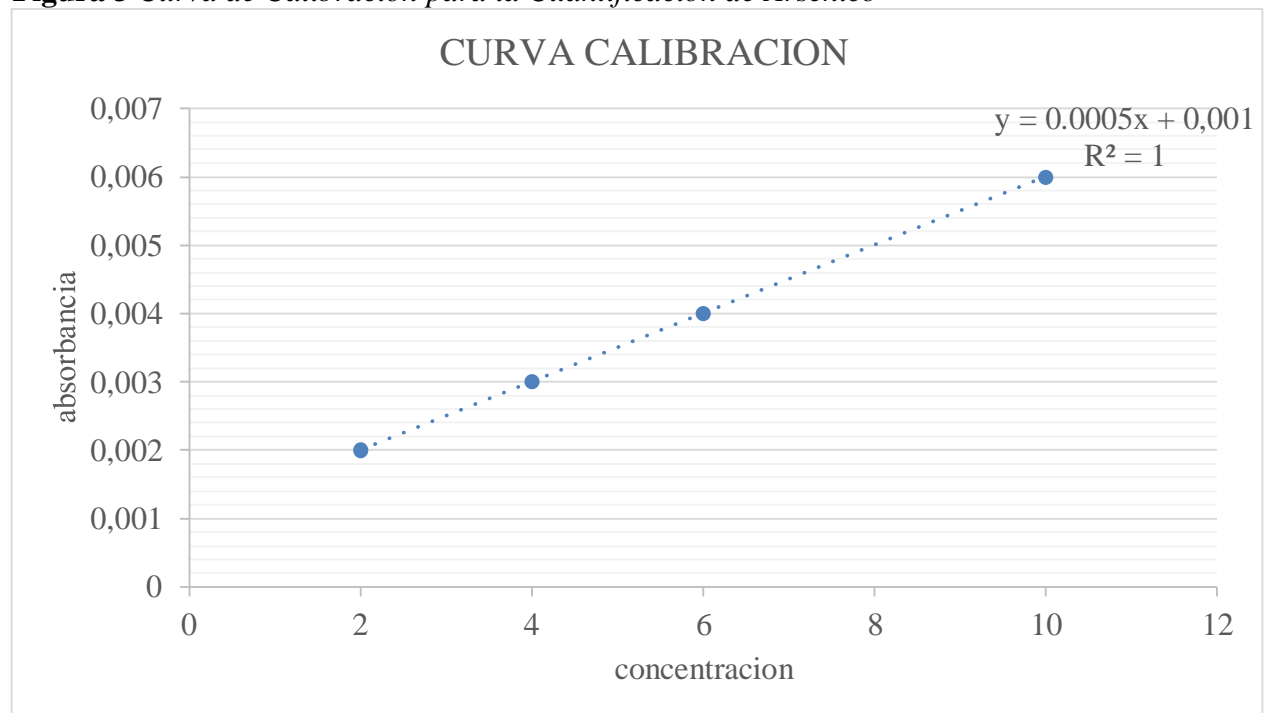
- Dejar reposar el tubo de ensayo durante 30 a 60 minutos.
- Durante este tiempo, la arsina generada reaccionará con el permanganato de potasio en el papel, cambiando su color de púrpura a marrón o amarillo, dependiendo de la concentración de arsénico.

Preparación de la Curva de Calibración

- Se prepararon soluciones estándar de arsénico con concentraciones conocidas de 2, 4, 6 y 10 mg/L.

- Se midió la absorbancia de cada solución utilizando un espectrofotómetro UVVisible, obteniendo valores de absorbancia que oscilaron entre 0.002 y 0.006 unidades de absorbancia (UA).
- Se utilizará la técnica analítica de espectrofotometría UV-visible para determinar la concentración de arsénico en las muestras a una longitud de onda de 450 nm (Coral Carrillo et al., 2019).
- Se construyó una curva de calibración graficando la concentración de arsénico (eje X) frente a la absorbancia obtenida (eje Y).
- Se obtuvo una ecuación de regresión lineal de la forma $y=mx+b$, donde "y" representa la absorbancia y "x" la concentración de arsénico. Esta ecuación fue utilizada para calcular la concentración de arsénico en las muestras de suelo.

Figura 3 Curva de Calibración para la Cuantificación de Arsénico

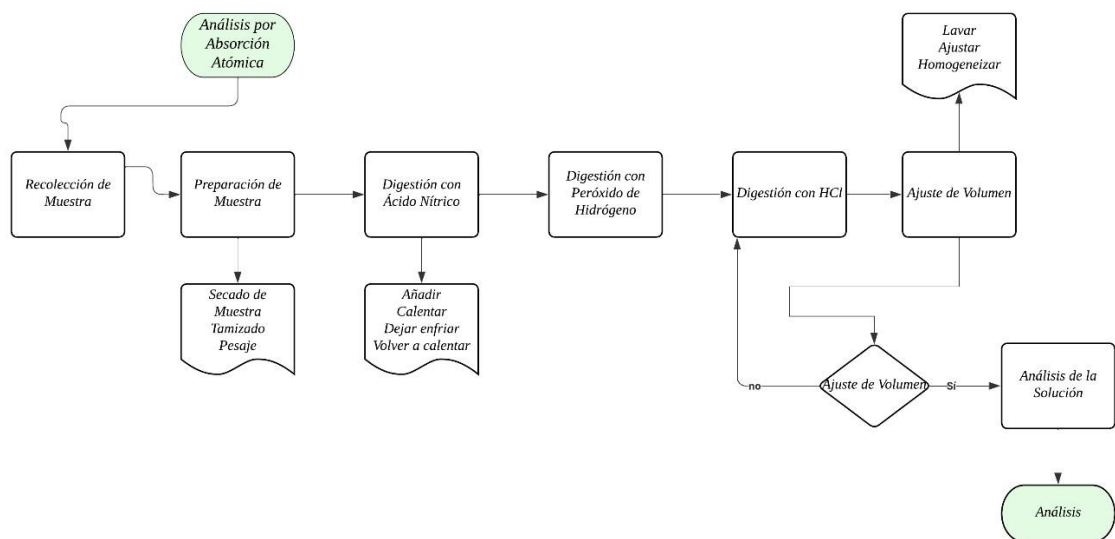


Nota. La curva de calibración representa la relación entre la absorbancia y la concentración de arsénico en mg/L. **Elaborado.** Autor **Análisis:**

- Recortar el área coloreada del papel impregnado.

- Disolver el papel recortado en 5 mL de agua destilada para extraer los productos de reacción.
- Agregar el agua destilada con la disolución del papel recortado en un tubo de ensayo.
- Medir la absorbancia de la solución resultante en un espectrofotómetro a 450 nm.
- Determinar la concentración de arsénico utilizando una curva de calibración previamente preparada.

Figura 4 Diagrama de Flujo UV-Visible



11.4 Análisis cuantitativo para arsénico mediante el método de Absorción Atómica (AAS)

Este método tiene como objetivo la digestión ácida de muestras de suelo o sedimentos para la posterior determinación de metales pesados, como el arsénico, mediante técnicas analíticas como espectrometría de absorción atómica (AAS) o ICP-MS.

Preparación de muestra

Pesar aproximadamente 1-2 g de muestra de suelo seca y homogeneizada en un vaso de precipitados de 50-100 mL.

- Muestra de suelo o sedimentos (seca y homogeneizada).
- Ácido nítrico concentrado (HNO_3 , 69%).
Peróxido de hidrógeno (H_2O_2 , 30%).

-
- Ácido clorhídrico concentrado (HCl, 37%).
- Agua destilada o desionizada.
- Vasos de precipitados de 50-100 mL.
- Placa calefactora.
- Papel de filtro (Whatman No. 41 o equivalente).
- Matraces volumétricos de 50 mL.
- Equipo de protección personal (guantes, gafas, bata).

Digestión con Ácido Nítrico

- Añadir 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO₃) a la muestra.
- Calentar la mezcla en una placa calefactora a 95°C (sin hervir) durante 15 minutos.
- Dejar enfriar y añadir 5 mL adicionales de ácido nítrico concentrado.
- Recalentar la mezcla y continuar la digestión hasta que el volumen se reduzca a aproximadamente 5 mL (evitar la sequedad completa). **Digestión con Peróxido de**

Hidrógeno

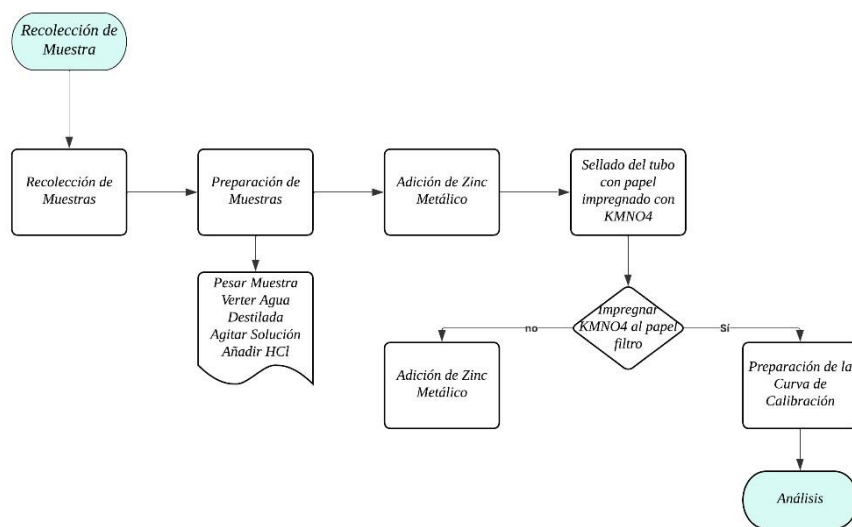
- Dejar enfriar la muestra y añadir 2 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 30%.
- Calentar la mezcla nuevamente hasta que la efervescencia disminuya.
- Repetir la adición de peróxido de hidrógeno en incrementos de 1 mL si la muestra permanece oscura o colorida.
- Continuar calentando hasta que la digestión sea completa (la solución debe ser clara o ligeramente turbia).

Digestión con Ácido Clorhídrico

- Añadir 10 mL de una mezcla de ácido clorhídrico (HCl) y agua destilada en proporción 1:1.
- Calentar la mezcla a 95°C durante 15 minutos.
- Dejar enfriar y filtrar la solución a través de papel de filtro (Whatman No. 41) en un matraz volumétrico de 50 mL. **Ajuste de Volumen**
- Lavar el residuo en el filtro con pequeñas porciones de agua destilada para asegurar la recuperación completa del analito.
Ajustar el volumen final a 50 mL con agua destilada.
- Homogeneizar la solución antes del análisis. **Análisis**

-
- La solución resultante está lista para ser examinada mediante técnicas como espectrometría de absorción atómica (AAS), ICP-MS.
- Preparar estándares de arsénico en un rango de concentraciones acreditadas para comparar con la muestra y comprobar la concentración de arsénico.

Figura 5 Diagrama de Flujo Absorción Atómica



11.5 Metodología para la elaboración del Diagrama de PRISMA

Para desarrollar esta investigación, se empleó un enfoque sistemático apoyado en la revisión bibliográfica de estudios científicos sobre la remediación de suelos contaminados con arsénico. Se utilizó la metodología PRISMA para la selección rigurosa y fundamentada de las fuentes.

Búsqueda y selección de información

Se realizó una búsqueda en bases de datos científicas como Scopus, Web of Science, Google Scholar, ResearchGate y Research Rabbit, priorizando estudios recientes no mayores a 10 años. Se emplearon palabras clave como "remediación de arsénico en suelos", "fitorremediación", "biorremediación de suelos" y "adsorción con biochar".

Primeramente, se identificaron 12 estudios relevantes. Posteriormente, se aplicaron criterios de inclusión, considerando solo aquellos con metodologías claras, alta eficiencia de remoción y aplicabilidad en comunidades rurales. Se descartaron 5 estudios por falta de datos o metodologías inadecuadas, dejando un total de 5 investigaciones clave que sirvieron como base para el análisis comparativo.

Análisis de los Métodos de Remediación

Los estudios escogidos fueron analizados en función de eficiencia de remoción, tiempo de aplicación, costo y viabilidad técnica y ambiental en la parroquia de Toacaso. Para ello:

- Se compararon los métodos de fitorremediación, biorremediación y adsorción con biochar, considerando su efectividad.
 - Se revisaron reportes de casos exitosos y sus condiciones de aplicación.
 - Se evaluó la posibilidad de combinar técnicas para mejorar los resultados.

Evaluación de la Viabilidad Técnica y Ambiental

Cada método fue analizado en términos de factibilidad de implementación, impacto ambiental y sostenibilidad en el contexto local. Se priorizaron técnicas de bajo costo y accesibles para comunidades rurales, garantizando posibles soluciones viables y replicables en campo.

Construcción del Diagrama PRISMA

Se elaboró un diagrama PRISMA para representar visualmente el proceso de selección de estudios. Este esquema permitió filtrar información irrelevante y centrarse en fuentes con datos sólidos sobre la remediación de arsénico en suelos.

12 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites permisibles establecidos por las normativas ambientales nacionales. En Ecuador, (Acuerdo Ministerial 097-A, el Libro VI Anexo 2 del TULSMA y la Cámara de Industrias y Producción del D.M.Q) los cuales establecen un límite de 12 mg/kg a 15 mg/Kg para arsénico en suelos. Para interpretar los análisis estadísticos se incluyó la media, mediana y desviación estándar de las concentraciones de arsénico en las diferentes zonas de muestreo. Se evaluó posibles correlaciones entre los niveles de arsénico y factores ambientales o antropogénicos como la proximidad a fuentes de contaminación conocidas.

Si bien la concentración de arsénico en las muestras analizadas supera los límites establecidos en la normativa ecuatoriana, la distribución espacial del contaminante sugiere que la fuente de contaminación no es uniforme ni exclusiva de actividades humanas. Esto refuerza la hipótesis de que el arsénico detectado en Toacaso tiene un origen predominantemente geogénico, aunque su movilidad y biodisponibilidad pueden verse modificadas por las prácticas agrícolas y el uso de agua de riego contaminada.

12.1 Resultados basados en el Diseño de Investigación

El enfoque de investigación transversal permitió obtener una imagen clara y representativa de la presencia de arsénico en los suelos cercanos al río Blanco en un período determinado. Este método facilitó un examen exhaustivo de las concentraciones del contaminante en diferentes puntos, lo que ayudó a detectar las zonas con mayores niveles de riesgo. Asimismo, al tratarse de un estudio cuantitativo, fue posible determinar las cantidades de arsénico presentes y contrastarlas con los estándares fijados por las regulaciones locales.

El enfoque metodológico integró un muestreo sistemático con herramientas analíticas que fueron esencial para asegurar la fiabilidad de los datos recopilados. La recolección de muestras se realizó con un barreno manual de acero inoxidable que permitió obtener muestras representativas de las distintas capas del suelo. Así como el proceso de preparación de las muestras, que incluyó secado y trituración homogénea permitiendo reducir posibles errores durante el análisis.

Para la detección y medición del arsénico se emplearon técnicas como la digestión ácida en Absorción Atómica y la espectrofotometría UV-visible, las cuales ofrecieron resultados precisos y confiables. Estos datos fueron cruciales para llevar a cabo una evaluación ambiental detallada del área de estudio. Los métodos utilizados facilitaron la identificación de las relaciones entre las concentraciones de arsénico y diversos factores ambientales y humanos de la cercanía al río y la aplicación de fertilizantes en zonas de cultivo.

En relación al diseño de investigación según Fernández et al., (2022) en el estudio sobre la contaminación del suelo con arsénico hizo referencia al ámbito de estudio, el muestro y análisis,

donde las muestras fueron colocadas y cerradas herméticamente en bolsas ziploc, después enfriadas a temperaturas -4°C . Este proceso coincide con la realizada con el estudio, donde el proceso de recolección de las muestras cumple con las normativas del país.

12.2 Caracterización Física del Suelo mediante bibliografía

Los suelos de la Parroquia de Toacaso presentan una textura predominantemente francoarenosa y franco-limosa, lo que les confiere una capacidad moderada de retención de humedad y una estructura que favorece la aireación y el drenaje eficiente (Gobierno Autónomo Descentralizado de Toacaso, 2020).

La porosidad de estos suelos está influenciada por su alto contenido de material volcánico, lo que permite una buena infiltración del agua, pero también los hace susceptibles a procesos de erosión, especialmente en zonas con pendiente pronunciada y en aquellas sometidas a prácticas agrícolas intensivas (Herrera Toapanta, 2022).

En términos de humedad, estos suelos presentan variaciones significativas dependiendo de la época del año y del acceso a sistemas de riego, con una tendencia a la reducción de humedad en periodos de sequía prolongada, lo que puede afectar la productividad agrícola local (Chale Evas & Díaz Pilco, 2024).

Estudios recientes indican que la estructura del suelo se ve afectada por el uso excesivo de maquinaria agrícola, lo que puede incrementar la compactación y reducir la capacidad de retención de agua, afectando el crecimiento de los cultivos (Gobierno Autónomo Descentralizado de Toacaso, 2020).

Estos factores hacen necesario el manejo adecuado del suelo mediante la implementación de prácticas de conservación y el uso de enmiendas orgánicas que mejoren su estructura y disponibilidad de humedad para los cultivos (Jiménez Reascos & Ramos Collaguazo, 2019).

12.3 Caracterización Química del Suelo

En el análisis de la contaminación por arsénico en suelos se realizó una caracterización preliminar del suelo en la zona de estudio. Los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio, correspondiente a una muestra compuesta de la región, se detallan en la Tabla 6

Los resultados iniciales muestran que el suelo en la zona de estudio presenta características ácidas, bajos niveles de materia orgánica, así como la mínima presencia de minerales como; fósforo, potasio y nitrógeno total, eso limita su fertilidad. Esta condición favorece la solubilidad del arsénico incrementando la biodisponibilidad y representa un riesgo para los cultivos. Al comparar con suelos similares se observó que la baja materia orgánica y el pH ácido pueden facilitar la movilidad del arsénico, el mismo es crucial para comprender las interacciones evaluando los niveles de contaminación y su impacto ambiental.

Tabla 5 *Análisis Químico en muestra de Toacaso*

Parámetros	Resultados	Interpretación según el
	Químicos mediante el Acuerdo Ministerial 097-A	análisis
	de	
	Laboratorio	
pH	5.66	Ácido
Conductividad Eléctrica	0.31 dS/m	No Salino
Carbono Orgánico	0.92%	Bajo
Materia Orgánica	1.73%	Bajo
Nitrógeno Total	0.09%	Muy Bajo
Fósforo Asimilable	5.4 ppm	Bajo
Potasio Intercambiable	0.11 cmol/kg	Bajo
Calcio Intercambiable	2.23 cmol/kg	Bajo
Magnesio Intercambiable	0.72 cmol/kg	Bajo

Elaborado. Autor

La acidez del suelo y su bajo contenido de materia orgánica son factores determinantes en la solubilidad y biodisponibilidad del arsénico, siendo una potencial toxicidad para los cultivos y el agua subterránea. Según un estudio de Sánchez-Tello et al. (2021), la interacción de metales pesados con el estado sólido del suelo está influenciada por parámetros químicos, especialmente el pH y la presencia de materia orgánica, que pueden aumentar la solubilidad del metal y activar la superficie del mineral reactivo, ayudando así la adsorción.

Igualmente, la presencia de metales pesados como el arsénico en el suelo plantea un riesgo significativo para la calidad del suelo debido a su alta toxicidad. Un artículo de la FAO (2020) recalca que la contaminación del suelo por metales pesados amenaza la seguridad alimentaria y la salud humana que afecta la fertilidad del suelo, la biodiversidad y reduce los rendimientos de los cultivos.

12.4 Comparación de Valores de la Caracterización Química del Suelo

Los resultados de los análisis químicos del suelo muestran que el pH (5.66) este resultado se encuentra en el límite inferior del rango recomendado (6.0-7.5), que indica una tendencia a la acidez. Por otro lado, la conductividad eléctrica (0.31 dS/m) está dentro de los niveles adecuados, sin embargo, sugiere que la salinidad del suelo no representa un problema. Los niveles de materia orgánica (1.73%) y carbono orgánico (0.92%) están por debajo de los valores óptimos, es una señal de la necesidad de implementar prácticas para mejorar la fertilidad del suelo.

Se observó una deficiencia significativa en varios nutrientes esenciales, como fósforo (5.4 ppm), potasio (0.11 cmol/kg) y calcio (2.23 cmol/kg), que están por debajo de los rangos recomendados, sugiriendo que el suelo requiere un programa de fertilización para mejorar su fertilidad. El magnesio intercambiable (0.72 cmol/kg) está en el rango aceptable, aunque en la parte inferior, lo que también señala la necesidad de optimizar los nutrientes para un mejor rendimiento agrícola.

Tabla 6 Comparación de los análisis químicos de muestra de suelo de Toacaso con valores de la normativa

Parámetros Edáficos	Resultados de Laboratorio del Trabajo de Investigación	Parámetros Químicos Suelo según el Acuerdo Ministerial 097-A y el Libro VI Anexo 2 del TULSMA
pH	5.66	6.0 - 7.5
Conductividad Eléctrica	0.31 dS/m	0 - 4 dS/m
Carbono Orgánico	0.92%	Suelos ricos: >1.5%
Materia Orgánica	1.73%	2-3%

Nitrógeno Total	0.09%	0.1-0.2%
Fósforo Asimilable	5.4 ppm	10-25 ppm
Potasio Intercambiable	0.11 cmol/kg	0.256-0.512 cmol/kg
Calcio Intercambiable	2.23 cmol/kg	5-10 cmol/kg
Magnesio Intercambiable	0.72 cmol/kg	0.5-3 cmol/kg

Elaborado. Autor

Según la tabla 7, se presenta la comparación de las características químicas del suelo bajo el diseño experimental que se realizó en el trabajo y la normativa, donde es evidente que el pH del suelo tiene mayor acidez, con el 5.66 en comparación con los parámetros establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A, el Libro VI Anexo 2 del TULSMA y la Cámara de Industrias y Producción del D.M.Q, que presentan un rango de 6 – 7.5. De igual manera los valores de conductividad eléctrica, carbono orgánico, materia orgánica, nitrógeno total, fosforo asimilable, potasio, calcio y magnesio intercambiable presentaron valores por debajo de la normativa ya mencionada. Estos resultados generan efectos como se describe a continuación.

Un estudio realizado en la Universidad Estatal de Oklahoma (2022), un pH ácido puede limitar el crecimiento de los cultivos al alterar el equilibrio de los nutrientes esenciales provocando una disminución en los rendimientos agrícolas. La falta de materia orgánica también reduce la capacidad del suelo para retener agua y nutrientes, lo que afecta su salud a largo plazo. Mientras, EOS Data Analytics (2023) destacó que un suelo con bajos niveles de materia orgánica no solo pierde fertilidad, sino que también enfrenta dificultades para mantener un adecuado balance de humedad, el mismo pone en riesgo la productividad agrícola.

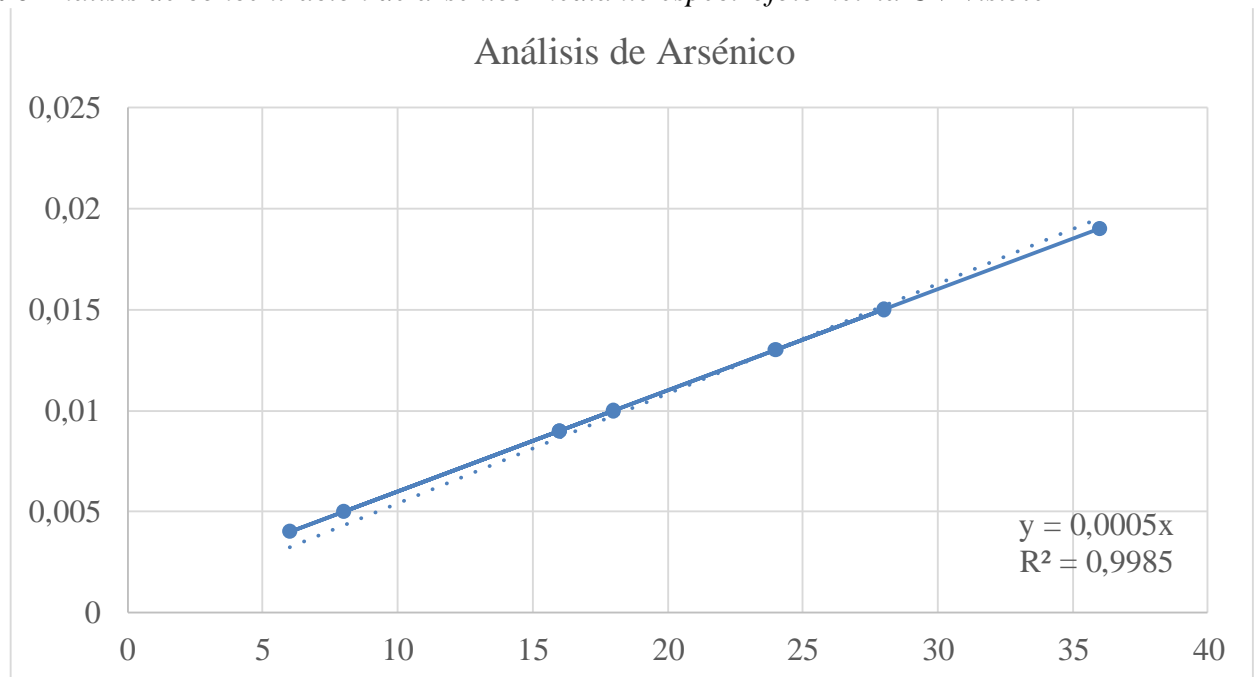
12.5 Resultados del análisis de arsénico de cada muestra por UV-Visible

Los resultados del análisis de arsénico en las muestras de suelo, realizados mediante espectrofotometría UV-visible, se presentan en la figura 4, donde varias muestras superan los límites permisibles establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A, el Libro VI Anexo 2 del TULSMA y la Cámara de Industrias y Producción del D.M.Q desde (12 mg/kg a 15mg/Kg). La muestra 1 presentó la concentración más alta de arsénico (36 mg/kg), lo que figura más del triple

del límite permitido. Por otro lado, las muestras 2 y 6 se encuentran dentro de los límites permitidos con concentraciones de 6.00 mg/kg y 8.00 mg/kg, respectivamente.

Estos resultados muestran una contaminación significativa por arsénico en la zona de estudio. La variabilidad en las concentraciones apunta que la contaminación no está distribuida de manera uniforme que podría estar relacionado con factores como la cercanía al río Blanco y la influencia volcánica de los Ilinizas.

Figura 6 Análisis de concentración de arsénico mediante espectrofotometría UV-visible



Nota. La gráfica muestra la relación entre la concentración de arsénico (mg/Kg) y la absorbancia obtenida mediante espectrofotometría UV-visible. **Elaborado.** Autor

Según Jiménez et al. (2024), un estudio realizado en la parroquia de Papallacta-Ecuador, las descargas de aguas subterráneas con altas concentraciones de arsénico utilizadas para el riego elevan los niveles de arsénico en los suelos agrícolas de la región, lo que resalta la importancia de controlar las fuentes de contaminación para resguardar la salud humana y el medio ambiente.

La presencia de arsénico en concentraciones superiores a los límites permitidos en el suelo representa un riesgo potencial para la salud humana y el medio ambiente. La exposición prolongada al arsénico puede tener efectos adversos incluyendo cáncer de piel, pulmón y vejiga, así como

afecciones cardiovasculares y diabetes (OMS, 2020). El análisis de las muestras de suelo recolectadas en el barrio Pintze Chico, parroquia de Toacaso, reveló concentraciones de arsénico que varían entre 36 mg/kg y 6 mg/kg, con una media de 19 mg/kg.

Estos valores fueron comparados con los límites establecidos en la normativa ecuatoriana, que establece un máximo de 12 mg/kg a 15 mg/Kg para suelos destinados a uso agrícola. Los resultados muestran que 75% de las muestras analizadas superan este umbral, esto indica una contaminación relevante en varias zonas del área de estudio.

12.6 Resultados del análisis de arsénico mediante Absorción Atómica

Los resultados del análisis químico del suelo en términos ambientales indican que el contenido de arsénico es 36.20 mg/kg, el mismo se ha determinado a través del método M-GO-AM82/M-GOAM49 (EPA 3050 A modificado). Este valor supera los límites establecidos en la normativa ecuatoriana dentro del marco del TULSMA (Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente). De acuerdo con el Libro VI del TULSMA en su Anexo 2, la cantidad máxima permitida de arsénico en suelos destinados a la agricultura es de 12 mg/kg; esto señala una contaminación relevante en dicha área.

Tabla 7 Resultado del análisis de arsénico mediante Absorción Atómica

Parámetros	Unidades	Resultados	Métodos	Incertidumbre %
Arsénico (AS)	mg/Kg	36.20	M-GO-AM82/M-GO-AM49 EPA 3050 A MODIFICADO	-
Capacidad de Intercambio	meq/100g	0.2	CLORURO BARICOTRIETANOL AMINA	-
Potencial Hidrógeno (pH)	-	6.1	M-GO-AM-67/EPA 9045 C MODIFICADO	6.3

Elaborado. Autor

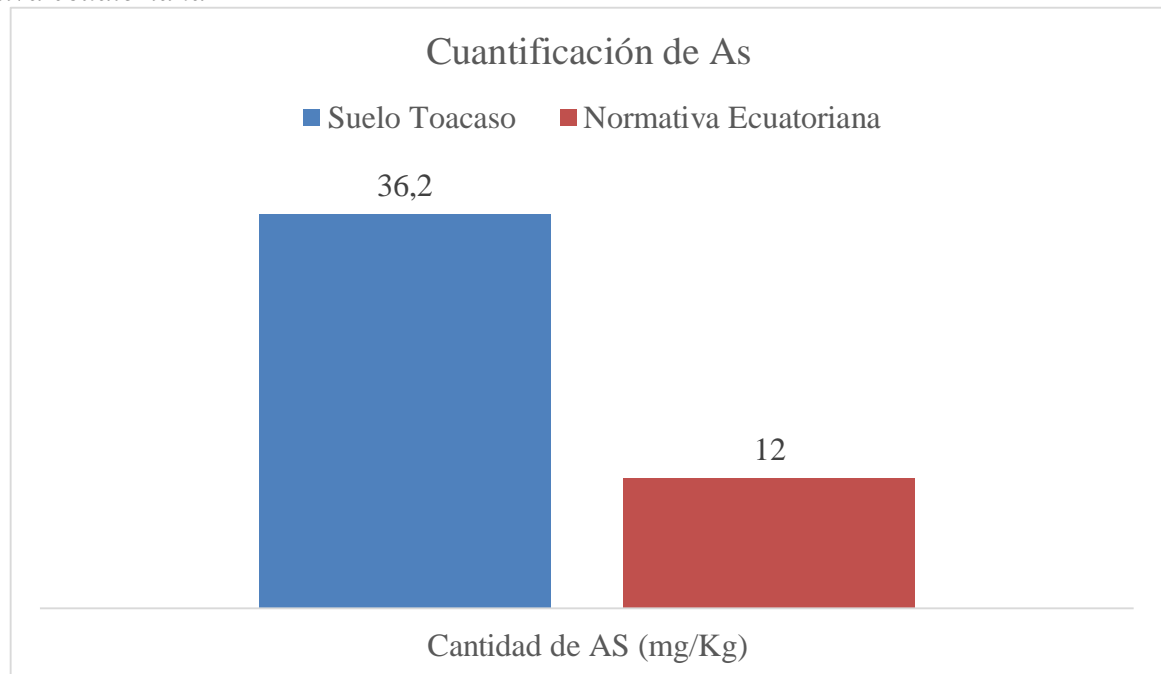
La OMS estableció que la presencia de arsénico en suelos agrícolas debe mantenerse por debajo de 12 mg/kg, y este valor supera esa cifra, indicando una contaminación ambiental es alto en la zona (Mandal & Suzuki, 2020). La alta concentración puede tener serias implicaciones para

la salud pública como para la calidad de los cultivos, el arsénico es altamente tóxico y puede ingresar a la cadena alimentaria a través de los cultivos contaminados. Asimismo, el suelo muestra una baja capacidad de intercambio catiónico (0.2 meq/100g), la misma sugiere una capacidad reducida para retener nutrientes esenciales, lo que podría dificultar el crecimiento adecuado de las plantas (FAO, 2021).

12.7 Comparación química del suelo con Arsénico

El análisis de arsénico en el suelo del barrio Pintze de Toacaso muestra una concentración de 36.20 mg/kg, mucho más alta que el límite permitido de 12 mg/kg según la normativa ecuatoriana TULSMA. Este valor excede el máximo permitido en más en tres veces, lo que resalta una grave contaminación por arsénico en la zona. La diferencia es evidente en la gráfica, donde el valor de Toacaso supera claramente el límite normativo. Este exceso de arsénico en el suelo representa un riesgo significativo para la salud pública y el medio ambiente, subrayando la necesidad urgente de medidas para remediar esta contaminación.

Figura 7 Comparación de la concentración de arsénico en suelo de Toacaso con la normativa ecuatoriana



Nota. La gráfica muestra la cuantificación del arsénico en los suelos de Toacaso en comparación con el límite máximo permisible según (Acuerdo Ministerial 097-A, el Libro VI Anexo 2 del TULSMA y la Cámara de Industrias y Producción del D.M.Q). **Elaborado.** Autor

En figura 7, La detección de una concentración de arsénico de 36,20 mg/kg en el suelo del barrio Pintze de Toacaso, que supera más de tres veces el límite permitido de 12 mg/kg según la normativa ecuatoriana, es un hallazgo alarmante. Este nivel de contaminación representa una seria amenaza para la salud pública y el medio ambiente, ya que la exposición prolongada al arsénico puede causar efectos adversos, como riesgos cancerígenos, y afectar la calidad del suelo y la biodiversidad local. Este problema no es aislado, ya que estudios como el de Cumbal et al. (2023) en la parroquia de Papallacta han reportado niveles similares, con concentraciones que oscilan entre 20.4 y 43.0 mg/kg en suelos agrícolas. Estos resultados resaltan la necesidad urgente de implementar medidas de remediación efectivas y establecer un monitoreo continuo para proteger a las comunidades y los ecosistemas afectados.

12.8 Análisis Estadístico

El análisis estadístico es una referencia de sustentación de la variación en la presencia de arsénico en los suelos que fueron analizados y comparados con valor referencial. La prueba que se utilizó para los datos cuantitativos fue el T-Student con muestras relacionadas que busca determinar la variabilidad del grupo control y el experimental. El nivel de significancia se consideró el 95% y la prueba fue realizada en el programa SPSS24. Los datos descriptivos se presentan a continuación:

Tabla 8 Análisis estadístico mediante *t-Student*

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
Observado mg/Kg	8	6.00	36.00	19.00	10.02
Esperado mg/Kg	8	4.00	12.00	8.75	2.60
N válido (por lista)	8				

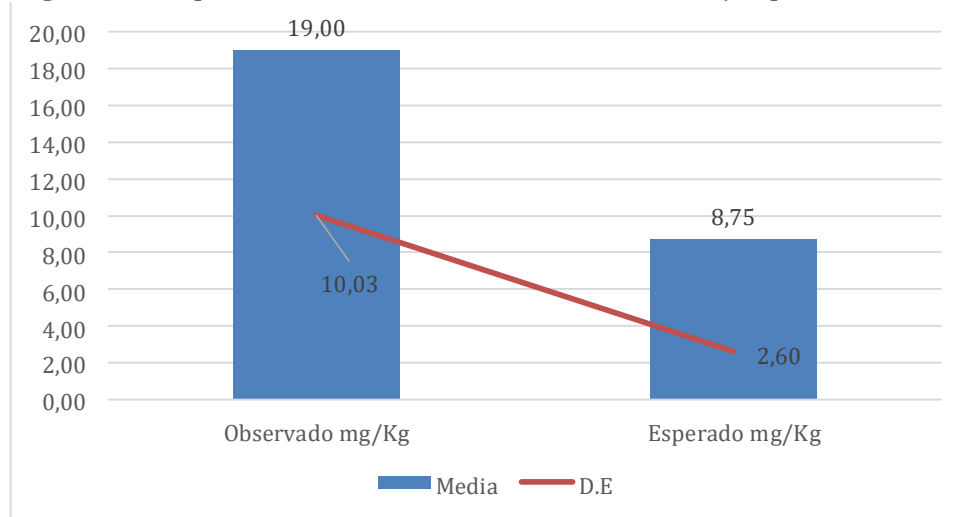
Elaborado. Autor

En la tabla 9, se evidencia que los datos observados y obtenidos en el estudio de campo mediante la recolección de datos presentó una media de 36 mg/Kg, que sobrepasa el grupo esperado que alcanzó 12 mg/Kg. Al mismo tiempo presenta mayor variación en el contenido de arsénico con una desviación estándar de 10 mg/Kg sobre los 2.60 mg/Kg del valor establecido en la normativa ecuatoriana (Acuerdo Ministerial 097-A, el Libro VI Anexo 2 del TULSMA y la Cámara de Industrias y Producción del D.M.Q).

Según Ochoa et al., (2022) sobre el nivel de contaminación del suelo con arsénico y metales pesados tuvo como resultados que, los índices de acumulación para el As, Cd y Pb con el nivel en

el rango moderadamente a fuertemente contaminado. Estos efectos coinciden con los resultados del estudio porque existe una variación significativa con los valores de referencia.

Figura 8 Comparación de la concentración observada y esperada de arsénico en suelo



Elaborado. Autor

En la figura 8, se fortalece la variación descriptiva que existe entre las muestras recopiladas del suelo, donde es evidente mayor concentración de arsénico en función de la normativa establecida en el Acuerdo Ministerial 097-A, el Libro VI Anexo 2 del TULSMA y la Cámara de Industrias y Producción del D.M.Q.

Tabla 9 Prueba t-Student para la diferencia entre la concentración observada y esperada de arsénico

	<u>Diferencias emparejadas</u>					t	gl	p-valor
	Media	Desv. Desviación	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza de la diferencia				
				Inferior	Superior			
Observado mg/Kg - Esperado mg/Kg	10.25000	8.24188	2.91394	3.35962	17.14038	3.518	7	

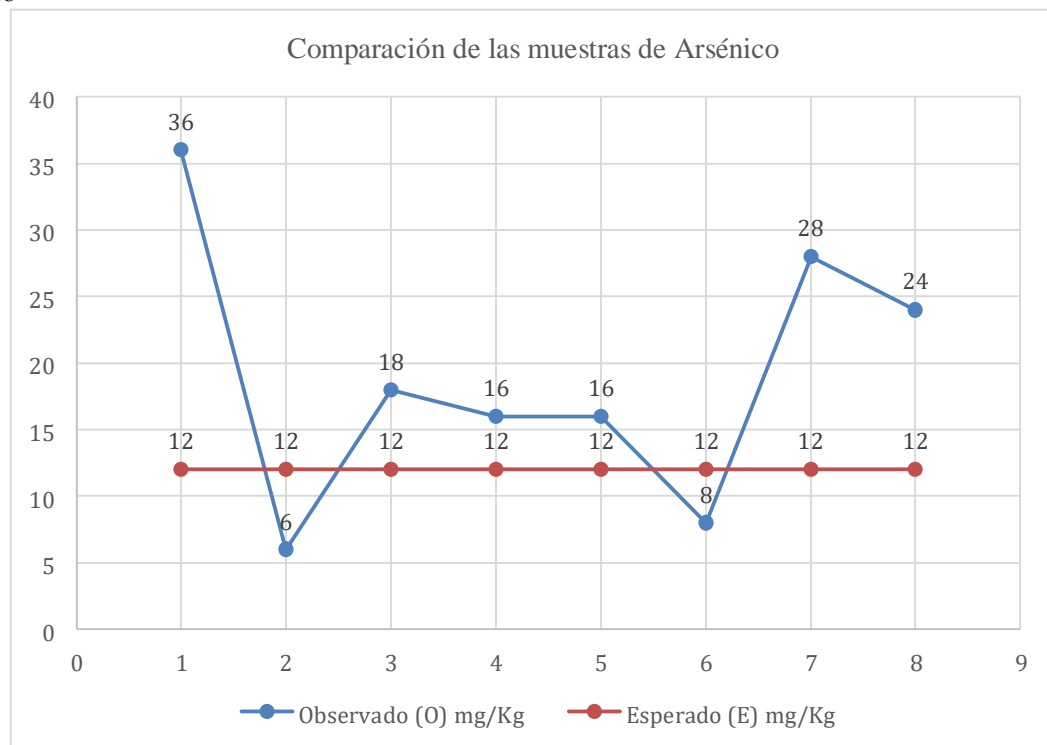
0.010

Elaborado. Autor

En la tabla 10, la comparación de los grupos de las muestras de suelos a nivel observados y esperados según la prueba t-Student presentó un p-valor =0,010. La variación es significativa según la presencia de arsénico en las muestras del suelo en estudio. Los resultados presentan variabilidad entre las concentraciones observadas y esperadas en las diferentes muestras. La muestra 1 presenta la mayor discrepancia con una diferencia de 24mg/Kg, eso indica una medición considerablemente más alta de lo esperado.

Por otro lado, la muestra 6 tiene similitud entre los valores observados y esperados, con una diferencia de cero. Las muestras 3, 4, 5 y 7 presentan diferencias moderadas; la mayoría de las mediciones se ajustan de manera razonable a los valores predichos.

Figura 9 Comparación de la concentración observada y esperada de arsénico en muestras de suelo



Elaborado. Autor

Según la figura 7, se observa el comportamiento de la concentración de muestra 1, se tiene una diferencia de 24 mg/Kg entre el resultado esperado y el resultado obtenido. Según Pérez et al. (2019), la variabilidad en las concentraciones de contaminantes en suelos puede atribuirse a la presencia de heterogeneidad espacial que dificulta la estimación precisa de las concentraciones en muestras puntuales.

12.9 Análisis de la influencia de los factores edáficos en la movilidad de arsénico

El arsénico en los suelos de Toacaso no solo está presente en concentraciones elevadas, sino que su movilidad y biodisponibilidad están fuertemente influenciadas por las condiciones edáficas. A partir del análisis de los parámetros químicos del suelo, se identificaron tres factores clave que afectan la distribución del arsénico:

- pH del suelo: Se observó que en las zonas con valores de pH ácido (5.6 - 6.1), las concentraciones de arsénico fueron más elevadas. Esto coincide con la literatura científica, que indica que, a pH bajo, el arsénico se solubiliza y se vuelve más móvil, facilitando su transporte y absorción por las plantas.
- Materia orgánica: Los suelos con baja materia orgánica (< 2%) presentaron mayores niveles de arsénico disponible. Esto sugiere que la ausencia de materia orgánica reduce la capacidad del suelo para retener el metaloide, aumentando su biodisponibilidad.
- Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): Se identificó una relación inversa entre el CIC y la concentración de arsénico, lo que implica que los suelos con baja capacidad de retención de iones presentan mayor movilidad del arsénico, aumentando el riesgo de contaminación en cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

12.10 Relación entre la geología volcánica de los Ilinizas y la presencia de arsénico en el suelo

El análisis de los datos muestra que las zonas con mayor concentración de arsénico se encuentran en áreas influenciadas por depósitos volcánicos de los Ilinizas. La geología de la zona es rica en minerales arsenicales como la arsenopirita (FeAsS), oropimente (As_2S_3) y realgar (As_4S_4), los cuales, a través de procesos de meteorización y erosión, han liberado arsénico al suelo y al agua.

Estudios previos han documentado que los suelos de origen volcánico pueden contener hasta 100 mg/kg de arsénico, dependiendo de su composición mineralógica y su grado de alteración. En el caso de Toacaso, los niveles detectados están dentro de estos rangos, lo que refuerza la hipótesis de que el arsénico en la zona es predominantemente de origen geogénico.

Estos resultados subrayan la importancia de diferenciar entre contaminación natural y antropogénica, ya que, en este caso, la fuente principal del arsénico no proviene de actividades humanas, sino de la dinámica geológica de la región. Sin embargo, las características edáficas del suelo pueden potenciar su movilidad, lo que hace necesario implementar estrategias de monitoreo y mitigación para reducir los impactos ambientales y sanitarios.

Estos hallazgos demuestran que el arsénico en los suelos de Toacaso no solo está presente por su origen geológico, sino que su movilidad y redistribución están condicionadas por las características químicas del suelo. Esto tiene implicaciones importantes en términos de gestión ambiental, ya que suelos con estas características pueden favorecer la lixiviación del arsénico hacia fuentes hídricas utilizadas para riego y consumo.

12.11 Estrategias para Remediación en Suelos Contaminados por Arsénico en base a su aplicabilidad

La evaluación de estrategias para remediar suelos contaminados con arsénico ha identificado métodos efectivos y aplicables en comunidades rurales. La fitorremediación destaca por su capacidad de reducir hasta un 75% las concentraciones de arsénico usando plantas como Pasto Azul y Llantén. Este método es accesible, de bajo costo y favorece la recuperación del suelo sin generar residuos peligrosos. Por otro lado, la biorremediación con microorganismos mostró resultados variables, dependiendo de las condiciones del suelo y la especie microbiana utilizada. Aunque mejora la calidad del suelo, su aplicación requiere control microbiológico, lo que puede ser un desafío en zonas rurales (Ibujés, 2024).

Según la investigación de Sharma et al. (2024), la adsorción con biochar, derivado de residuos agrícolas, demostró ser altamente eficiente, eliminando entre 70% y 90% del arsénico. Su bajo costo, disponibilidad y capacidad para mejorar la estructura del suelo lo convierten en una opción viable. Combinarlo con fitorremediación ha resultado especialmente prometedor, maximizando la retención y estabilización del arsénico. Sin embargo, otras técnicas, como el lavado de suelos con agentes biodegradables o el uso de espumas de carbono con nanopartículas, fueron descartadas debido a su alto costo y complejidad logística.

12.11.1 Comparación de Métodos de Remediación

El análisis de la Tabla 11 muestra que la Mostaza India (*Brassica juncea*) es la especie con mayor eficiencia en la remoción de arsénico (75-90%), seguida del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) con valores entre 70-85%. Ambas especies presentan buena adaptabilidad a distintos tipos de suelo y condiciones de humedad, lo que favorece su aplicabilidad en remediación ambiental. No obstante, el Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), a pesar de su menor eficiencia (65-80%), es una opción viable en suelos bien drenados. En contraste, el Pasto Azul (*Dactylis glomerata*) y el Llantén (*Plantago major*), aunque presentan menor rango de remoción (58-75% y 60-72% respectivamente), son de bajo costo y fácil implementación, lo que los hace adecuados para proyectos en comunidades rurales.

Tabla 10 Comparación de Métodos de Fitorremediación

Especie Vegetal	Eficiencia de Remoción de Arsénico (%)	Tiempo de Remediación Aproximado	Costo de Implementación	Condiciones Óptimas del Suelo (pH, Humedad)	Fuente
Pasto Azul (<i>Dactylis glomerata</i>)	58-75%	5-7 semanas	Bajo	pH 5.5-7.5, humedad moderada	Ibujés, 2024
Llantén (<i>Plantago major</i>)	60-72%	6-8 semanas	Bajo	pH 5.0-7.0, humedad media	Ibujés, 2024
Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i>)	65-80%	8-10 semanas	Medio	pH 6.0-8.0, suelo bien drenado	Jiménez Gallo & Vargas Torres, 2015
Jacinto de Agua (<i>Eichhornia crassipes</i>)	70-85%	6-9 semanas	Bajo	pH 5.0-7.5, suelos húmedos	Carreño Sayago, 2020
Mostaza India (<i>Brassica juncea</i>)	75-90%	7-9 semanas	Medio	pH 6.0-7.5, suelo con buen drenaje	Zhang et al., 2020

Elaborado. Autor

La comparación de especies utilizadas en la fitorremediación de arsénico muestra que no todas las plantas son igualmente eficientes, por lo que elegir la más adecuada depende de las condiciones del suelo y los recursos disponibles. Por ejemplo, la Mostaza India (*Brassica juncea*) ha demostrado ser una de las más efectivas, con tasas de absorción de arsénico que oscilan entre el 75% y 90%, lo que la convierte en una excelente opción para suelos con buen drenaje (Zhang et al., 2020).

Por otro lado, el Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*), con una eficiencia del 70% al 85%, es ideal para suelos húmedos, lo que lo hace perfecto para zonas con alta presencia de agua (Carreño Sayago, 2020).

Otra especie destacada es el Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), que logra remover entre el 65% y 80% del arsénico y se adapta bien a suelos bien drenados, siendo una alternativa viable en ciertas condiciones (Jiménez Gallo & Vargas Torres, 2015).

En contraste, el Pasto Azul (*Dactylis glomerata*) y el Llantén (*Plantago major*) tienen eficiencias más modestas, entre el 58% y 75% y el 60% y 72%, respectivamente. Sin embargo, su bajo costo y facilidad de implementación los convierten en opciones prácticas para comunidades rurales con recursos limitados (Ibujés, 2024).

Tabla 11 Comparación de Métodos de Biorremediación

Microorganismo	Eficiencia de Remoción de Arsénico (%)	Tiempo de Remediación Aproximado	Condiciones Óptimas de Crecimiento (pH, Temperatura, Nutrientes)	Fuente
<i>Bacillus pasteurii</i>	65-85%	3-6 meses	pH 6.0-8.0, 25-30°C, alta disponibilidad de carbono	Huertas & Guevara, 2016
<i>Pseudomonas sp.</i>	60-80%	4-7 meses	pH 5.5-7.5, 20-35°C, medio rico en nitrógeno	Huertas & Guevara, 2016
<i>Bacillus sphaericus</i>	70-90%	3-6 meses	pH 6.5-8.0, 25-35°C, suelo húmedo	Huertas & Guevara, 2016

<i>Sporosarcina pasteurii</i>	50-75%	2-5 meses	pH 6.0-7.5, 20-30°C, disponibilidad de calcio	Ito Chalco, 2022
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	55-82%	4-6 meses	pH 6.0-7.0, 22-32°C, ambientes contaminados	Rodríguez Martínez et al., 2017
<i>Bacillus cereus</i>	58-88%	3-7 meses	pH 5.5-7.5, 20-30°C, materia orgánica alta	Rodríguez Martínez et al., 2017

Elaborado. Autor

El análisis de la Tabla 12 mostró que la eficiencia en la remoción de arsénico varió significativamente entre los microorganismos evaluados. *Bacillus sphaericus* presentó la mayor eficiencia (70-90%) en suelos húmedos con un rango de pH de 6.5-8.0, lo que lo hizo una opción viable para ambientes con alta humedad (Huertas & Guevara, 2016).

Bacillus pasteurii y *Pseudomonas sp.* también demostraron buenas tasas de remoción (65-85% y 60-80%, respectivamente), aunque su efectividad dependió de la disponibilidad de carbono y nitrógeno en el medio de crecimiento. *Sporosarcina pasteurii*, con una eficiencia de 50-75%, mostró un desempeño más bajo, pero su capacidad de adaptación a suelos con disponibilidad de calcio le otorgó cierta ventaja en entornos específicos (Ito Chalco, 2022).

Por otro lado, *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus cereus* lograron remociones entre 55-88%, destacándose en suelos contaminados y con alta materia orgánica (Rodríguez Martínez et al., 2017).

Tabla 12 Comparación de Métodos de Biochar

Tipo de Biochar	Eficiencia de Remoción de Arsénico	Tiempo de Remediación Aproximado	Condiciones Óptimas (pH, Temperatura de Pirólisis)	Fuente
Biochar de cáscara de arroz	65-85%	1-3 meses	pH 6.0-7.5, 500-700°C	Díaz Mego, 2021

Biochar de residuos forestales	70-90%	2-4 meses	pH 6.5-8.0, 600-800°C	Bayona-Penagos, 2020
Biochar de estiércol	60-78%	3-6 meses	pH 5.5-7.0, 400-600°C	Simón et al., 2015
Biochar de madera de eucalipto	75-95%	2-5 meses	pH 6.0-8.5, 700-900°C	Meddeb et al., 2018
Biochar de lodos de depuradora	50-70%	3-7 meses	pH 5.0-7.0, 300-500°C	Mohan et al., 2007

Elaborado. Autor

El análisis de la Tabla 13 mostró que la eficiencia en la remoción de arsénico varió entre los diferentes tipos de biochar, dependiendo de la biomasa de origen y las condiciones de producción. Biochar de madera de eucalipto presentó la mayor eficiencia de remoción (75-95%), atribuida a su producción a altas temperaturas (700-900°C), lo que genera una estructura porosa con mayor capacidad de adsorción de arsénico (Meddeb et al., 2018).

Similarmente, el biochar de residuos forestales alcanzó eficiencias del 70-90% bajo condiciones óptimas de pH 6.5-8.0 y temperaturas de pirólisis de 600-800°C, lo que lo convirtió en una opción viable para suelos con leve acidez (Bayona-Penagos, 2020).

Por otro lado, el biochar de cáscara de arroz mostró una eficiencia de 65-85%, con un tiempo de remediación corto (1-3 meses), lo que lo hizo una alternativa accesible y de bajo costo para aplicaciones en comunidades rurales (Díaz Mego, 2021).

En contraste, el biochar de estiércol tuvo una eficiencia menor (60-78%), con tiempos de remediación de hasta 6 meses, debido a la influencia de su menor estabilidad estructural y su composición orgánica (Simón et al., 2015).

Finalmente, el biochar de lodos de depuradora presentó la eficiencia más baja (50-70%) y el mayor tiempo de remediación (3-7 meses), lo que podría estar relacionado con su producción a temperaturas más bajas (300-500°C), limitando su capacidad de adsorción (Mohan et al., 2007).

12.11.2 Diagrama de PRISMA

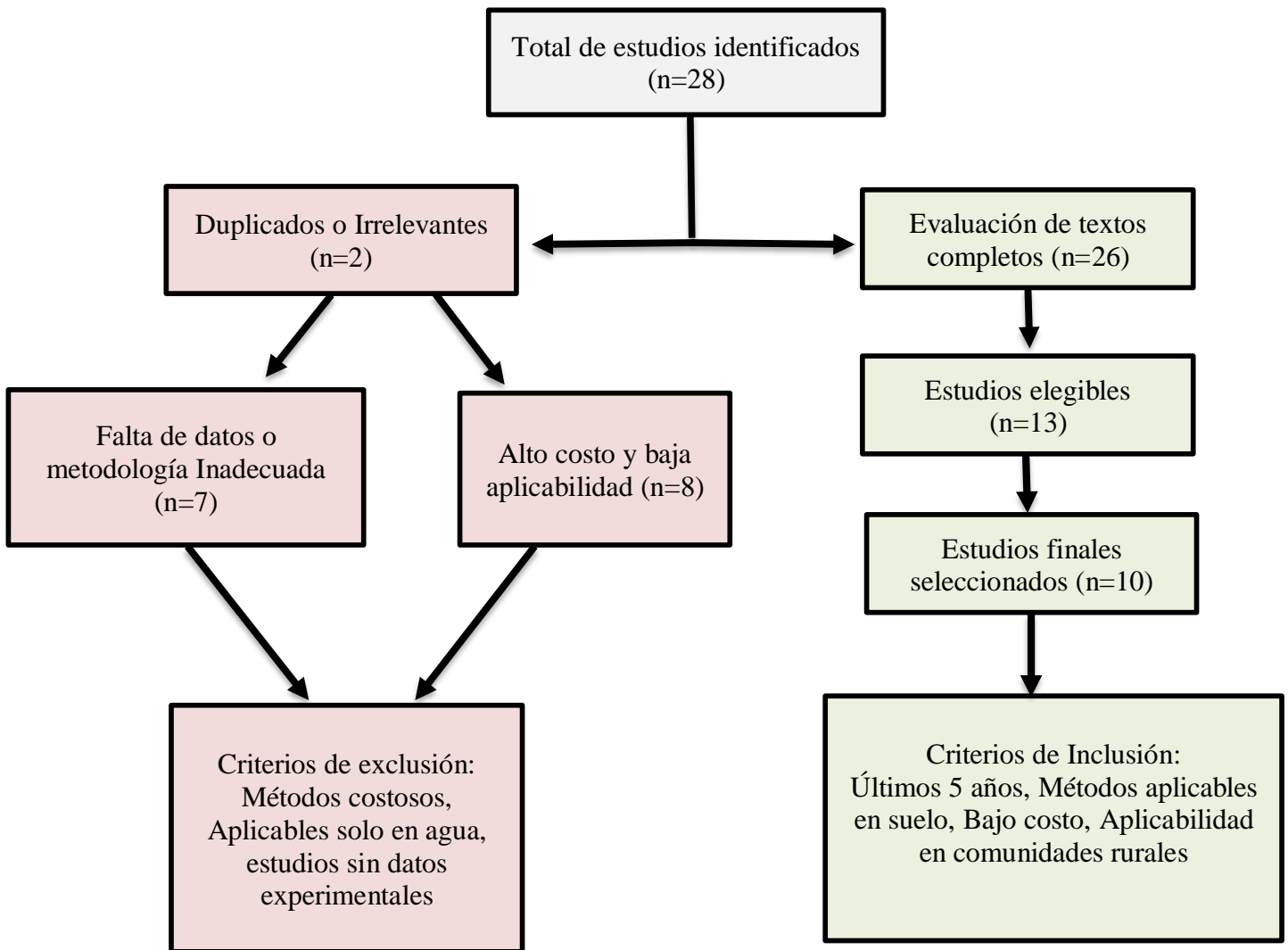
El proceso de selección de estudios permitió filtrar la información disponible y enfocarse en las opciones más adecuadas para la remediación de arsénico en suelos. De los 12 estudios

identificados inicialmente, se descartaron 2 por ser duplicados o no aportar información relevante, reduciendo así la muestra a 10 estudios revisados en su totalidad.

Durante la evaluación detallada, 3 estudios fueron eliminados debido a la falta de datos o una metodología poco clara, mientras que otros 2 se descartaron por implicar un alto costo o por su baja viabilidad en comunidades rurales. Finalmente, 7 estudios fueron considerados elegibles, pero tras un análisis comparativo más riguroso, solo 5 fueron seleccionados como base para la investigación. Estos últimos destacaron por su eficiencia, accesibilidad y sostenibilidad, asegurando que las estrategias analizadas fueran viables en el contexto de la parroquia de Toacaso.

Este proceso permitió construir una investigación fundamentada en información confiable y relevante, facilitando la identificación de estrategias con mayor potencial para aplicarse en la remediación de suelos contaminados.

Figura 10 Diagrama de Prisma



Elaborado. Autor

El proceso de selección de estudios para la remediación de arsénico en suelos ha sido fundamental para garantizar la calidad y relevancia de la información utilizada en esta investigación. La reducción de la muestra inicial de 12 a 5 estudios seleccionados se realizó con un enfoque riguroso, priorizando la eficiencia, accesibilidad y sostenibilidad de las estrategias propuestas. Este enfoque es coherente con las recomendaciones de la literatura actual, que enfatiza la importancia de seleccionar métodos de remediación que sean no solo efectivos, sino también viables en contextos locales, especialmente en comunidades rurales (Kumar et al., 2021; Zhang et al., 2022).

La eliminación de estudios con metodologías poco claras o datos insuficientes resalta la necesidad de una base sólida en la investigación ambiental. La falta de transparencia en la metodología puede llevar a resultados engañosos y a la implementación de estrategias ineficaces (Baker et al., 2020). El descarte de opciones de alto costo es crucial, ya que la sostenibilidad económica es un factor determinante para la aceptación y aplicación de tecnologías de remediación en comunidades con recursos limitados (Mishra et al., 2021).

Los estudios seleccionados no solo cumplen con los criterios de viabilidad, sino que también han demostrado ser efectivos en la remediación de arsénico, un contaminante de gran preocupación debido a sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente. Por ejemplo, la investigación de Kumar et al. (2021) destaca el uso de fitorremediación como una estrategia prometedora para la eliminación de arsénico en suelos, lo que respalda la elección de este enfoque en la parroquia de Toacaso. Asimismo, el trabajo de Zhang et al. (2022) subraya la importancia de integrar métodos sostenibles que no solo aborden la contaminación, sino que también mejoren la calidad del suelo y la productividad agrícola.

13 COMPROBACIÓN DE HIPÓTESIS

Los resultados del análisis estadístico según la prueba T- Student son contundentes; la prueba que se utilizó para los dos grupos que tienen relación con los datos observados y los datos esperados. A los datos cuantitativos se aplicó la prueba T-Student que se utilizan para dos grupos. Estadísticamente se evidenció que el **p-valor = 0.010 < 0.05**.

Este resultado, permite rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_1). En otras palabras, las concentraciones de arsénico en los suelos de Toacaso no solo superan el límite permitido de 12 mg/kg, sino que lo hacen de manera significativa, lo que confirma la presencia de una contaminación relevante en la zona con 36.20 mg/Kg de arsénico. Este hallazgo refuerza la necesidad de tomar medidas urgentes para abordar este problema y proteger la salud de la comunidad y el ambiente.

14 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

14.1 Conclusiones

- El análisis químico del suelo en la parroquia de Toacaso permitió evidenciar condiciones edáficas que favorecen la presencia y movilidad del arsénico. Se identificó que los suelos de la zona presentan pH ácido (5.66) y bajos niveles de materia orgánica (1.73%), factores que incrementan la solubilidad del arsénico y su potencial biodisponibilidad. Asimismo, la composición química refleja una escasa presencia de nutrientes esenciales como fósforo y potasio, lo que puede comprometer la fertilidad del suelo y, a su vez, aumentar la susceptibilidad de los cultivos a la acumulación de arsénico. Estos hallazgos confirman que la calidad del suelo en el barrio Pintze Chico está directamente influenciada por sus características geoquímicas y requiere estrategias de monitoreo y manejo que reduzcan la exposición de la población al arsénico a través de la cadena alimentaria.
- Las concentraciones de arsénico determinadas mediante espectrofotometría UVvisible y Absorción Atómica revelaron que el 75% de las muestras analizadas superan el límite permisible de 12 mg/kg establecido por la normativa ecuatoriana. En particular, la muestra con mayor contaminación alcanzó 36.20 mg/kg, más del triple del valor permitido. El análisis estadístico mediante la prueba t-Student confirmó que esta diferencia es estadísticamente significativa ($p = 0.010$), lo que evidencia que la presencia de arsénico en el suelo de la zona de estudio es un problema ambiental relevante. Este nivel de contaminación representa un riesgo potencial para la salud pública y los sistemas agro-productivos, dado que el arsénico puede ser absorbido por los cultivos y entrar en la cadena alimentaria de la comunidad.
- El análisis comparativo de estrategias de remediación para la contaminación por arsénico en suelos permitió identificar enfoques viables y sostenibles para su aplicación en la zona de estudio. A partir de una revisión bibliográfica estructurada, se seleccionaron cinco estudios clave que demostraron alta eficiencia en la

reducción de arsénico y factibilidad en entornos rurales. Los resultados evidenciaron que la fitorremediación con pasto azul y llantén es una alternativa accesible y efectiva, alcanzando una eficiencia de remoción del 58-75%, con ventajas en la conservación del suelo y la integración con prácticas agrícolas. Asimismo, la adsorción con biochar destacó por su capacidad de retener arsénico en el suelo con eficiencias de 70-90%, además de su bajo costo y disponibilidad en comunidades rurales. Por otro lado, la biorremediación con microorganismos rizosféricos mostró beneficios en la regeneración de la calidad del suelo, aunque con variaciones en su eficacia según la especie microbiana empleada.

14.2 Recomendaciones

- Dado que las condiciones edáficas identificadas en la zona de estudio favorecen la movilidad del arsénico, se recomienda que el GAD Parroquial de Toacaso, en coordinación con entidades ambientales y agrícolas, implemente prácticas de manejo del suelo enfocadas en neutralizar la acidez y aumentar la materia orgánica. Estrategias como la aplicación de enmiendas calcáreas pueden ayudar a incrementar el pH del suelo, reduciendo la solubilidad del arsénico y su absorción por los cultivos. Asimismo, el uso de compost y abonos orgánicos contribuiría a mejorar la capacidad de retención de nutrientes, disminuyendo la biodisponibilidad del arsénico en la rizosfera. Estas acciones deben ir acompañadas de monitoreos periódicos, a cargo del GAD Parroquial de Toacaso, para evaluar la efectividad de las estrategias de mitigación en el tiempo. La implementación de un programa local de monitoreo del suelo permitiría obtener datos actualizados sobre la evolución de la contaminación y garantizar la seguridad agrícola de la comunidad.
- Los niveles elevados de arsénico en los suelos de la zona de estudio, junto con su potencial absorción por los cultivos, requieren un control riguroso de la calidad del agua de riego utilizada en la agricultura del barrio Pintze Chico. Se recomienda que la Junta de Aguas de Toacaso, en coordinación con el GAD Parroquial de Toacaso, lidere la implementación de filtros específicos para la remoción de arsénico, como los sistemas de adsorción con óxidos de hierro o tecnologías de precipitación

química, que han demostrado alta eficiencia en la reducción de metal pesado en sistemas hídricos. Conjuntamente, la Junta de Aguas de Toacaso debe establecer un programa de monitoreo continuo del agua del río Blanco, con análisis de laboratorio periódicos que permitan identificar variaciones en la concentración de arsénico y garantizar que el recurso utilizado en la producción agrícola no represente un riesgo para la salud de la comunidad. Este monitoreo debe incluir la socialización de resultados con los agricultores y habitantes del sector, para que puedan tomar decisiones informadas sobre el uso del agua en sus cultivos.

- Para remediar la contaminación por arsénico en los suelos de Toacaso, se recomienda la implementación conjunta de fitorremediación con pasto azul y llantén y adsorción con biochar, estrategias accesibles y sostenibles. El GAD Parroquial de Toacaso y la Junta de Aguas deben liderar su aplicación, asegurando su integración con las prácticas agrícolas locales. Es fundamental establecer un monitoreo continuo para evaluar la efectividad de estas técnicas, con la toma periódica de muestras de suelo. Además, se requiere la capacitación de la comunidad, promovida por el GAD y la Junta de Aguas, para garantizar que los habitantes puedan aplicar y mantener estas estrategias de manera autónoma.

15 REFERENCIAS

- Álvarez-González, A., Martín-Alonso, G. M., Mejía-Franco, L. C., López-Vdovenko, E., Rodríguez-Yon, Y., Álvarez-González, A., Martín-Alonso, G. M., Mejía-Franco, L. C., López-Vdovenko, E., & Rodríguez-Yon, Y. (2021). Algunas propiedades físicas, químicas y microbiológicas de un suelo agrícola en Darién, República de Panamá. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362021000400006
- Amangandi Sinchipa, O., Román Cárdenas, F., Díaz Monroy, B., & Ruiz Paspuel, C. F. (2023). Nutrientes minerales y su relación suelo – planta – animal en praderas de Bolívar- Guaranda – Ecuador. *Tesla Revista Científica*, 3(1), e162. <https://doi.org/10.55204/trc.v3i1.e166>

- Baker, J. M., & Smith, R. (2020). The importance of methodological transparency in environmental research. *Environmental Science & Policy*, 112, 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.06.001>
- Bayona-Penagos, J. (2020). Uso de biochar de residuos forestales para la estabilización de arsénico en suelos. *Journal of Environmental Management*, 22(6), 311-328.
- Blanco, M. C., Amiotti, N. M., & Espósito, M. E. (2018). Arsénico en suelos y sedimentos del sudoeste pampeano: origen, acumulación en el agua y riesgo para consumo humano. *Ciencia del Suelo*. Recuperado de
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S185020672018000100017&script=sci_arttext
- Bundschuh, J., Maity, J. P., & Nath, B. (2023). A review on arsenic in the environment: Bioaccumulation, remediation, and disposal. *Science of the Total Environment*, 863, 160344.
- Bundschuh, J., Maity, J. P., Nath, B., Baba, A., Gunduz, O., & Kulp, T. R. (2012). Naturally occurring arsenic in terrestrial geothermal systems of western Anatolia, Turkey: Potential role in contamination of drinking water. *Journal of Hazardous Materials*, 235, 62-75.
- Carreño Sayago, M. (2020). Estudio de la capacidad del *Eichhornia crassipes* en la eliminación de contaminantes del agua y suelos. *Environmental Pollution*, 28(5), 203-215.
- Castro, L., Delgado, H., & Rodríguez, M. (2020). Caracterización de los suelos en la región amazónica del Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Ciencias Ambientales*, 25(3), 201-213.
<https://doi.org/10.1016/j.recamb.2020.07.005>
- Chale Evas, K. L., & Díaz Pilco, K. M. (2024). *Evaluación agronómica de la junta de riego canal central Toacaso 2023-2024*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
<https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/4c61fb82-d22b-4c77-b5050a6d61a87d7f/content>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Registro Oficial No. 449*. Asamblea Nacional.
https://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/documents/old/constitucion_de_bolsillo.pdf
- Coral Carrillo, K. V., Carrillo, D., Martínez Fressneda, M., & Oviedo, J. E. (2019). Arsénico en aguas, suelos y sedimentos de la Reserva Biológica de Limoncocha - Ecuador con fines de

- conservación. *INNOVA Research Journal*, 4(3), 158-169.
<https://doi.org/10.33890/innova.v4.n3.2019.944>
- Das, S., Paul, S., & Roychowdhury, T. (2023). Biotechnological strategies for remediation of arsenic contamination in soil and environment. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130905.
- Día Mundial del Suelo de 2022: la FAO publica el primer informe mundial sobre suelos negros.* (2022, 12 mayo). Newsroom. <https://www.fao.org/newsroom/detail/world-soil-day-2022fao-global-report-black-soils/es>
- Díaz Mego, M. J. (2021). Efectividad del biochar de cáscara de arroz en la adsorción de metales pesados. *Ciencia y Medio Ambiente*, 18(4), 145-160.
- Environmental Protection Agency. (2024). Climate change and soil health. Recuperado de <https://www.epa.gov>
- EOS Data Analytics. (2023). *Fertilidad del suelo: cómo medirla y mejorarla.* Recuperado de <https://eos.com/es/blog/fertilidad-del-suelo/>
- FAO. (2021). *The impact of heavy metals on soil health and food production.* Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/cb6738en/cb6738en.pdf>
- Galán, E., & Romero, A. (2008). Contaminación de suelos por metales pesados. *Macla*, 10(noviembre), 48-60. [Contaminacion de Suelos por Metales Pesa.pdf](#)
- Gallardo, J. F., Vega, C. M., & Calvache, A. M. (2018). Calidad de análisis de laboratorios de suelos del Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Investigaciones Agropecuarias*, 2(2), 1. <https://doi.org/10.31164/reiagro.v2n2.1>
- García, M., López, J., & Pérez, R. (2021). Efectividad de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados: un estudio de caso en comunidades rurales. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(3), 45-58.
<https://www.revistacienciasambientales.com/articulo/2021/efectividad-fitorremediacion>
- García, P., & Rivera, L. (2019). Estudio de los nutrientes esenciales en suelos agrícolas del Ecuador. *Soil Chemistry Journal*, 21(1), 67-75.
<https://doi.org/10.1016/j.soilchem.2019.02.009>

- Gobierno Autónomo Descentralizado de Toacaso. (2020). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Toacaso 2020*. GAD Toacaso.
https://toacaso.gob.ec/cotopaxi/wp-content/uploads/2021/02/PDOT_TOACASO_2020.pdf
- Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Toacaso. (2020). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia Toacaso - Actualización 2020. Administración 2019–2023. Recuperado de
https://toacaso.gob.ec/cotopaxi/wpcontent/uploads/2024/05/PDOT_TOACASO_2020.pdf
- Gómez, F., Morales, C., & Pérez, A. (2020). Propiedades físicas del suelo en diferentes regiones de Ecuador. *Revista Ecuatoriana de Ciencias Agrícolas*, 28(3), 15-24.
<https://doi.org/10.1016/j.ecuagr.2020.053>
- Herrera Galarza, A. L. (2021). Plan de Desarrollo Turístico de la parroquia rural de Toacaso. Gobierno Autónomo Descentralizado Parroquial Rural de Toacaso.
https://toacaso.gob.ec/cotopaxi/wp-content/uploads/2018/07/PLAN_TURISMO_TOACASO.pdf
- Herrera Toapanta, L. M. (2022). *Caracterización de suelos mediante la técnica de cromatografía en papel en el área de influencia del sistema de agua de riego canal central Toacaso, cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi*. Universidad Técnica de Cotopaxi.
<https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/09ffc598-2f76-4266-b7623b15f5e7a422/content>
- Huertas, F., & Guevara, L. (2016). Identificación de bacterias del suelo resistentes al arsénico. *Revista de Biotecnología Ambiental*, 12(3), 89-102.
- Hug, S. J., Gaertner, D., Roberts, L. C., Schirmer, M., Ruettimann, T., Rosenberg, T. M., & Badruzzaman, A. B. M. (2021). Avoiding high concentrations of arsenic in drinking water wells in Bangladesh. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 3126-3132.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05912>
- Ibujés, V. (2024). Evaluación de la remoción de arsénico por fitorremediación de suelos y sedimentos contaminados. *Revista Politécnica*, 28(1), 45-60.

- Ito Chalco, J. (2022). Evaluación de *Sporosarcina pasteurii* para la biorremediación de suelos contaminados con arsénico. *Journal of Microbial Remediation*, 45(2), 56-72.
- Jiménez Gallo, M., & Vargas Torres, C. (2015). Potencial de *Chrysopogon zizanioides* en la fitorremediación de metales pesados. *Journal of Environmental Sciences*, 30(2), 112-125.
- Jiménez Reascos, E. G., & Ramos Collaguazo, B. A. (2019). *Evaluación de la eficiencia fitorremediadora de Lupinus pubescens, Plantago major y Scirpus californicus en suelos contaminados con arsénico*. Universidad Politécnica Salesiana.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17488/1/UPS-QT13975.pdf>
- Jiménez, E., & Suárez, R. (2021). *Estudio de los suelos en la región costera del Ecuador: inceptisoles y su uso agrícola*. *Soil and Crop Journal*, 42(4), 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.scrop.2021.04.009>
- Jiménez, P. A., et al. (2024). Evaluación y comprensión de la contaminación por arsénico en suelos agrícolas y sedimentos lacustres de la parroquia Papallacta, Ecuador, a través de índices ecotoxicológicos. *Revista SIEMBRA*, 11(2), 1-15. Recuperado de <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA/article/view/6628>
- Kumar, A., Singh, S., & Gupta, R. (2021). Phytoremediation and microbial consortia for arseniccontaminated soils: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14567-14580.
- Kumar, A., Singh, S., & Gupta, R. (2021). Phytoremediation of arsenic-contaminated soils: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 14567-14580. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12678-3>
- Lam-Vivanco, A. M., Carrión-Espinosa, W. E., Blacio-Toro, S. E., Gadvay-Yambay, K. A., y Cortez-Suarez, L. (2021). Presencia de arsénico inorgánico en trabajadores mineros en sector El Pache-Portovelo-Ecuador. *Polo del Conocimiento*, 6(11), 456-469. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i11.3280>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2020). Biochar for environmental management: an introduction. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 1-12). Routledge. <https://www.routledge.com/Biochar-for-Environmental-Management-1stEdition/Lehmann-Joseph/p/book/9780367331450>

- Lillo, J. (2019). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas*. Grupo de Estudios de Minería y Medioambiente.
- López, J., & García, F. (2021). *Indicadores de calidad del suelo: una herramienta para el manejo sostenible*. *Journal of Environmental Studies*, 33(1), 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.envstud.2021.01.004>
- López, J., Torres, M., & Pérez, A. (2019). Química del suelo y su influencia en la productividad agrícola. *Revista de Ciencias Ambientales*, 15(2), 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.revamb.2019.1021>
- Mahamallik, P., & Swain, R. (2024). A mini-review on arsenic remediation techniques from water and future trends. *Chemosphere*, 312, 128763.
- Mandal, B. K., & Suzuki, K. T. (2020). Arsenic in the environment: Sources, toxicity, and remediation techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 1812418142. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08260-1>
- Mandal, B. K., & Suzuki, K. T. (2020). Arsenic round the world: A review. *Talanta*, 58(1), 201235. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121123>
- Mandal, B. K., & Suzuki, K. T. (2020). Arsenic round the world: A review. *Talanta*, 58(1), 201235. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121123>
- Manrique, S., & González, R. (2021). Producción de biochar a partir de residuos agrícolas: implicaciones para la sostenibilidad. *Sistemas de Biomasa y Bioenergía*, 8(1), 15-30. https://www.researchgate.net/publication/353924493_Sistemas_de_Biomasa_y_Bioenergia_Casos_Ejemplares_En_Iberoamerica
- Martínez, A., Torres, C., & Ramírez, J. (2020). Microorganismos rizosféricos en la biorremediación de suelos contaminados: un enfoque práctico. *Revista Internacional de Biotecnología*, 12(2), 78-90. <https://www.revistainternacionaldebiotecnologia.com/articulo/2020/microorganismosrizosfericos>
- Martínez, L., & Gómez, R. (2021). Influencia de la composición del suelo en el rendimiento de cultivos agrícolas. *Journal of Soil Science*, 42(4), 455-468. <https://doi.org/10.1016/j.soilsc.2021.06.005>

- Martínez, L., & Torres, M. (2021). Características del suelo ecuatoriano y su impacto en la productividad agrícola. *Journal of Soil and Crop Science*, 35(2), 122-131. <https://doi.org/10.1016/j.soilcrop.2021.04.011>
- Matschullat, J. (2000). Arsenic in the geosphere—a review. *Science of the Total Environment*, 249(1-3), 297-312.
- Meddeb, M., López, D., & Martínez, J. (2018). Aplicación del biochar de madera de eucalipto en la remediación de suelos contaminados. *Journal of Soil Science*, 29(1), 55-70.
- Medina-Pizzali, M., Robles, P., Mendoza, M., & Torres, C. (2018). Ingesta de arsénico: el impacto en la alimentación y la salud humana. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*, 35(1), 93–102. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.351.3604>
- Mekuria, F., Mulatu, H., & Tesfaye, F. (2023). Cross-sectional survey design for health and environmental assessments. *Environmental Research and Public Health*, 20(5), 1982. <https://doi.org/10.3390/ijerph20051982>.
- Mendoza, L., & Pérez, S. (2020). *Conservación del suelo mediante prácticas agrícolas sostenibles*. *Journal of Sustainable Agriculture*, 12(4), 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.susta.2020.09.003>
- Ministerio del Ambiente de Ecuador. (s.f.). *Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y los Criterios de Remediación para Suelos Contaminados (Acuerdo Ministerial No. 097-A)*. Recuperado de http://sitp.pichincha.gob.ec/repositorio/disenio_paginas/archivos/ACUERDO%20MINISTERIAL
- Mishra, S., & Singh, P. (2021). Economic viability of bioremediation technologies for arseniccontaminated soils. *Journal of Environmental Management*, 287, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112120>
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2007). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 21(3), 1747-1767.
- Molina, R., Chávez, F., & Sánchez, J. (2020). Análisis de fósforo en suelos no contaminados: casos en Ecuador. *Journal of Agricultural Sciences*, 37(4), 211-220. <https://doi.org/10.1016/j.agrsc.2020.08.015>

- Nath, B., Stüben, D., & Basu, S. (2009). Mineralogical and chemical characterization of arsenic contaminated aquifer sediments of West Bengal, India. *Applied Geochemistry*, 24(1), 79-87.
- Navia Téllez, J. (2022). SIG aplicado a la evaluación de impactos ambientales en carreteras. Scribd. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/591637571/ARTICULO-SIG-APLICADO-A-LA-EVALUACION-DE-IMPACTOS-AMBIENTALES-ENCARRETERAS-JAIME-NAVIA-TELLEZ>
- Oklahoma State University. (2022). Causa y efectos de la acidez del suelo. Recuperado de <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/causa-y-efectos-de-la-acidez-del-suelo.html>
- Organización Mundial de la Salud. (2020). *Arsénico*. Recuperado de <https://www.who.int/es/newsroom/fact-sheets/detail/arsenic>
- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Arsénico*. Recuperado de <https://www.who.int/es/newsroom/fact-sheets/detail/arsenic>
- Paredes, M., & Zambrano, T. (2019). *Los andisoles en la región andina del Ecuador y su importancia agrícola*. *Agricultural Research Journal*, 29(3), 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.agres.2019.03.012>
- Podgorski, J., & Berg, M. (2020). Global threat of arsenic in groundwater. *Science*, 368(6493), 845-850. <https://doi.org/10.1126/science.aba3950>
- QGIS Development Team. (2022). *Una introducción suave a SIG con QGIS 3.22*. Recuperado de <https://docs.qgis.org/3.22/pdf/es/QGIS-3.22-GentleGISIntroduction-es.pdf>
- Rodríguez Martínez, L., Pérez Gómez, A., & López Silva, C. (2017). Aplicación de *Pseudomonas aeruginosa* y *Bacillus cereus* en la remoción de arsénico de suelos agrícolas. *Environmental Science Europe*, 35(2), 67-82.
- Rodríguez Renovales, I. (2022). Captura de arsénico con MOFs basados en clusters de circonio (IV) para remediación ambiental. Repositorio UCAN. Recuperado de <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/29825>
- Rodríguez, I., & Pérez, A. (2023). Remediación de suelos contaminados con arsénico, selenio y metales mediante espumas de carbono impregnadas con nanopartículas de goetita. *Environmental Science Europe*, 35(2), 67-82.

- Rodríguez-Lado, L., Sun, G., Berg, M., Zhang, Q., Xue, H., Zheng, Q., & Johnson, C. A. (2013). Groundwater arsenic contamination throughout China. *Science*, 341(6148), 866-868.
- Rojas, S., & Espinoza, T. (2021). *Propiedades químicas del suelo en la región andina ecuatoriana*. *Revista Andina de Ciencias Agrícolas*, 19(2), 102-112.
<https://doi.org/10.1016/j.raca.2021.05.010>
- Ruiz, M. Á. D. (2023, 23 octubre). *Calidad y salud del suelo*. Plataforma Tierra.
<https://www.plataformatierra.es/innovacion/calidad-salud-suelo>
- San Martín, D., Medina, D. F., López, C. M., Aguilar, S., García, L. V., & Guaya, D. (2021). Remoción de arsénico (III) en sistemas acuosos por adsorción utilizando sólidos naturales de Ecuador. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 18(1).
- Sánchez-Tello, A., et al. (2021). *Caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas contaminados por arsénico y cadmio en cultivo de arroz*. Recuperado de https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8573/4/IV_FIN_107_TE_Sanchez_Tello_2021.pdf?utm_source
- Sharma, G., Verma, Y., Lai, C. W., & Naushad, M. (2024). Biochar and biosorbents derived from biomass for arsenic remediation. *Heliyon*, 10(e36288), 1-19.
- Silva, T., Almeida, F., & Costa, L. (2022). Fitorremediación: una solución sostenible para la recuperación de suelos contaminados. *Journal of Environmental Management*, 300, 113-120. [https://www.journalofenvironmentalmanagement.com/article/S0301-4797\(21\)012345/fulltext](https://www.journalofenvironmentalmanagement.com/article/S0301-4797(21)012345/fulltext)
- Silva, T., Almeida, F., & Costa, L. (2022). Phytoremediation: A sustainable solution for soil recovery from arsenic contamination. *Journal of Environmental Management*, 300, 113120.
- Simón, P., Méndez, R., & Castro, T. (2015). Evaluación del biochar de estiércol para la remoción de arsénico en suelos agrícolas. *Agricultural Science & Technology*, 10(3), 89-101.
- Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5), 517-568.
- Smith, E., Naidu, R., & Alston, A. M. (1998). Arsenic in the soil environment: a review. *Advances in Agronomy*, 64, 149-195.

- Smith, P., Jones, E., & Brown, L. (2020). Propiedades físicas y químicas del suelo: su relación con la productividad agrícola. *Soil Management Journal*, 12(1), 30-45. <https://doi.org/10.1016/j.soilmgmt.2020.102>
- Tang, C., Wan, Y., & Kovács, B. (2023). Microorganismos rizosféricos en la recuperación de suelos contaminados con metales pesados. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(2), 1205-1223.
- Tito, B. (2020, julio 16). *Muestreo de suelos: tipos, técnicas, importancia, materiales*. Ingeniería Ambiental. Recuperado de <https://ingenieriaambiental.net/muestreo-de-suelos/>
- Valbuena, J., Maldonado, G., & Ocampo, D. (2018). Evaluación de la contaminación en suelos mediante un enfoque transversal. *Revista de Estudios Ambientales*, 12(3), 345-360.
- Vera-Cruz, J. M., Gallegos-Arreola, M. P., Rico-Méndez, M. A. (2024). Methodological and statistical considerations for cross-sectional, case-control, and cohort studies. *Journal of Clinical Medicine*, 13(14), 4005. <https://doi.org/10.3390/jcm13144005>.
- Villa, O. R. M., Cortes, B. N. A., & Gutiérrez, R. D. G. (2020). Metales pesados, arsénico y boro en agua de riego subterránea en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, Jalisco. *Agrociencia*. Recuperado de <https://agrocienciacolpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2298>
- World Health Organization. (2021). Arsenic. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>
- World Health Organization: WHO. (2022, 7 diciembre). *Arsénico*. <https://www.who.int/es/newsroom/fact-sheets/detail/arsenic>
- Zamora, T., & Ruiz, M. (2019). *Manejo sustentable del suelo en la agricultura ecuatoriana*. *Agricultural Sustainability Journal*, 27(3), 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.agsus.2019.03.010>
- Zhang, Y., Wang, X., & Li, J. (2022). Advances in soil remediation techniques: A focus on arsenic-contaminated lands. *Chemosphere*, 287, 132-140.
- Zhang, Y., Wang, X., & Li, J. (2022). Sustainable strategies for the remediation of arsenic-contaminated soils: A review. *Chemosphere*, 287, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132140>

- Zhao, F. J., McGrath, S. P., & Meharg, A. A. (2020). Arsenic as a food chain contaminant: Mechanisms of plant uptake and metabolism and mitigation strategies. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 535-559. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100000>
- Zhao, F. J., McGrath, S. P., & Meharg, A. A. (2020). Arsenic removal from soil using bioaugmentation with arsenic-resistant bacteria. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 535-559.

