UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

TESIS

“REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM) MEDIANTE LA INMOVILIZACION VITREA DE RESIDUOS DE LA LIXIVIACION EN BOROSILICATO PARA OBTENER ARENAS SILICAS PARA LA CONSTRUCCION: CASO DE ESTUDIO SEDIMENTOS CONTAMINADOS EN LOS HUMEDALES DE ITE”

PRESENTADO POR:

BACH. SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO DE MINAS

MOQUEGUA - PERÚ

2025

UNAM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

Folio N° 078

ACTA DE SUSTENTACIÓN

I. Modalidad:

Tesis : [X]

Trabajo de Suficiencia Profesional : [ ]

Otro: ..... : [ ]

II. Documento de aprobación para la sustentación:
RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD Nº 319-2025-CF-FOIN-UNAM
Fecha: 17-12-2025

III. El Jurado ha dictaminado la (el) TESIS, TITULADO:
REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM) MEDIANTE LA INMOVILIZACION VITREA DE RESIDUOS DE LA LIXIVIACION EN BOROSILICATO PARA OBTENER ARENAS SILICAS PARA LA CONSTRUCCION: CASO DE ESTUDIO SEDIMENTOS CONTAMINADOS EN LOS HUMEDALES DE ITE.
Bachiller: SHANTALL TREYSI FERNANDEZ TICONA
Asesor Principal: DRA. BERTHA STLVANA VERA BARRIOS
Co-Asesor : .....

IV. Se dictamina:
Como: APROBADO por UNANIMIDAD la sustentación de manera:

Presencial [X] Virtual [ ]

Con nota: DIECISEIS (16) por lo que; Sí [X] No [ ]

Opta el Título Profesional de INGENIERO DE MINAS.

Siendo las 11:45 horas, del 29 de DICIEMBRE del año 2025 se procede con la firma en conformidad de lo dictaminado por el Jurado.

Presidente
DR. JORGE LUIS FLORES SOLIS
(Nombres y Apellidos)

Primer Miembro
MSC. AGAPITO FLORES JUSTO
(Nombres y Apellidos)

Segundo Miembro
MGO. JUAN ELIAS ROJAS CARRASCO
(Nombres y Apellidos)

Bachiller
Shantall Treysi Fernandez Ticona
(Nombres y Apellidos)

DEDICATORIA

A mi madre, cuya fuerza y amor han sido la base sobre la que pude sostener cada desafío de este camino. A mi hermano, cuya presencia constante, aunque discreta, iluminó mis días y me recordó que nunca avanzo sola. A mi niña interior, que guardó este sueño con paciencia y esperanza, y hoy celebra que el esfuerzo se transformó en realidad. Y a quienes me acompañaron, directa o indirectamente, en esta etapa académica y personal, dejando en mí un aprendizaje valioso que hizo posible este logro.

Porque esta tesis también pertenece a quienes fueron parte del trayecto.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Moquegua y a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por brindarme la formación y el espacio académico necesarios para desarrollar esta investigación. A los docentes y técnicos del Laboratorio de Materiales de la Universidad Católica San Pablo, cuyo apoyo fue fundamental para la ejecución de los ensayos mecánicos y las caracterizaciones experimentales.

A la Dra. Silvana Vera, por compartir su experiencia más allá del ámbito académico y por su guía durante el proceso metodológico. Al Ing. Luis Lazo, por facilitar protocolos y permitir el acceso a instalaciones que hicieron posible el desarrollo técnico de esta tesis. Mi especial agradecimiento al Ing. Jorge Flórez, por ser un mentor cercano, que nunca dejó de confiar en mi capacidad y cuyo acompañamiento fue determinante para sostener este proyecto.

Finalmente, expreso mi sincera gratitud a mi familia y a las personas que me acompañaron en cada etapa de campo y laboratorio; sus palabras, apoyo y presencia hicieron posible alcanzar este objetivo.

RESUMEN

Los humedales de Ite (Tacna, Perú) presentan acumulación de sedimentos con concentraciones elevadas de metales pesados debido a descargas históricas de efluentes minero–metalúrgicos, lo que genera un riesgo ambiental significativo y limita su funcionalidad ecológica. Ante esta problemática, la presente investigación evaluó la vitrificación mediante borosilicato como alternativa para la inmovilización de dichos metales y analizó la viabilidad de reutilizar el material vitrificado como agregado no estructural en aplicaciones constructivas.

Se realizó la caracterización físico-química de tres muestras de sedimentos superficiales (1 m de profundidad), determinándose pH, conductividad eléctrica, humedad y concentración de metales pesados, siguiendo el protocolo USEPA 3050B y análisis por AAS/ICP-OES. El proceso experimental incluyó la preparación de sedimentos finos (malla N.º 325), su mezcla con proporciones de 0 g, 19 g y 44 g de borosilicato, y la fusión a temperaturas de hasta 1100 °C. El material vitrificado obtenido fue sometido a análisis estructurales (TGA-DSC, DRX, FTIR y SEM-EDS) y a ensayos de compresión simple (UCS) para evaluar su comportamiento mecánico y su estabilidad microestructural.

Los resultados evidencian que la incorporación de 19 g de borosilicato, junto con la inmovilización de trazas de cromo, plomo y zinc en la matriz vítrea, favorece la formación de una fase amorfa estable con remanentes de cuarzo, lo cual mejora la cohesión interna y la resistencia mecánica de las probetas. En contraste, la mezcla con 44 g de borosilicato produjo sobrevidriado, mayor fragilidad y pérdida de integridad estructural. Los análisis estructurales confirman una reducción de especies boratadas volátiles y una menor disponibilidad potencial de metales pesados tras la vitrificación.

Se concluye que el proceso de vitrificación con 19 g de borosilicato constituye una alternativa técnicamente viable para la inmovilización de metales en sedimentos contaminados y permite obtener un material triturable con potencial de uso como agregado no estructural en matrices cementicias, contribuyendo así a la valorización de residuos y a estrategias de remediación ambiental en zonas impactadas.

Palabras claves: vitrificación; borosilicato; sedimentos contaminados; inmovilización de metales; agregados no estructurales; análisis estructural; UCS.

ABSTRACT

The Ite wetlands (Tacna, Peru) exhibit significant accumulation of sediments enriched with heavy metals due to historical discharges of mining and metallurgical effluents, generating environmental risk and limiting their ecological functionality. In response to this issue, the present study evaluated borosilicate vitrification as an alternative for metal immobilization and assessed the feasibility of reusing the vitrified material as a non-structural aggregate for construction applications.

A physico-chemical characterization was conducted on three surface sediment samples (1 m depth), determining pH, electrical conductivity, moisture content, and heavy metal concentrations following the USEPA 3050B protocol and AAS/ICP-OES analyses. The experimental process involved preparing fine sediments (mesh No. 325), mixing them with 0 g, 19 g, and 44 g of borosilicate, and melting them at temperatures up to 1100 °C. The resulting vitrified material was subjected to structural analyses (TGA-DSC, XRD, FTIR, and SEM-EDS) and unconfined compressive strength (UCS) tests to evaluate its mechanical behavior and microstructural stability.

Results show that incorporating 19 g of borosilicate, with the immobilization of trace amounts of chromium, lead, and zinc within the glassy matrix, promotes the formation of a stable amorphous phase with residual quartz, enhancing internal cohesion and mechanical strength. Conversely, the mixture with 44 g of borosilicate led to over-vitrification, increased brittleness, and loss of structural integrity. Structural analyses also confirm a reduction in volatile borate species and a decreased potential mobility of heavy metals after vitrification.

It is concluded that vitrification with 19 g of borosilicate is a technically viable alternative for immobilizing metals in contaminated sediments and produces a crushable material with potential use as a non-structural aggregate in cementitious matrices, contributing to waste valorization and environmental remediation strategies in impacted areas.

Keywords: vitrification; borosilicate; contaminated sediments; heavy metal immobilization; non-structural aggregates; structural analysis; UCS.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 13

I. DATOS GENERALES 15

1.1. TÍTULO 15

1.2. DATOS DE LOS INVESTIGADORES 15

1.3. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN 15

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 16

2.1. DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 16

2.1.1. INTERROGANTE GENERAL 21

2.1.2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS 21

2.2. OBJETIVOS 21

2.2.1. OBJETIVO GENERAL 21

2.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

2.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA 22

2.3.1. JUSTIFICACIÓN GENERAL 22

2.3.2. IMPORTANCIA TÉCNICA Y CIENTÍFICA 23

2.3.3. IMPORTANCIA AMBIENTAL 25

2.3.4. IMPORTANCIA SOCIOECONÓMICA 26

2.3.5. IMPORTANCIA PARA LA GESTIÓN MINERA Y AMBIENTAL DEL PERÚ 27

2.4. HIPÓTESIS 28

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL 28

2.4.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS 28

2.5. VARIABLES 29

2.5.1. VARIABLE INDEPENDIENTE 30

2.5.2. VARIABLES DEPENDIENTES 30

III. MARCO TEÓRICO 32

3.1. ANTECEDENTES 32

3.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES 32

3.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES 36
3.1.3. ANTECEDENTES LOCALES 38
3.2. BASES TEÓRICAS 40
3.2.1. PASIVOS AMBIENTALES MINEROS 40
3.2.2. CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SEDIMENTOS 40
3.2.3. FUNDAMENTOS DEL PROCESO DE VITRIFICACIÓN 40
3.2.4. BOROSILICATO COMO MATERIAL ENCAPSULANTE 41
3.2.5. ENCAPSULAMIENTO DE METALES PESADOS EN MATRIZ VÍTREA 42
3.2.6. COMPARACIÓN DE LA VITRIFICACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS DE REMEDIACIÓN 43
3.2.7. ARENAS SÍLICAS COMO MEDIO DE ENCAPSULAMIENTO Y MITIGACIÓN AMBIENTAL 43
3.2.8. VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MINEROS MEDIANTE VITRIFICACIÓN: EXPERIENCIA INTERNACIONAL 43
3.2.9. VIABILIDAD DE LA APLICACIÓN EN CONTEXTOS MINEROS PERUANOS 44
3.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS 44

IV. METODOLOGÍA 48

4.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN 48
4.1.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN 48
A. Remediación de Sedimentos Contaminados 48
i. Toma de muestras 48
ii. Caracterización físico-química de los sedimentos 49
iii. Determinación de metales pesados 49
iv. Proceso de vitrificación con borosilicato 49
B. Valorización del Material Vitrificado 50
i. Preparación del material vitrificado para su uso en concreto 50
ii. Elaboración de probetas de concreto 50
iii. Ensayos físicos y mecánicos 50
4.2. ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL 50
4.2.1. ÁMBITO TEMPORAL 50
4.2.2. ÁMBITO ESPACIAL 52
A. Ubicación del área de estudio 52
B. Clima 53
C. Geología y geomorfología 53
D. Hidrogeología y características ambientales 53

E. Biodiversidad y valor ecológico 53
F. Delimitación operativa del área de muestreo 54
G. Actividad humana e impacto minero-industrial 54
H. Justificación del área de estudio 54
4.3. POBLACIÓN Y MUESTRA 54
4.3.1. POBLACIÓN 54
4.3.2. MUESTRA 55
4.4. INSTRUMENTOS 56
4.4.1. INSTRUMENTOS DE CAMPO 56
4.4.2. INSTRUMENTOS PARA ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO 57
4.4.3. INSTRUMENTOS PARA LA VITRIFICACIÓN EN BOROSILICATO 57
4.4.4. INSTRUMENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA 57
4.4.5. MATERIALES UTILIZADOS 58
4.5. PROCEDIMIENTOS 58
4.5.1. TOMA Y RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE SEDIMENTOS 59
4.5.2. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN INICIAL DE SEDIMENTOS 61
4.5.3. PREPARACIÓN DE ARENA SÍLICA COMO PRECURSOR DEL VIDRIO 62
4.5.4. INTEGRACIÓN METODOLÓGICA CON EL PROCESO DE OBTENCIÓN DEL COMPUESTO BOROSILICATO 64
4.5.5. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN DEL COMPUESTO BOROSILICATADO 65
4.5.6. CARACTERIZACIÓN DEL COMPUESTO BOROSILICATADO 67
4.5.7. MEZCLAR SEDIMENTO-BOROSILICATO Y PROCESO DE VITRIFICACIÓN 74
4.5.8. ELABORACIÓN DE PROBETAS VÍTREAS DE BOROSILICATO PARA EL ENSAYO MECÁNICO 76
4.5.9. ENSAYOS MECÁNICOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE (UCS) 81
4.6. ANÁLISIS DE DATOS 83
4.6.1. RESULTADOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN 84
A. Presentación general de los datos 84
4.6.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO 85
4.6.3. GRÁFICO COMPARATIVO DE RESISTENCIAS 85
4.6.4. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS 86
A. Mezcla patrón (0 g de borosilicato) 86
B. Mezcla modificada (19 g de borosilicato) 87
C. Mezcla enriquecida (44 g de borosilicato) 87
4.6.5. EVALUACIÓN DE LA APTITUD DEL MATERIAL PARA APLICACIONES DE INGENIERÍA 88
4.6.6. RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS 88

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 90

5.1. COMPORTAMIENTO FISICOQUÍMICO DE LOS SEDIMENTOS CONTAMINADOS 90

5.1.1. PH, CONDUCTIVIDAD Y ACIDEZ 90

5.1.2. CONTENIDO DE METALES PESADOS Y SU IMPLICANCIA AMBIENTAL 90

5.2. RESULTADOS DE LAS PROBETAS VITRIFICADAS Y SU DISCUSIÓN TÉCNICA 91

5.2.1. EFECTO DEL BOROSILICATO EN EL DESEMPEÑO MECÁNICO 91

5.2.2. INTERPRETACIÓN MICROESTRUCTURAL PRELIMINAR 92

5.2.3. IMPLICANCIAS PARA LA REVALORIZACIÓN Y USO DEL MATERIAL VITRIFICADO 92

5.3. RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS AMBIENTALES Y COMPORTAMIENTO DE VITRIFICACIÓN 92

5.4. SÍNTESIS DEL COMPORTAMIENTO GENERAL 93

VI. CONCLUSIONES 94

VII. RECOMENDACIONES 96

7.1. PARA LA GESTIÓN AMBIENTAL DE LOS HUMEDALES DE ITE 96

7.2. PARA OPTIMIZAR EL PROCESO DE VITRIFICACIÓN CON BOROSILICATO 96

7.3. PARA VALORIZACIÓN DEL MATERIAL VITRIFICADO EN APLICACIONES DE CONSTRUCCIÓN 96

7.4. PARA FUTURAS INVESTIGACIONES 97

VIII. REFERENCIAS 98

IX. ANEXOS 103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: *Isolíneas de distribución de la contaminación por cobre, zinc, arsénico, cadmio, plomo y hierro en sedimentos marinos en la Bahía de Ite* ____ *17*

Figura 2: *Clasificación de técnicas de remediación y medidas de mitigación aplicables a pasivos ambientales* ____ *24*

Figura 3: *Flujograma del proceso de obtención de borosilicato utilizado en la investigación* ____ *42*

Figura 4: *Localización del área de estudio* ____ *52*

Figura 5: *Localización de los Humedales de Ite* ____ *55*

Figura 6: *Toma de muestras superficiales en los humedales de Ite* ____ *60*

Figura 7: *Recolección y almacenamiento de sedimentos en bolsas estériles* ____ *61*

Figura 8: *Secado de sedimentos en estufa a 105 ºC* ____ *62*

Figura 9: *Diagrama de flujo del proceso de preparación del borosilicato, calcinación, molienda y obtención de arena sílica con inclusión de plomo, zinc y cromo* ____ *63*

Figura 10: *Proceso de elaboración del compuesto de borosilicato* ____ *66*

Figura 11: *Análisis termogravimétricos (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC) del material borosilicatado* ____ *68*

Figura 12: *Difracción de Rayos X (XRD) del material borosilicatado antes y después de la calcinación* ____ *69*

Figura 13: *Análisis infrarrojo (FTIR) del material antes y después de la calcinación* ____ *73*

Figura 14: *Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM)* ____ *73*

Figura 15: *Rampa de Calentamiento y Enfriamiento* ____ *75*

Figura 16: *Tamizado de material para compactación en moldes cilíndricos* ____ *76*

Figura 17: *Pesado individual de materiales y preparación previa a la mezcla* ____ *77*

Figura 18: *Homogenización del material* ____ *79*

Figura 19: *Compactación de polvo vitreo con agregados en moldes cilíndricos* ____ *80*

Figura 20: *Probetas vítreas en curación para ensayos mecánicos* ____ *80*

Figura 21: *Configuración de prensa hidráulica para el ensayo UCS* ____ *81*

Figura 22: *Ruptura controlada de la probeta durante el UCS* ____ *83*

Figura 23: *Comparación de resistencia promedio según porcentaje de borosilicato* ____ *86*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: *Rango referencial de concentración de metales pesados en sedimentos contaminados y límites establecidos por la CCME para la protección de la vida acuática* _____ *19*

Tabla 2: *Operacionalización de variables* _____ *29*

Tabla 3: *Cronograma de actividades* _____ *51*

Tabla 4: *Composición de la mezcla más adecuada para elaborar el compuesto de borosilicato* _ *65*

Tabla 5: *Composición previa a la calcinación (BSPP)* _____ *71*

Tabla 6: *Composición elemental antes y después de la calcinación (BSPP vs BSC)* _____ *72*

Tabla 7: *Etapas del proceso de vitrificación* _____ *74*

Tabla 8: *Contenidos exactos de cada componente para las mezclas experimentales* _____ *78*

Tabla 9: *Resultados de UCS según porcentaje de borosilicato* _____ *84*

Tabla 10: *Promedios de resistencia por tipo de mezcla* _____ *85*

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

AAS	**:**	Absorción atómica por espectrometría.
ACV	**:**	Análisis de Ciclo de Vida.
ANA	**:**	Autoridad Nacional del Agua.
ASTM	**:**	American Society for Testing and Materials.
BSC	**:**	Borosilicato Calcinado.
BSPP	**:**	Borosilicato Previo a la Calcinación.
CE	**:**	Conductividad Eléctrica.
CCME	**:**	Canadian Council of Ministers of the Environment.
DSC	**:**	Calorimetría Diferencial de Barrido.
DRX / XRD	**:**	Difracción de Rayos X.
EDS	**:**	Espectroscopía de Energía Dispersiva.
FTIR	**:**	Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier.
IAEA	**:**	International Atomic Energy Agency.
ICP-OES	**:**	Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente.
INACAL	**:**	Instituto Nacional de Calidad.
kgf/cm²	**:**	Kilogramo-fuerza por centímetro cuadrado.
MINAM	**:**	Ministerio del Ambiente
MINEM	**:**	Ministerio de Energía y Minas
MPa	**:**	Megapascal.
pH	**:**	Potencial de Hidrógeno.
SEM	**:**	Microscopía Electrónica de Barrido.
SEM-EDS	**:**	Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Energía Dispersiva.
TGA	**:**	Análisis Termogravimétrico.
UCS	**:**	Uniaxial Compressive Strength (Resistencia a la Compresión Simple).
USEPA	**:**	United States Environmental Protection Agency.

Introducción

La contaminación de sedimentos en ecosistemas acuáticos constituye uno de los desafíos ambientales más persistentes, debido a la capacidad de estos materiales para acumular metales pesados y actuar como fuentes secundarias de dispersión hacia el agua, la biota y la cadena trófica. En el sur del Perú, los humedales de Ite, ubicados en la región de Tacna, representan un caso emblemático de alteración ambiental vinculada a descargas históricas provenientes de actividades minero-metalúrgicas y agrícolas. Diversos estudios y monitoreos, realizados por entidades como la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Ministerio del Ambiente (MINAM), han identificado concentraciones de metales como As, Pb, Zn, Cu, Cr, Cd, Fe y Mn en la fracción sedimentaria, superando los valores guía establecidos y evidenciando el riesgo potencial para los ecosistemas acuáticos y la salud humana. Esta situación resalta la necesidad de desarrollar estrategias de remediación que sean ambientalmente seguras, técnicamente viables y coherentes con criterios de sostenibilidad. En el presente trabajo, los análisis se enfocan específicamente en cromo (Cr), plomo (Pb) y zinc (Zn), dado que, según el estado del arte, estos elementos presentan mayor relevancia en la problemática de contaminación asociada a relaves mineros.

En las últimas décadas, la gestión de sedimentos contaminados ha evolucionado hacia tecnologías capaces de transformar los contaminantes en formas químicamente estables, reduciendo de manera significativa su movilidad y toxicidad. Entre estas tecnologías, la vitrificación con borosilicato destaca por su capacidad para generar matrices vítreas amorfas en las que los metales pesados quedan inmovilizados dentro de una red tridimensional Si–B, altamente resistente a la lixiviación y al deterioro físico. Esta técnica, aplicada tradicionalmente al tratamiento de residuos peligrosos y lodos industriales, integra principios de química de materiales, ingeniería térmica y procesos de encapsulamiento, ofreciendo ventajas frente a métodos convencionales como la solidificación en cemento o la geoestabilización.

En este contexto, la presente investigación evalúa la aplicación de un compuesto borosilicatado como agente vitrificante para inmovilizar metales pesados presentes en sedimentos finos de los humedales de Ite. El estudio comprende desde la caracterización fisicoquímica de las muestras (incluyendo análisis pH, conductividad, humedad y determinación de elementos metálicos mediante digestión USEPA 3050B y espectrometría AAS/ICP-OES) hasta la obtención del

material vitrificado bajo una rampa térmica controlada que alcanzó 1100 °C. Posteriormente, se realizaron caracterizaciones estructurales y térmicas mediante TGA-DSC, XRD, FTIR y SEM-EDS para entender la evolución mineralógica y microestructural del compuesto antes y después de la calcinación. Asimismo, se elaboraron probetas con 0 g, 19 g y 44 g de borosilicato para evaluar su desempeño mecánico mediante ensayos de compresión simple (UCS), con el fin de determinar su potencial como agregado silíceo en aplicaciones no estructurales.

Los objetivos que guiaron esta investigación fueron: (i) caracterizar fisicoquímicamente los sedimentos de los humedales de Ite y determinar su carga metálica; (ii) aplicar la técnica de vitrificación con borosilicato y evaluar su capacidad para inmovilizar metales pesados en matrices estables; y (iii) analizar la factibilidad de reutilizar el material vitrificado como agregado de construcción, identificando su resistencia mecánica y comportamiento frente a cargas uniaxiales. La hipótesis planteada sostiene que la incorporación controlada de borosilicato permitirá reducir la movilidad de los metales y generar un material vítreo triturable, química y mecánicamente estable, con potencial de valorización dentro de un enfoque de economía circular.

En conjunto, este trabajo busca aportar evidencia técnica y científica que respalde el uso de compuestos borosilicatados como alternativa para la remediación de sedimentos contaminados, contribuyendo al desarrollo de soluciones innovadoras para la gestión de pasivos ambientales y a la recuperación progresiva de ecosistemas afectados como los humedales de Ite.

I. DATOS GENERALES

1.1. Título

Remediación de pasivos ambientales mineros (PAM) mediante la inmovilización vítrea de residuos de la lixiviación en borosilicato para obtener arenas sílicas para la construcción: caso de estudio sedimentos contaminados en los Humedales de Ite.

1.2. Datos de los Investigadores

Tesista: Bach. Shantall Treysi Fernández Ticona

Asesor: Dra. Bertha Silvana Vera Barrios

1.3. Línea de Investigación

Esta investigación se inscribe en la lía de “Seguridad y Medio Ambiente”. Se centra en prevenir la ocurrencia de accidentes mortales e incidentes peligrosos en el desarrollo del ciclo de minado; además de proteger el medio ambiente en donde se realizan las actividades mineras con un claro compromiso de responsabilidad social.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción y Formulación del Problema

Los humedales de Ite, ubicados en la provincia Jorge Basadre, región Tacna, fueron originalmente concebidos como una alternativa de mitigación ambiental frente a la disposición de efluentes industriales, específicamente para recibir, filtrar y contener los vertimientos provenientes de las operaciones minero-metalúrgicas de Southern Peru Copper Corporation (SPCC). Esta estrategia fue implementada tras el desvío de los canales de relave al mar, en cumplimiento de los compromisos ambientales asumidos por la empresa y el Estado Peruano a finales de la década de 1990 (DIGESA, 2003) (ANA, 2023).

Según estudios técnicos e institucionales, los humedales de Ite fueron diseñados para funcionar como una barrera natural de contención, aprovechando la planicie costera del valle como zona de acumulación, decantación y filtración de efluentes, relaves y escorrentías contaminadas con metales pesados, principalmente plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo (Cr). Esta capacidad de amortiguación hidráulica y química se ha mantenido de manera efectiva durante más de dos décadas, sin la implementación de tecnologías activas de tratamiento o remediación directa de los sedimentos acumulados. En consecuencia, y en el marco del presente estudio, los análisis se centrarán en los elementos plomo, cromo y zinc como componentes clave de la unidad de estudio.

Con el paso del tiempo, estos ecosistemas han sufrido una acumulación progresiva de residuos sólidos y líquidos, incluyendo aguas ácidas y partículas metalíferas, comprometiendo su equilibrio ecológico. Diversos monitoreos realizados por entidades como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) y el Gobierno Regional de Tacna, han evidenciado concentraciones elevadas de metales en agua, suelo y sedimentos, lo que representa un riesgo latente para la biodiversidad local, los recursos hídricos subterráneos y la salud pública regional.

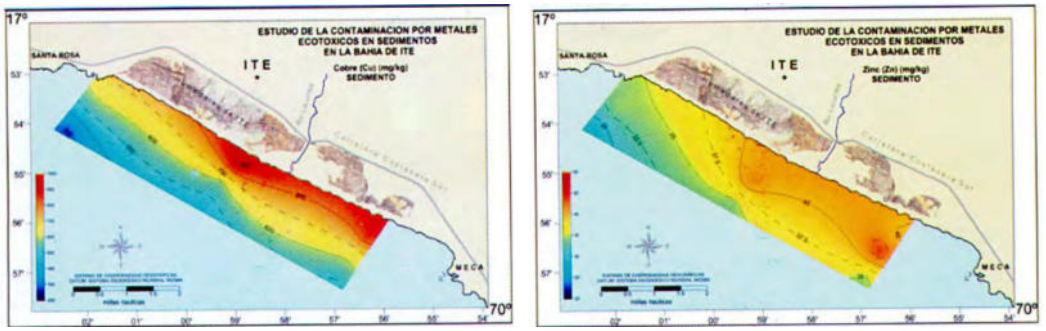
En estudios previos realizados específicamente en la zona costera de la Bahía de Ite, se ha identificado una distribución significativa de metales pesados en los sedimentos marinos, principalmente cobre, zinc, arsénico, cadmio, plomo y hierro. Estas concentraciones han sido representadas mediante isolíneas geoquímicas que permiten visualizar la extensión y magnitud de la contaminación en el área de estudio (Fernández, 2011). La Figura 1 muestra esta distribución espacial,

evidenciando zonas críticas con acumulación elevada de metales ecotóxicos, lo que refuerza la necesidad de aplicar tecnologías de remediación ambiental innovadoras.

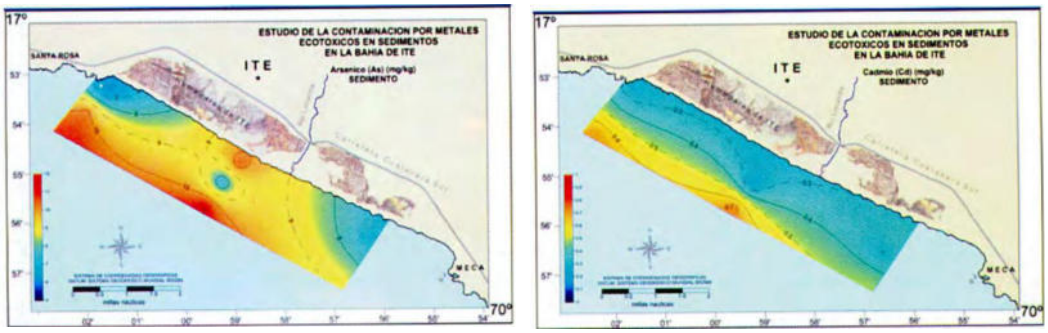
Figura *1*:

Isolíneas de distribución de la contaminación por cobre, zinc, arsénico, cadmio, plomo y hierro en sedimentos marinos en la Bahía de Ite

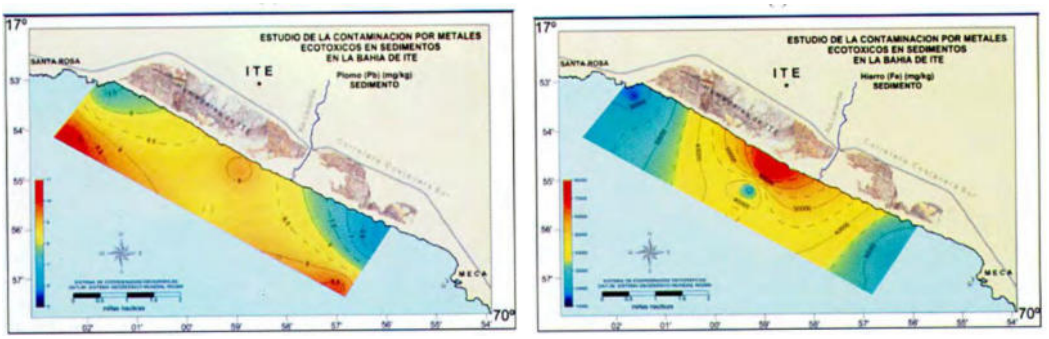
(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)



Nota: *Recuperado de Lorenzo Ibárcena (2011), Revista Ciencia y Desarrollo*

A pesar de esta problemática ampliamente documentada, las acciones ejecutadas hasta la fecha se han centrado en medidas de mitigación pasiva, como revegetación o delimitación de áreas sensibles, sin intervención técnica directa sobre los pasivos acumulados en los sedimentos. Esta ausencia de soluciones estructurales justifica la necesidad de evaluar tecnologías más robustas y sostenibles, como la vitrificación con borosilicato, que no solo permitiría inmovilizar los contaminantes presentes, sino también valorizar el residuo transformado como insumo constructivo, alineándose con enfoques modernos de economía circular y gestión ambiental responsable.

Estos elementos representan una amenaza significativa debido a su alta toxicidad, movilidad geoquímica y bioacumulación en la cadena trófica. Cuando sus concentraciones superan los niveles máximos permisibles establecidos por los estándares ambientales, pueden contaminar cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como el aire y el suelo, exponiendo a las poblaciones cercanas a riesgos crónicos para la salud, entre ellos enfermedades neurodegenerativas, daños hepáticos y afecciones cancerígenas de origen químico.

Este tipo de contaminantes, al acumularse en los sedimentos, pueden solubilizarse bajo ciertas condiciones ambientales, generando riesgos no solo para los componentes bióticos del ecosistema (flora, fauna acuática y aves migratorias), sino también para las poblaciones humanas aledañas que dependen directa o indirectamente de estos recursos. La situación se agrava debido a la limitada fiscalización ambiental efectiva en estos cuerpos hídricos, así como a la escasa información técnica sobre la composición de los sedimentos y el nivel real de contaminación acumulada.

Diversos estudios científicos sobre sedimentos contaminados en zonas costeras y humedales exponen niveles preocupantes de metales pesados como arsénico, plomo, zinc, cromo y hierro. Estas concentraciones, cuando superan los límites establecidos por normativas ambientales internacionales, representan un riesgo significativo para la salud humana y el ecosistema.

En la Tabla 1 se presentan rangos referenciales de concentración de estos elementos en sedimentos impactados, comparados con límites propuestos por organismos internacionales como la Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME, 2001).

Tabla 1:

Rango referencial de concentración de metales pesados en sedimentos contaminados y límites establecidos por la CCME para la protección de la vida acuática

Metal pesado	Rango típico en sedimentos contaminados (mg/kg)	Límite de referencia
Arsénico (As)	30 – 120	17.0
Plomo (Pb)	50 – 250	35.0
Zinc (Zn)	90 – 300	123.0
Cromo (Cr)	60 – 200	37.3
Hierro (Fe)	15,000 – 30,000	N/A

Nota: *Elaboración propia con base en datos de USEPA (1993) y CCME (2001)*

Pese a la relevancia ambiental de los humedales de Ite como zona de amortiguamiento ecológico y receptora histórica de descargas minero-metalúrgicas e industriales, no se han desarrollado investigaciones aplicadas a escala local que propongan soluciones sostenibles y técnicamente viables para remediar los sedimentos contaminados por metales pesados. Esta ausencia de intervención directa representa una brecha crítica, considerando la acumulación persistente de elementos tóxicos como plomo, zinc y cromo, cuya presencia ha sido confirmada en diversos informes institucionales.

En este contexto, la presente investigación propone el uso de técnicas de encapsulamiento térmico mediante vitrificación con borosilicato fundido, orientadas a inmovilizar estos metales pesados y reducir significativamente su movilidad y toxicidad. Esta tecnología, además de su eficacia como mecanismo de remediación físico-química, permite transformar los residuos contaminados en materiales vítreos estables, abriendo la posibilidad de reutilizarlos como insumos

constructivos, con lo cual se introduce una dimensión innovadora de valorización de pasivos ambientales. La aplicación de vitrificación se alinea con enfoques de minería sostenible y economía circular, promovidos actualmente en la gestión de residuos sólidos peligrosos a nivel internacional.

En estudios recientes como el de Peris-Fajarnés (Mamani, y otros, 2024), se demostró que los residuos mineros tratados con vitrificación pueden convertirse en vidrios cerámicos funcionales, con excelentes propiedades mecánicas, térmicas y químicas. La matriz vítrea formada durante el proceso es capaz de retener iones metálicos dentro de su estructura amorfa, incluso en condiciones de lixiviación severas, asegurando su estabilidad a largo plazo. Esta técnica ha sido catalogada como una de las más efectivas en la inmovilización de residuos peligrosos, y representa una alternativa con potencial de replicabilidad en sitios con pasivos similares a los de Ite.

De manera complementaria, la investigación realizada por Vera Barrios y Lazo Alarcón (2020) en el contexto latinoamericano validó el uso del borosilicato como componente principal en la formación de recubrimientos impermeables, demostrando que, a partir de residuos con alto contenido de boro y sílice, es posible generar materiales cerámicos de alta resistencia y baja porosidad. Estos recubrimientos, obtenidos por procesos térmicos controlados, resultan aplicables no solo en la industria sanitaria, sino también como alternativa para encapsular residuos contaminados, gracias a su capacidad para resistir agresiones químicas y térmicas sin liberar compuestos peligrosos (Vera & Lazo, 2020).

Por tanto, la presente propuesta de investigación no solo se sustenta en fundamentos científicos sólidos, sino que amplía el alcance de la tecnología de vitrificación hacia su aplicación en ecosistemas naturales como los humedales costeros, un escenario que no ha sido abordado previamente en el Perú. Esta innovación, al combinar estabilización ambiental con valorización del residuo, ofrece una respuesta integral frente a los desafíos técnicos y ecológicos que presentan los pasivos mineros dispersos en entornos frágiles.

2.1.1. Interrogante General

¿En qué medida la aplicación de técnicas de encapsulamiento mediante borosilicato permite la inmovilización de lixiviados presentes en los sedimentos contaminados de los humedales de Ite, mediante vitrificación con borosilicato fundido para ser empleada como agregado en aplicaciones de ingeniería civil o minera?

2.1.2. Interrogantes Específicas

- ¿Qué niveles de caracterización de los sedimentos contaminados de los humedales de Ite, determinan sus propiedades físico-químicas y las concentraciones de metales pesados (como Pb, Zn, Cr) mediante técnicas analíticas normalizadas?

- ¿Cuál es el resultado de aplicar un tratamiento experimental de vitrificación con borosilicato fundido, evaluando su eficiencia en la inmovilización de los metales pesados y la formación de un material vítreo estable?

- ¿En qué medida la incorporación del producto vitrificado obtenido mediante la técnica de inmovilización de lixiviados con borosilicato servirá como insumo para la obtención de grava o arena silícea?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Evaluar, determinar y aplicar una técnica de inmovilización de lixiviados presentes en los sedimentos contaminados de los humedales de Ite, mediante vitrificación con borosilicato fundido, con el fin de obtener un nuevo compuesto, cuya posterior molienda permita su reutilización como grava silícea, apta para ser empleada como agregado en aplicaciones de ingeniería civil o minera.

2.2.2. Objetivos Específicos

Caracterizar los sedimentos contaminados de los humedales de Ite, determinando sus propiedades físico-químicas y las concentraciones de metales pesados (como Pb, Zn, Cr) mediante técnicas analíticas normalizadas.

Aplicar un tratamiento experimental de vitrificación con borosilicato fundido, evaluando su eficiencia en la inmovilización de los metales pesados y la formación de un material vítreo estable.

Incorporar el producto vitrificado obtenido mediante la técnica de inmovilización de lixiviados con borosilicato como insumo para la obtención de grava o arena silícea, evaluando su viabilidad para ser utilizada como material alternativo en aplicaciones de construcción.

2.3. Justificación e Importancia

2.3.1. Justificación General

Los humedales de Ite constituyen uno de los ecosistemas naturales más relevantes de la región sur del Perú, tanto por su extensión como por su papel ecológico en la regulación hídrica, la depuración natural del agua, la provisión de hábitats para aves migratorias y la protección de la biodiversidad costera. Sin embargo, este ecosistema ha sido sometido a más de cuatro décadas de presión derivada de actividades minero-metalúrgicas, que han generado acumulación crónica de metales pesados en el cuerpo de agua y, especialmente, en los sedimentos superficiales (ANA, 2023) (MINAM, 2020).

Diversos informes estatales confirman que los sedimentos de Ite presentan concentraciones que superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para la protección de ecosistemas acuáticos, representando un riesgo persistente para la fauna, la flora y las actividades productivas que dependen del humedal. La presencia de arsénico, plomo, cromo y zinc genera condiciones de toxicidad que afectan su funcionamiento ecológico, incrementan la bioacumulación en organismos y pueden impactar negativamente la salud humana.

La problemática exige alternativas de remediación que no solo mitiguen los efectos de la contaminación, sino que ofrezcan una solución duradera, estable en el tiempo y científicamente validada. Por ello, la presente investigación plantea la utilización de la vitrificación con borosilicato como técnica de encapsulamiento térmico de metales pesados, proceso ampliamente utilizado en la inmovilización de residuos radiactivos de alta peligrosidad (IAEA, 2011) y considerado una de las tecnologías más eficientes para evitar la lixiviación y liberación futura de contaminantes.

Esta propuesta se justifica porque permite transformar un pasivo ambiental crítico en un material estable, inerte y útil, alineándose a los principios modernos de gestión de residuos: prevención, innovación tecnológica y economía circular.

2.3.2. Importancia Técnica y Científica

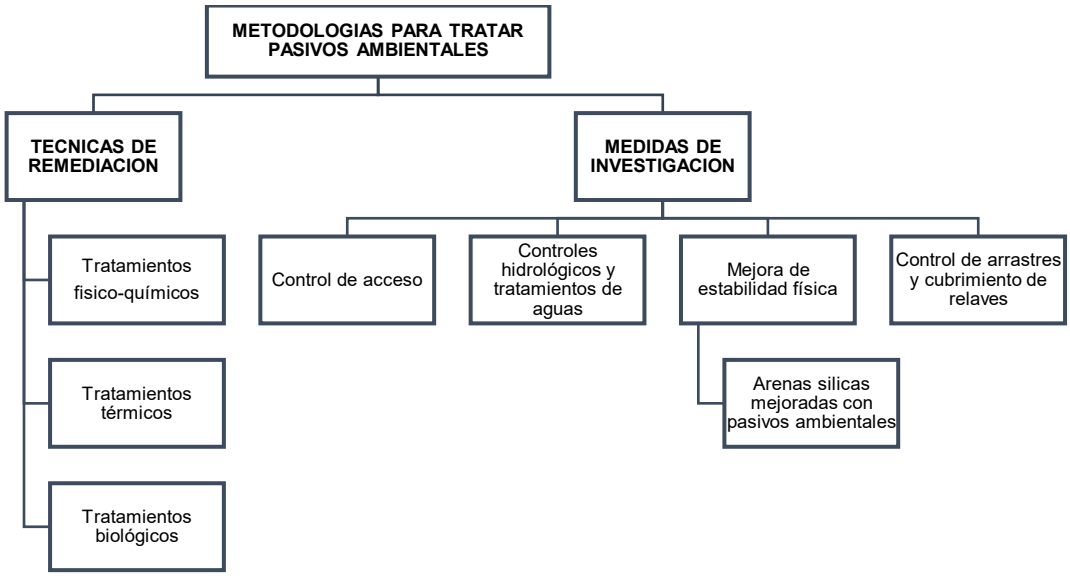
A nivel científico, esta investigación se posiciona en la frontera del conocimiento aplicado a la remediación de sedimentos contaminados con metales pesados, un problema prioritario en ecosistemas vulnerables como los humedales costeros del sur del Perú. La técnica de vitrificación con borosilicato ha sido estudiada y validada en países como Corea, Estados Unidos y Japón dentro del marco de tecnologías avanzadas para el tratamiento térmico de residuos peligrosos (Park, Min, & Lee, 2009) (Kim & Lee, 2017). Sin embargo, en el contexto peruano no existen antecedentes de aplicación de este método en ecosistemas naturales como humedales, ni en procesos de recuperación ambiental asociados a pasivos mineros, lo que otorga al presente estudio un carácter exploratorio e innovador.

Según las clasificaciones reconocidas por el Ministerio del Ambiente y organismos internacionales, las tecnologías de remediación de pasivos ambientales mineros se dividen en tratamientos físico-químicos, biológicos y térmicos (MINAM, 2021) (USEPA, 1996). Dentro de este marco conceptual, la vitrificación con borosilicato se ubica en el grupo de tratamientos térmicos, cuya finalidad es alcanzar temperaturas que permitan la fusión parcial o total de los materiales contaminados para transformar los metales en formas químicamente estables y no lixiviables (IAEA, 2011). Esta técnica destaca por su elevada eficiencia en la inmovilización de elementos como arsénico, plomo, zinc y cromo, incorporándolos de manera permanente dentro de una matriz vítrea.

En la Figura 2 se muestra un mapa conceptual elaborado a partir de la revisión bibliográfica, donde se organiza la clasificación de las tecnologías de remediación de pasivos ambientales mineros. Esta estructura facilita comprender la relación entre las diferentes categorías tecnológicas y el enfoque térmico en el cual se inscribe la técnica de vitrificación con borosilicato. Asimismo, permite identificar los fundamentos científicos y operativos que sustentan la selección de esta alternativa como metodología central del estudio.

Figura 2:

Clasificación de técnicas de remediación y medidas de mitigación aplicables a pasivos ambientales



Nota: *Elaboración propia basada en revisión bibliográfica* (Gambini, 2021)

Esta investigación se ubica dentro del enfoque de tratamientos térmicos, cuya finalidad es la inmovilización de contaminantes mediante procesos de fusión que transforman los residuos peligrosos en formas estables y no lixiviables. Así, la propuesta de vitrificación con borosilicato permite encapsular metales como arsénico, plomo, zinc y cromo dentro de una matriz vítrea que no solo reduce su peligrosidad, sino que genera un material sólido reutilizable como insumo para construcción o revestimientos.

Este estudio busca generar datos experimentales originales, mediante la caracterización físico-química de los sedimentos contaminados y la evaluación de la eficiencia del borosilicato como agente encapsulante. Los resultados permitirán explorar el potencial de registrar modelos de utilidad o patentes tecnológicas, lo que representa un aporte concreto al desarrollo científico, minero y ambiental del país, alineado con los objetivos de innovación tecnológica y sostenibilidad.

Adicionalmente, desde una perspectiva técnica, la vitrificación presenta ventajas significativas frente a otras tecnologías convencionales:

- Alta estabilidad química del producto final, reduciendo riesgos de lixiviación a largo plazo.

- Capacidad de manejar matrices complejas, como sedimentos ricos en óxidos, sulfuros o arcillas minerales.

- Potencial de valorización del material vitrificado, que puede emplearse como agregado para la construcción, revestimientos o materiales cerámicos, contribuyendo a la economía circular (Kumada, Takahashi, & Kawamoto, 2015).

Este estudio también aporta evidencia experimental novedosa respecto a la caracterización físico-química de los sedimentos de los humedales de Ite, así como sobre la eficiencia del borosilicato como agente encapsulante bajo condiciones locales. Los datos generados podrán servir como base para futuros modelos de diseño, optimización del proceso térmico, e incluso para la eventual formulación de solicitudes de modelos de utilidad o patentes tecnológicas. De este modo, la investigación constituye un aporte directo al avance del conocimiento científico y tecnológico en el país, alineándose con los objetivos nacionales de innovación, sostenibilidad y gestión integral de pasivos ambientales mineros.

2.3.3. Importancia Ambiental

El valor ambiental de esta investigación radica en ofrecer una alternativa robusta y sostenible para la recuperación de los humedales de Ite, uno de los ecosistemas más impactados por la contaminación sedimentaria en el país. La presencia prolongada de metales pesados afecta la calidad del agua, disminuye la supervivencia de especies acuáticas y compromete los servicios ecosistémicos que el humedal naturalmente provee (MINAM, 2020).

La vitrificación con borosilicato permite:

- Eliminar la movilidad de metales pesados, reduciendo la liberación de contaminantes al agua y al suelo.

- Evitar la recontaminación, pues el vidrio formado es químicamente estable y no se degrada en condiciones ambientales normales.

- Disminuir el volumen del sedimento, reduciendo hasta un 70 % su tamaño inicial, lo cual facilita su manejo y disposición.

- Prevenir la bioacumulación, mitigando riesgos para la fauna y la flora del humedal.

- Restaurar funciones ecológicas, favoreciendo la regeneración progresiva del ecosistema.

A diferencia de otras técnicas como dragado simple, confinamiento o aplicación de polímeros, la vitrificación ofrece una solución definitiva, con alta estabilidad a largo plazo y sin riesgo de liberación secundaria de contaminantes.

El estudio también se alinea con los compromisos ambientales del Perú, incluyendo los objetivos de la Estrategia Nacional de Diversidad Biológica y los lineamientos para la gestión de pasivos ambientales establecidos por el Estado (MINAM, 2020) (MINEM, 2024).

2.3.4. Importancia Socioeconómica

La contaminación de los humedales de Ite no solo afecta al ecosistema, sino que también tiene repercusiones directas en las comunidades agrícolas y pesqueras de la zona. Los metales pesados pueden afectar cultivos irrigados con agua contaminada, disminuir la productividad agrícola, impactar la salud humana y generar conflictos socioambientales asociados a la percepción de riesgo y al uso del territorio.

La aplicación de la vitrificación con borosilicato ofrece beneficios socioeconómicos como:

- Reducción de riesgos para la salud, disminuyendo la exposición humana a sustancias tóxicas.

- Mejora de la calidad del agua, beneficiando a agricultores y usuarios del recurso hídrico.

- Prevención de conflictos sociales, al implementar tecnologías modernas de remediación.

- Generación de oportunidades económicas, al transformar los sedimentos contaminados en materiales con valor agregado.

Diversos estudios señalan que los materiales vitrificados pueden ser usados como insumo para pavimentos, rellenos estructurales, bloques prefabricados, cerámicos y revestimientos (IAEA, 2011), (Park, Min, & Lee, 2009). Esto abre posibilidades para la industria de la construcción, minería e infraestructura, promoviendo

modelos de economía circular y gestionando de manera más eficiente los residuos peligrosos.

Además, la valorización de residuos mediante vitrificación puede reducir los costos de disposición final, generar ahorro para el sector público y privado, e impulsar nuevas cadenas productivas basadas en materiales reciclados de alta resistencia.

2.3.5. Importancia para la Gestión Minera y Ambiental del Perú

El tratamiento adecuado de pasivos ambientales es uno de los principales retos de la minería moderna en el Perú. Más de 8 000 pasivos registrados a nivel nacional requieren intervenciones sostenibles y tecnologías de remediación que garanticen seguridad ambiental a largo plazo (MINEM, 2024).

La propuesta de esta investigación introduce una tecnología poco explorada en el país, genera evidencia científica útil para la toma de decisiones, fortalece la gestión responsable de residuos, promueve innovación en la industria minera, y contribuye al cumplimiento de compromisos ambientales establecidos en normas nacionales.

La vitrificación con borosilicato puede convertirse en una herramienta estratégica dentro de los planes de cierre de minas, planes de remediación de pasivos y estrategias de gestión de sedimentos contaminados en diversos ecosistemas. Su eficacia, durabilidad y capacidad de generar materiales reutilizables la posicionan como una alternativa de alto valor para el sector extractivo.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

La aplicación de la técnica de vitrificación con borosilicato sobre sedimentos contaminados con metales pesados, específicamente plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo (Cr), permitirá su inmovilización en una matriz vítrea estable, reduciendo su efecto contaminante.

2.4.2. Hipótesis Específicas

- La caracterización físico-química de los sedimentos permitirá identificar concentraciones críticas de metales pesados y sus condiciones geoquímicas, lo que fundamenta la selección del tratamiento con borosilicato.

- El proceso de vitrificación con borosilicato fundido será más eficaz para encapsular metales como Pb, Zn y Cr, transformando los residuos contaminados en un material vítreo no lixiviable y estable frente a condiciones ambientales agresivas.

- La incorporación del producto vitrificado obtenido a partir de los lixiviados mineros permitirá su transformación en arena silícea, viable para ser utilizada como material agregado en aplicaciones de construcción.

2.5. Variables

La Tabla 2 presenta la definición y estructura de las variables a fin de cumplir con los objetivos del estudio.

Tabla 2:

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Tipo de variable	Unidad de medida
Variable independiente					
Tratamiento e inmovilización de lixiviados en sedimentos contaminados con borosilicato	Procedimiento experimental que aplica borosilicato como agente vitrificante a sedimentos contaminados con metales pesados (Pb, Zn, Cr), para inmovilizarlos en una matriz vítrea estable	• Proporción de borosilicato • Temperatura de vitrificación • Tiempo de exposición térmica	• Porcentaje de borosilicato • Temperatura aplicada • Minutos de exposición	Cuantitativa	• Porcentaje (%) • Temperatura (°C) • Tiempo (min)
Variables dependientes					
Caracterización fisicoquímica del sedimento	Propiedades iniciales del sedimento contaminado que influyen en la interacción química con el borosilicato	• pH • Conductividad eléctrica • Materia orgánica • Densidad real	• Nivel de pH • Conductividad eléctrica (µS/cm) • MO (%9) • Densidad (g/cm³)	Cuantitativa	Unidades físico-químicas según parámetro
Obtención de arenas silíceas post-vitrificación	Evaluación del producto vitrificado tratado por molienda, para su potencial uso como agregado de construcción	• Granulometría • Estabilidad química • Absorción de agua • Resistencia mecánica	• Distribución de tamaño de partícula • Porcentaje de lixiviación • Porcentaje de absorción • MPa de resistencia	Cuantitativa	• Unidad (Mm) • Porcentaje (%) • MPa según norma ASTM

2.5.1. Variable Independiente

Tratamiento e inmovilización de lixiviados en sedimentos contaminados (arsénico, plomo, zinc y cromo) con borosilicato

Corresponde al procedimiento experimental aplicado a sedimentos impactados por actividad minera e industrial, el cual consiste en el uso de borosilicato como agente vitrificante para encapsular metales pesados. Este tratamiento implica la manipulación controlada de variables como la proporción de borosilicato incorporado, la temperatura de fusión (superior a 950 °C) y el tiempo de exposición térmica. La finalidad del procedimiento es evaluar la eficiencia del encapsulamiento al formar una matriz vítrea amorfa que inmovilice química y físicamente los lixiviados metálicos, reduciendo su movilidad y toxicidad ambiental. Esta técnica busca además obtener un material estable, reutilizable y compatible con aplicaciones constructivas.

2.5.2. Variables Dependientes

Caracterizaciones fisicoquímicas del sedimento

Esta variable comprende la evaluación de parámetros como el pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y densidad real de los sedimentos contaminados. En el caso específico de los Humedales de Ite, los sedimentos superficiales presentan trazas de relaves con inclusión de metales pesados, principalmente plomo (Pb), cromo (Cr) y zinc (Zn). Estos análisis se realizarán en la fase inicial del estudio, ya que las propiedades fisicoquímicas condicionan la reactividad de estos metales y su interacción con el agente vitrificante (borosilicato). Dichas propiedades influyen directamente en la eficiencia del encapsulamiento térmico y en la calidad del producto vitrificado resultante. Además, la caracterización previa permite establecer relaciones entre las condiciones iniciales del sedimento y el comportamiento del sistema vitrificado.

Obtención de áreas sílicas post-vitrificación

Esta variable hace referencia al aprovechamiento del producto resultante de la vitrificación de los sedimentos contaminados. A través de un proceso de molienda y clasificación, se busca obtener una arena silícea estabilizada, con bajo contenido de metales lixiviables y adecuada granulometría. La arena obtenida será evaluada mediante ensayos físico-mecánicos y químicos para determinar su viabilidad

como agregado de construcción, en cumplimiento con estándares técnicos (como ASTM). Esta etapa integra el enfoque de economía circular en la investigación, proponiendo un uso final sostenible del residuo tratado, compatible con aplicaciones en ingeniería civil e infraestructura minera.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. Antecedentes

3.1.1. Antecedentes Internacionales

En el contexto de la gestión de pasivos ambientales, diversas investigaciones a nivel internacional han demostrado la eficacia de la vitrificación con borosilicato como técnica de estabilización y remediación de residuos peligrosos, especialmente aquellos con altos contenidos de metales pesados. Estos antecedentes permiten sustentar científicamente la viabilidad técnica de aplicar esta tecnología en entornos contaminados, como los sedimentos impactados de los humedales de Ite.

A continuación, se detallan experiencias significativas desarrolladas en países líderes en innovación ambiental y tratamiento de residuos, cuyas aplicaciones en sectores como el nuclear, industrial, minero y urbano permiten establecer paralelos con la problemática local. La revisión incluye casos documentados en Europa, América y Asia, los cuales ofrecen evidencia experimental y tecnológica sobre el comportamiento, eficiencia y ventajas del encapsulamiento térmico mediante borosilicato, así como su potencial de reutilización como insumo industrial.

Francia es uno de los países pioneros en el uso de vitrificación con borosilicato para el tratamiento de residuos peligrosos, especialmente en el contexto de la industria nuclear. Desde la década de 1980, la vitrificación se ha establecido como una estrategia nacional clave para la gestión de residuos de alta actividad. Esta tecnología se aplica principalmente en las plantas de tratamiento de residuos como la instalación de La Hague, operada por Orano, donde los residuos líquidos radiactivos son mezclados con borosilicato fundido y posteriormente enfriados para formar una matriz vítrea.

El material vitrificado resultante presenta una estabilidad química y térmica excepcional, con tasas de lixiviación de elementos radiactivos o metálicos extremadamente bajas, incluso bajo condiciones agresivas de humedad o acidez. Según el informe de la IAEA (Agency, 2011), los estudios de durabilidad han demostrado que estos residuos vitrificados pueden retener su estructura y encapsulamiento por más de 10,000 años, lo que convierte a la vitrificación en una

de las tecnologías más confiables para la inmovilización a largo plazo de residuos tóxicos.

En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (USEPA) reconoce desde la década de 1990 a la vitrificación como una Best Available Technology (BAT) para la remediación de suelos y sedimentos contaminados con metales pesados como plomo (Pb), arsénico (As), zinc (Zn) y cromo (Cr) (Agency U. S., 1996). La vitrificación se considera una tecnología térmica capaz de transformar materiales contaminados en formas inertes y no lixiviables, evitando así la migración de metales hacia aguas subterráneas o su reentrada al ciclo ecológico.

Una de las referencias clave en este contexto es el método 3050B de la USEPA, que establece el procedimiento de digestión ácida para suelos, sedimentos y lodos, permitiendo evaluar de manera precisa la concentración de metales antes y después del tratamiento. Este protocolo es ampliamente utilizado como parte del monitoreo en proyectos de remediación ambiental que incluyen vitrificación.

En Asia, particularmente en Corea del Sur y Japón, la vitrificación no solo se ha utilizado para estabilizar residuos peligrosos, sino también como herramienta para la producción de nuevos materiales industriales. La investigación realizada por Park en Corea del Sur muestra que residuos industriales con alto contenido metálico, al ser sometidos a vitrificación con borosilicato, generan materiales vitrificados con propiedades mecánicas y químicas útiles, como resistencia al ataque ácido y estabilidad térmica (Park, 2009).

Estos productos vitrificados han sido reutilizados como pavimentos, materiales cerámicos, recubrimientos y agregados resistentes a la corrosión, dentro de una estrategia de economía circular. Esta línea de trabajo permite transformar pasivos contaminantes en activos con valor industrial, generando un doble impacto positivo: ambiental y económico.

Dentro del campo de la valorización de residuos mineros mediante tecnologías térmicas avanzadas, un antecedente significativo es la patente europea (ES2969573T3, 2020), la cual describe un proceso innovador para la recuperación y transformación de arenas silíceas a partir de relaves de mineral de hierro. Esta patente constituye un referente técnico relevante para la presente investigación, pues demuestra que materiales considerados residuos (particularmente los ricos en óxidos metálicos y sílice) pueden ser procesados térmicamente para generar productos estables, no lixiviables y reutilizables en la industria de la construcción.

El proceso patentado combina varias etapas: clasificación granulométrica, lavado y separación física, seguidos de un tratamiento térmico de estabilización y fusión parcial, permitiendo transformar los relaves en un material vitrificado con alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2). La matriz vítrea resultante presenta baja reactividad química, alta resistencia mecánica y mínima liberación de metales, cumpliendo parámetros establecidos por normas europeas para agregados destinados a construcción civil.

Según el documento, el producto final puede ser empleado en la fabricación de pavimentos, mezclas cementicias, prefabricados y rellenos estructurales, lo que introduce un enfoque de economía circular aplicado directamente a la minería (ES2969573T3, 2020).

La importancia de esta patente radica en que ofrece evidencia técnica sobre la compatibilidad entre procesos de vitrificación y la producción de arenas silíceas utilizables, demostrando que la fusión controlada de residuos con componentes silíceos genera materiales seguros y aprovechables. Si bien la patente no utiliza borosilicato como fundente, el principio tecnológico (transformar residuos contaminados en matrices vítreas estables y con valor agregado) es directamente comparable con el enfoque de la presente tesis para los sedimentos de los humedales de Ite.

Este antecedente europeo refuerza la validez del concepto de remediación + valorización, base fundamental de la propuesta de investigación: reducir la peligrosidad del residuo mediante encapsulamiento térmico y, simultáneamente, convertirlo en un insumo industrial aprovechable.

En Latinoamérica, una experiencia destacada es la de Castañeda Peña, quienes desarrollaron un proceso de vitrificación a partir de residuos industriales con alto contenido de óxidos metálicos (Castañeda, Gonzalez, Gonzales, & Uribe, 2023). Estos residuos fueron sometidos a tratamiento térmico controlado a temperaturas superiores a 1,000 °C, obteniendo como resultado un material vítreo estable, no lixiviable y estructuralmente consolidado, con características físico-químicas apropiadas para su uso como agregado de construcción.

El estudio incluyó ensayos de absorción, densidad aparente, resistencia al impacto y lixiviación de metales pesados, concluyendo que el producto vitrificado cumple con los requisitos técnicos establecidos en las normas ASTM para materiales constructivos. Además, se comprobó que la incorporación de estos

residuos tratados en matrices cementicias no compromete su estabilidad ni su durabilidad a largo plazo. Esta experiencia refuerza el enfoque de valorización de residuos mediante vitrificación, demostrando que los materiales contaminantes pueden ser transformados en arenas silíceas vitrificadas, aptas para ser utilizadas en pavimentos, rellenos estructurales o prefabricados, dentro de una lógica de economía circular. Su relevancia radica en que no solo se evita la disposición final del residuo, sino que se genera un insumo útil, minimizando el impacto ambiental asociado a los pasivos industriales.

De forma complementaria, en México, Susunaga Miranda (2020) evaluaron el uso de arena sílica natural como componente de barreras reactivas permeables (PRB, por sus siglas en inglés) para la remediación de lixiviados contaminados con metales pesados (Cr^{6+}, Ni, Zn) provenientes de basureros no controlados. La arena extraída en Alvarado, Veracruz, fue caracterizada por su alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2 ~87 %), baja humedad y buena porosidad, condiciones ideales para la adsorción de contaminantes (Susunaga, Estévez, & Susunaga, 2020).

Los resultados indicaron que estas PRB construidas con arena sílica lograron reducciones de hasta 93 % en concentraciones metálicas en menos de cuatro minutos de contacto hidráulico, lo que valida su eficiencia como medio de tratamiento pasivo de bajo costo. Aunque en este caso no se aplicó vitrificación, la similitud funcional con los productos generados en tu propuesta es evidente, ya que ambos enfoques apuntan a inmovilizar metales pesados y convertirlos en materiales reutilizables, reforzando el modelo de minería sostenible basado en tecnologías limpias y valorización de residuos.

Los antecedentes internacionales presentados confirman que la vitrificación con borosilicato es una técnica validada y versátil, tanto para la inmovilización de metales pesados en residuos peligrosos, como para la producción de materiales reutilizables en contextos industriales. Su aplicación en Francia, EE. UU., Corea, Japón y España demuestra su eficacia técnica, estabilidad a largo plazo y potencial de valorización, lo que respalda su propuesta como alternativa de remediación ambiental en los humedales de Ite.

3.1.2. Antecedentes Nacionales

En el ámbito nacional, la investigación sobre tecnologías de remediación de pasivos ambientales ha crecido en los últimos años, impulsada por la necesidad urgente de intervenir zonas afectadas por residuos mineros, industriales y urbanos. Sin embargo, el desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas como la vitrificación con borosilicato aún se encuentra en una etapa exploratoria, limitada principalmente al ámbito académico y de laboratorio.

A pesar de ello, diversos trabajos de investigación liderados por universidades públicas y algunos informes institucionales han comenzado a explorar el potencial de esta tecnología para estabilizar metales pesados contenidos en relaves, suelos y sedimentos contaminados. Este panorama permite identificar oportunidades técnicas para validar y escalar soluciones innovadoras como las que propone la presente tesis.

En un estudio reciente, Salinas Gonzales (2023), de la Universidad Nacional del Santa, investigó la combinación de residuos mineros con vidrio reciclado para formar un producto vitrificado que encapsule metales pesados. Se trabajó con relaves provenientes de operaciones cupríferas y residuos vítreos posconsumo. El proceso de vitrificación alcanzó temperaturas de 950 °C y dio como resultado una matriz vítrea con resistencia química a la lixiviación y alta estabilidad estructural (Salinas Gonzales Y. M., 2023).

Este estudio demostró que los metales como plomo (Pb) y cobre (Cu) quedaron retenidos dentro de la estructura del vidrio, disminuyendo significativamente su solubilidad en pruebas de lixiviación. Aunque la escala fue de laboratorio, los resultados fueron promisorios y sugieren que los residuos inertes obtenidos podrían ser empleados como agregados constructivos.

El Ministerio del Ambiente (MINAM) y el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) han identificado oficialmente la magnitud del problema ambiental asociado a los pasivos mineros. Según el Inventario de Pasivos Ambientales Mineros (IPAM) actualizado en 2024, existen más de 7,000 sitios contaminados registrados en todo el país, la mayoría con residuos que contienen arsénico, plomo, cadmio y zinc, ubicados principalmente en las regiones de Cajamarca, Pasco, Junín, Moquegua y Tacna (MINEM, MINEM, 2024) (MINAM, 2024).

Aunque las tecnologías térmicas como la vitrificación no están todavía incorporadas formalmente en las normas técnicas peruanas, el Plan Nacional de Remediación de Pasivos Ambientales elaborado por el MINAM reconoce la necesidad de aplicar tecnologías sostenibles, eficientes e innovadoras para el tratamiento de residuos contaminantes, particularmente aquellos que no pueden ser estabilizados mediante técnicas tradicionales.

Aunque aún sin aplicaciones industriales directas, varias universidades nacionales han iniciado estudios preliminares sobre estabilización de residuos y tecnologías de encapsulamiento térmico. Por ejemplo, en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), se han desarrollado tesis relacionadas con la transformación de relaves mineros en materiales cerámicos mediante tratamientos térmicos de fusión, obteniendo productos que cumplen con normas de resistencia y toxicidad aceptables. La Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa (UNSA) ha desarrollado líneas de investigación en vitrificación para residuos industriales en colaboración con empresas del sur del país, aunque aún en fase experimental.

Estos estudios han explorado el uso de fundentes como el borato de sodio y la sílice, con resultados que sugieren viabilidad técnica para encapsular metales pesados en matrices vidriosas estables.

Si bien aún no se registran patentes peruanas directamente relacionadas con vitrificación de residuos mineros, algunos proyectos desarrollados por Concytec y universidades aliadas han comenzado a desarrollar propuestas de innovación con potencial patentable, como el uso de escorias de fundición o relaves estabilizados para fabricar adoquines o bloques constructivos.

La presente tesis se posiciona en esta línea emergente, proponiendo no solo una solución de remediación, sino también una valorización del residuo vitrificado para generar arena silícea, lo cual representa un avance frente a las investigaciones nacionales existentes, principalmente enfocadas en la contención y no en la reutilización.

En conjunto, los antecedentes revisados muestran que en el Perú existe una conciencia creciente sobre la necesidad de remediar pasivos ambientales mineros, y un interés incipiente en tecnologías como la vitrificación con borosilicato. Aunque aún no existen aplicaciones a escala industrial, los estudios académicos y los registros del MINEM sustentan la pertinencia y el potencial innovador de aplicar esta técnica en contextos como los humedales de Ite, donde

la presencia de metales pesados y la necesidad de alternativas sostenibles justifican plenamente esta propuesta.

3.1.3. Antecedentes Locales

En el nivel local, particularmente en la región Tacna, los humedales de Ite representan uno de los ecosistemas costeros más impactados por actividades industriales y minero-metalúrgicas históricas. Esta zona fue originalmente diseñada como sistema de tratamiento y amortiguación para efluentes provenientes del procesamiento de minerales, sin embargo, su uso continuo sin técnicas de remediación ha derivado en una acumulación significativa de metales pesados en el agua, el suelo y los sedimentos.

A pesar del conocimiento institucional sobre esta problemática, no se ha implementado hasta la fecha ninguna tecnología activa de tratamiento físico-químico o térmico de los sedimentos. Esta brecha tecnológica posiciona al presente estudio como una propuesta pionera en remediación integral mediante vitrificación con borosilicato, con visión de recuperación ambiental y reutilización industrial del residuo.

Informes técnicos de instituciones como la Dirección General de Salud Ambiental, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Gobierno Regional de Tacna (Tacna, 2023), han documentado la presencia de diversos metales en los humedales de Ite, incluyendo arsénico (As), plomo (Pb), zinc (Zn), cobre (Cu) y cadmio (Cd). Para el presente estudio, y considerando el estado del arte sobre contaminación asociada a relaves, se concentrará el análisis únicamente en plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo (Cr) como los elementos más representativos de la problemática local.

Por ejemplo, los reportes de la ANA muestran que, en varios puntos de monitoreo, los niveles de plomo y arsénico superan los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua y sedimentos (ANA, 2023). Esta condición se agrava en la estación de lluvias, cuando el arrastre superficial incrementa la deposición de contaminantes en el humedal.

A pesar de la evidencia científica sobre la contaminación, los esfuerzos realizados hasta la fecha se han limitado a acciones de monitoreo y vigilancia ambiental (DIGESA, Dirección General de Salud Ambiental, 2022), sin aplicación de tecnologías de tratamiento directo en los sedimentos contaminados.

No se han implementado técnicas como solidificación, estabilización química, encapsulamiento térmico, ni mucho menos vitrificación. Tampoco se han reportado estudios piloto sobre reutilización del residuo tratado, lo que deja un vacío técnico en la gestión de estos pasivos dispersos en ecosistemas húmedos. Esta brecha representa una oportunidad para la innovación en remediación.

Frente a este contexto, la vitrificación con borosilicato se presenta como una alternativa técnica viable y ambientalmente robusta para el tratamiento de los sedimentos contaminados. Esta tecnología permite inmovilizar metales pesados dentro de una matriz vítrea amorfa, formada por la fusión de materiales a temperaturas superiores a los 950 °C. Su resistencia química y térmica ha sido comprobada internacionalmente, y su uso en contextos similares avala su aplicación en zonas como Ite.

Además, el producto vitrificado obtenido puede ser aprovechado industrialmente como arena silícea o agregado constructivo, transformando un residuo peligroso en un recurso utilizable. Esto representa una doble ganancia: por un lado, se reduce el riesgo ambiental, y por otro, se incorpora una solución alineada con principios de economía circular.

Esta propuesta tecnológica no ha sido aplicada antes en la región, lo cual convierte esta investigación en una experiencia pionera de remediación activa de humedales con potencial de escalamiento.

Los antecedentes locales evidencian una problemática ambiental conocida, monitoreada, pero aún no intervenida técnicamente. A pesar de los registros sostenidos de metales pesados en sedimentos de los humedales de Ite, no se ha evaluado ni aplicado ninguna tecnología de encapsulamiento físico-químico. En este contexto, la aplicación de vitrificación con borosilicato se perfila como una innovación disruptiva, que puede contribuir no solo a la mitigación del riesgo ambiental, sino también a la valorización del residuo tratado, con enfoque en sostenibilidad y salud pública.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Pasivos Ambientales Mineros

Los pasivos ambientales mineros (PAM) son instalaciones, residuos o estructuras abandonadas como consecuencia de actividades extractivas realizadas sin planes adecuados de cierre o remediación. Estos elementos pueden incluir relaves, desmontes, depósitos de estériles, bocaminas, galerías y tajos abiertos que, al quedar expuestos a la intemperie, generan riesgos de contaminación para el suelo, agua y salud humana (MINEM, MINEM, 2024).

Su peligrosidad radica en la generación de procesos como el drenaje ácido de mina (DAM), la solubilización de metales pesados y su transporte hacia cuerpos de agua superficiales o subterráneas, afectando ecosistemas sensibles como humedales y bofedales.

3.2.2. Contaminación por Metales Pesados en Sedimentos

Los sedimentos de humedales, ríos o lagunas funcionan como depósitos naturales donde se acumulan metales pesados provenientes de fuentes mineras, industriales o agrícolas. Elementos como Pb, Zn y Cr, pueden quedar retenidos en la fracción fina del sedimento, adsorbidos a minerales arcillosos u óxidos metálicos. Sin embargo, estos contaminantes pueden reactivarse y liberarse nuevamente debido a cambios en pH, potencial redox, salinidad, actividad microbiana o disturbios físicos (Agency U. S., 1996).

La acumulación de metales en sedimentos constituye un riesgo persistente, ya que estos pueden reincorporarse a la columna de agua, entrar a la cadena trófica o afectar la estructura biogeoquímica del humedal.

3.2.3. Fundamentos del Proceso de Vitrificación

La vitrificación es un proceso térmico avanzado mediante el cual se funden residuos contaminados a temperaturas entre 950 °C y 1 200 °C, obteniendo una matriz vítrea amorfa de alta estabilidad. Durante la fusión, los metales pesados se incorporan químicamente en la red tridimensional del vidrio, quedando inmovilizados en un sólido no poroso y químicamente resistente (Agency I. A., 2011).

Esta técnica ha sido ampliamente utilizada en el tratamiento de residuos industriales, suelos contaminados y desechos radiactivos debido a su elevada eficiencia para reducir la lixiviabilidad de metales y su durabilidad a largo plazo.

3.2.4. Borosilicato como Material Encapsulante

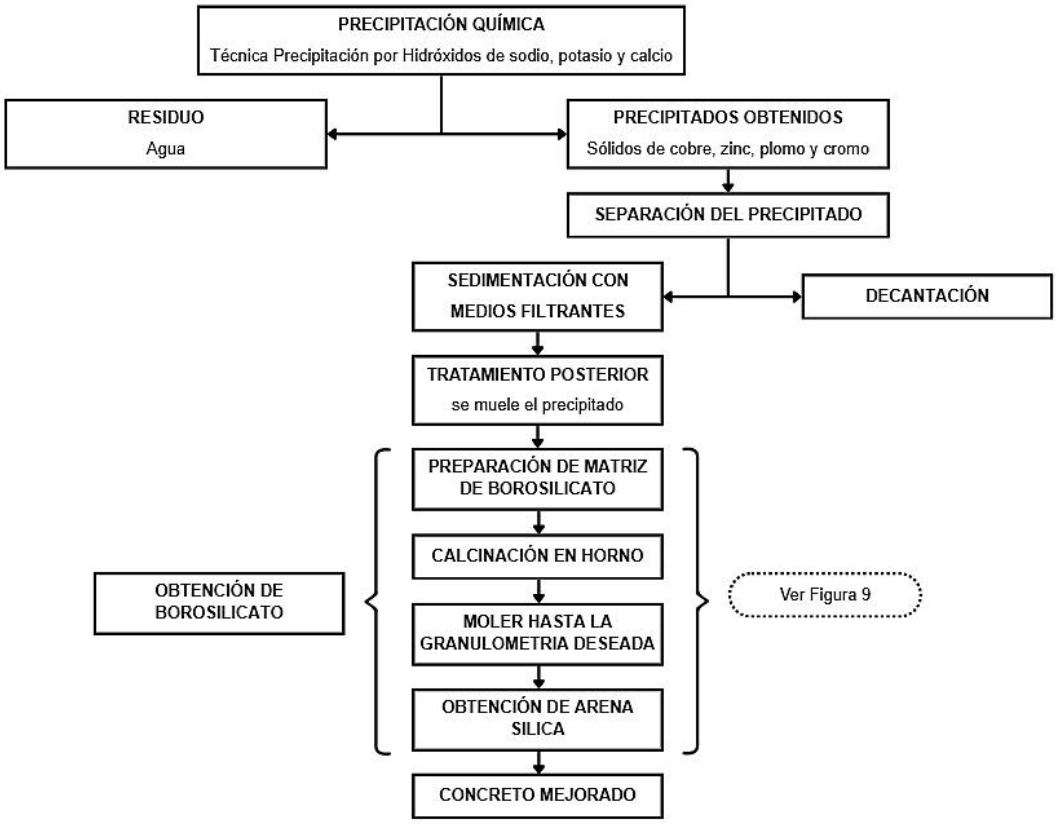
El borosilicato es un tipo de vidrio compuesto principalmente por SiO_2 y B_2O_3. La presencia de boro reduce la temperatura de fusión, incrementa la estabilidad térmica y mejora la resistencia química del material, permitiendo una incorporación más eficiente de los metales pesados en la red vítrea (Park, 2009).

Su estructura amorfa, baja porosidad, resistencia a la corrosión y durabilidad lo convierten en uno de los materiales más utilizados para la vitrificación de residuos peligrosos y combustibles nucleares gastados.

Para complementar la descripción del borosilicato como material encapsulante, a continuación, se presenta el flujograma del proceso utilizado para su obtención, en la Figura 3. Este procedimiento incluye etapas físico-químicas como precipitación, separación, tratamiento térmico y molienda, que permiten obtener un material vítreo estable, apto para su utilización en el proceso de vitrificación y en la elaboración de probetas de concreto.

Figura 3:

Flujograma del proceso de obtención de borosilicato utilizado en la investigación



Nota: *Elaboración propia*

3.2.5. Encapsulamiento de Metales Pesados en Matriz Vítrea

El encapsulamiento consiste en la inmovilización de contaminantes dentro de la estructura vítrea formada durante la vitrificación. Los metales se incorporan como iones dentro de la red o quedan atrapados físicamente en el material sólido.

Este encapsulamiento confiere propiedades de alta resistencia a la lixiviación, incluso en condiciones ambientales extremas como ciclos de humedad-sequedad, variaciones de pH o exposición prolongada a agentes corrosivos (Agency U. S., 1996) (Agency I. A., 2011).

Por ello, la vitrificación es considerada una de las tecnologías más estables para el manejo de residuos inorgánicos altamente contaminados.

3.2.6. Comparación de la Vitrificación con otras Tecnologías de Remediación

Otras tecnologías comúnmente utilizadas para tratar sedimentos contaminados incluyen:

- Solidificación–estabilización con cemento (S/S)
- Soil washing (lavado de suelos)
- Adsorción con materiales orgánicos, biopolímeros o nanopartículas
- Biorremediación

Si bien estas alternativas presentan beneficios operativos, poseen limitaciones como: baja durabilidad, susceptibilidad a cambios de pH y redox, incapacidad para inmovilizar múltiples metales simultáneamente y riesgo de reliberación.

En contraste, la vitrificación con borosilicato logra un encapsulamiento casi permanente, con matrices vítreas de muy baja permeabilidad y alta resistencia química. Su ventaja radica en su estabilidad a largo plazo, especialmente relevante en humedales y zonas con variabilidad hidrológica.

3.2.7. Arenas Sílicas como Medio de Encapsulamiento y Mitigación Ambiental

Las arenas silíceas, compuestas mayoritariamente por SiO_2, poseen características que las hacen útiles como material de cobertura o encapsulamiento en pasivos ambientales: baja permeabilidad, estabilidad térmica, resistencia a la disolución y abundancia natural (Mendoza Huamán, 2023).

En algunos estudios, se ha demostrado que pueden contribuir a disminuir la migración de metales en relaves y depósitos de residuos, además de servir como insumo industrial en la fabricación de vidrios, cementos y materiales compuestos.

3.2.8. Valorización de Residuos Mineros Mediante Vitrificación: Experiencia Internacional

Las tecnologías de vitrificación se han aplicado en distintos países para transformar residuos contaminados en productos de valor agregado.

Un caso destacado es la patente española (ES2969573T3, 2020), que describe un proceso innovador para transformar relaves de mineral de hierro en arena silícea vitrificada mediante la clasificación granulométrica, separación magnética, lavado, estabilización térmica y formación de una matriz vítrea estable.

El producto obtenido puede ser utilizado como árido fino para construcción, ofreciendo un material con resistencia adecuada, baja reactividad y estabilidad química. Esta experiencia demuestra que los residuos mineros pueden no solo ser estabilizados, sino también revalorizados como insumos para la industria de la construcción.

3.2.9. Viabilidad de la Aplicación en Contextos Mineros Peruanos

El Perú cuenta con más de 7 000 pasivos ambientales mineros identificados, muchos de ellos sin responsable legal y sin tratamiento tecnológico viable (MINEM, MINEM, 2024). En zonas críticas como los humedales de Ite, donde existe acumulación histórica de metales pesados, la aplicación de tecnologías avanzadas como la vitrificación con borosilicato constituye una alternativa real para reducir riesgos ambientales.

A pesar del mayor costo energético, su capacidad de encapsular metales, reducir volúmenes y generar un producto revalorizable contribuye a una minería circular, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y estrategias nacionales de gestión ambiental.

3.3. Definición de términos

Pasivo ambiental minero (PAM)

Residuos, instalaciones o componentes generados por actividades mineras abandonadas o inactivas, que no cuentan con tratamiento, cierre o señalización adecuada y que representan riesgo para el ambiente o la salud pública (MINEM, MINEM, 2024).

Sedimentos contaminados

Materiales sólidos depositados en cuerpos de agua que contienen sustancias tóxicas (principalmente metales pesados) acumuladas por procesos naturales o actividades antrópicas.

Metales pesados

Elementos de alta densidad atómica como plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo (Cr). Son tóxicos incluso en bajas concentraciones, persistentes y con tendencia a bioacumularse.

Vitrificación

Proceso de tratamiento térmico que funde materiales contaminados a altas temperaturas (1 200–1 500 °C), transformándolos en una matriz vítrea amorfa donde los metales quedan inmovilizados.

Borosilicato

Vidrio compuesto principalmente de dióxido de silicio (SiO_2) y trióxido de boro (B_2O_3). Presenta alta estabilidad química y térmica, y se utiliza como matriz para encapsular residuos tóxicos debido a su baja lixiviabilidad.

Arena sílica

Agregado fino constituido principalmente por sílice (SiO_2), con alta estabilidad química. En procesos de valorización minera puede recuperarse de relaves estabilizados y utilizarse como insumo en mezclas cementicias o en vitrificación.

Encapsulamiento

Retención física o química de contaminantes dentro de una matriz sólida (vítrea, cementicia, cerámica), reduciendo su movilidad y evitando su liberación al ambiente.

Lixiviación

Proceso mediante el cual compuestos solubles, especialmente metales pesados, son arrastrados por agua o soluciones, generando dispersión de contaminantes.

Matriz vítrea

Sólido amorfo derivado de la vitrificación, compuesto por silicatos y óxidos capaces de incorporar metales en su estructura, disminuyendo su reactividad y solubilidad.

Digestión ácida

Método de laboratorio que utiliza mezclas de ácidos fuertes para descomponer muestras sólidas y liberar metales para su análisis químico, como en el método USEPA 3050B.

Espectrofotometría de absorción atómica (AAS)

Técnica instrumental que cuantifica metales presentes en una muestra midiendo la absorción de luz por átomos metálicos excitados.

Economía circular

Modelo de gestión que promueve el aprovechamiento de residuos como recursos, mediante reciclaje, reúso o transformación, reduciendo la extracción de materias primas vírgenes.

Estabilidad geoquímica

Capacidad de un material para resistir procesos de degradación, disolución o liberación de contaminantes bajo condiciones ambientales variables (pH, humedad, temperatura).

Conductividad eléctrica

Parámetro que mide la capacidad de un sedimento o solución para conducir corriente eléctrica, relacionado con la presencia de sales disueltas e iones.

Materia orgánica

Fracción de sedimentos compuesta por restos vegetales y microbianos. Influye en la movilidad de metales debido a su capacidad de complejación y adsorción.

pH

Indicador de acidez o alcalinidad. Controla la solubilidad de los metales en los sedimentos y su potencial movilidad.

Densidad real

Relación entre masa y volumen excluyendo vacíos o poros. Parámetro físico utilizado para caracterizar sedimentos.

Nutrientes (Nitrógeno total y fósforo disponible)

Componentes químicos que influyen en procesos biogeoquímicos del sedimento, afectando indirectamente la movilidad de metales.

Normas de Calidad Ambiental (ECA)

Valores límite establecidos por el MINAM para proteger la calidad de diversos componentes ambientales como agua, aire, suelo y sedimentos.

Estudio de línea base

Evaluación que describe las condiciones ambientales iniciales antes de aplicar un proceso de remediación, permitiendo comparar y medir cambios posteriores.

Remediación ambiental

Conjunto de técnicas destinadas a reducir o eliminar contaminantes presentes en suelos, sedimentos o cuerpos de agua, restaurando su funcionalidad ecológica.

Humedal artificial

Ecosistema construido o modificado para el tratamiento, almacenamiento o filtración de aguas residuales. Se diferencia de los humedales naturales por su origen antrópico.

Zona de influencia minera

Área geográfica que recibe impactos ambientales, sociales o económicos derivados directa o indirectamente de una actividad minera.

Material vitrificado reutilizable

Producto estable y sólido resultante de la vitrificación, apto para ser empleado como agregado en concretos, pavimentos, cerámicas técnicas o barreras de contención.

Modelo de utilidad (propiedad industrial)

Figura de protección legal que resguarda mejoras técnicas aplicadas a productos o procesos, incluyendo innovaciones en materiales obtenidos por vitrificación.

IV. METODOLOGÍA

4.1. Tipo y Nivel de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, dado que busca generar una solución técnica concreta para la remediación de sedimentos contaminados en los humedales de Ite mediante un proceso de vitrificación con borosilicato y, adicionalmente, evaluar el potencial de aprovechamiento del material vitrificado en aplicaciones constructivas bajo un enfoque de economía circular.

El nivel corresponde a una investigación experimental, porque se manipula deliberadamente la variable independiente (el tratamiento térmico con borosilicato) con el propósito de observar sus efectos en variables dependientes como la lixiviabilidad, la estabilidad geoquímica, la densidad, la resistencia mecánica y el comportamiento físico del material final. El enfoque es cuantitativo, dado que se obtendrán y analizarán datos numéricos provenientes del análisis químico de los sedimentos y de los ensayos físicos y mecánicos aplicados al material vitrificado y a las probetas de concreto.

4.1.1. Diseño de Investigación

El estudio adopta un diseño experimental aplicado y secuencial estructurado en dos fases. La primera corresponde a la remediación de los sedimentos contaminados mediante vitrificación con borosilicato y la segunda a la valorización del material vitrificado como reemplazo parcial del cemento en probetas de concreto. Este diseño se sustenta en Hernández Sampieri (Hernández Sampieri, 2014), quien indica que un experimento implica manipular una variable independiente para evaluar sus efectos bajo condiciones controladas, y en Tamayo y Tamayo (Tamayo y Tamayo, 2011), quien señala que las investigaciones aplicadas buscan generar soluciones prácticas.

El diseño incluye siete etapas operativas, distribuidas entre las dos fases.

A. Remediación de Sedimentos Contaminados

i. Toma de muestras

La investigación inicia con la toma de tres muestras representativas dentro de los humedales de Ite, priorizando zonas cercanas a descargas históricas y áreas de acumulación de sedimento fino. El procedimiento se realizó siguiendo el protocolo

descrito por Andreu y Camacho (Andreu, 2002), garantizando un volumen aproximado de 3 kg por muestra, que fueron preservadas en condiciones controladas y trasladadas al laboratorio de la Universidad Nacional de Moquegua.

ii. Caracterización físico-química de los sedimentos

Esta etapa, actualmente en proceso, comprende la determinación de humedad según Zagal (Zagal, 2007), pH y conductividad eléctrica utilizando los métodos SM 4500-H y SM 2510, siguiendo procedimientos de Andrades (Andrades, 2015) y (Ruiz Román, 2018), densidad real mediante picnómetro conforme a UNE-EN ISO 17892-3:2015 (AENOR, 2018), contenido de materia orgánica según Bernal (Bernal, 1996), nitrógeno total mediante el método Kjeldahl descrito por Bremner (Bremner, 2009) y fósforo disponible siguiendo el método Olsen (Gilabert de Brito, 1990). Con esta información se determinarán las condiciones iniciales del sedimento antes del tratamiento térmico.

iii. Determinación de metales pesados

La cuantificación de metales se realizará aplicando el método de digestión ácida USEPA 3050B (Agency U. S., 1996), utilizando una mezcla de HNO_3 y HCl. Las concentraciones de arsénico, plomo, zinc y cromo, serán determinadas mediante espectrofotometría de absorción atómica, con el fin de establecer la carga metálica presente en los sedimentos y definir los niveles de riesgo asociados.

iv. Proceso de vitrificación con borosilicato

Una vez caracterizados los sedimentos, estos serán mezclados con frita de borosilicato y sometidos a temperaturas controladas entre 950 y 1100 °C en un horno eléctrico. El propósito es generar una matriz vítrea amorfa y estable que inmovilice los metales pesados presentes. El material vitrificado será posteriormente sometido a pruebas de lixiviación bajo los criterios TCLP (USEPA), CCME (Canadá), NOM-147 (México) y lineamientos NOAA, con el objetivo de evaluar la eficiencia del encapsulamiento y la reducción del potencial tóxico.

B. Valorización del Material Vitrificado

i. Preparación del material vitrificado para su uso en concreto

El material obtenido del proceso de vitrificación será triturado, pulverizado y tamizado mediante malla #200 para obtener un polvo fino adecuado como sustituto parcial del cemento. Este acondicionamiento permitirá evaluar su compatibilidad y desempeño dentro de mezclas cementicias.

ii. Elaboración de probetas de concreto

Se prepararán tres diseños de mezcla: un concreto control sin reemplazo y dos mezclas que incorporarán 19 g y 44 g de borosilicato vitrificado, como sustituto parcial del cemento. Las probetas serán elaboradas siguiendo los procedimientos establecidos en ASTM C109 y en la NTP 339.034 y serán sometidas a períodos de curado de 28 días conforme a normativa.

iii. Ensayos físicos y mecánicos

Las probetas elaboradas serán evaluadas para determinar su resistencia a la compresión (ASTM C109), densidad aparente, porosidad y absorción de agua según ASTM C642. Estos resultados permitirán analizar la influencia del material vitrificado en las propiedades del concreto y determinar su viabilidad dentro de aplicaciones constructivas y de economía circular.

4.2. Ámbito Temporal y Espacial

4.2.1. Ámbito Temporal

Las actividades de investigación están programadas para un periodo total de tres meses, distribuidos de acuerdo con el cronograma descrito en la Tabla 3. Este periodo comprende desde la validación del plan de tesis y revisión teórica, hasta la redacción y presentación del informe final.

Tabla 3:

Cronograma de actividades

ACTIVIDAD	MES 1	MES 2	MES 3
1. Validación del plan de tesis y revisión teórica	x x x		
1.1. Revisión metodológica y bibliografía técnica	x x	x	
2. Trabajo de campo: Muestreo en los humedales de Ite	x		
2.1. Coordinación, recojo y conservación de muestras	x		
3. Análisis de laboratorio		x x	
3.1. Digestión ácida de sedimentos		x	
3.2. Análisis de metales pesados (AAS)		x	
3.3. Análisis físico-químico (pH, CE, MO, densidad, N, P)		x	
4. Ensayos de vitrificación con borosilicato		x	
4.1. Preparación de mezcla vitrificable		x	
4.2. Fusión y obtención de probetas vitrificadas		x	
5. Ensayos de desempeño de las probetas			x
5.1. Ensayos de compresión uniaxial (UCS)			x
6. Procesamiento e interpretación de resultados			x
6.1. Integración de resultados químicos, térmicos y mecánicos			x
6.2. Elaboración de tablas, gráficos y fichas técnicas			x
7. Redacción del informe final y revisión			x x x
7.1. Correcciones y presentación a jurado			x

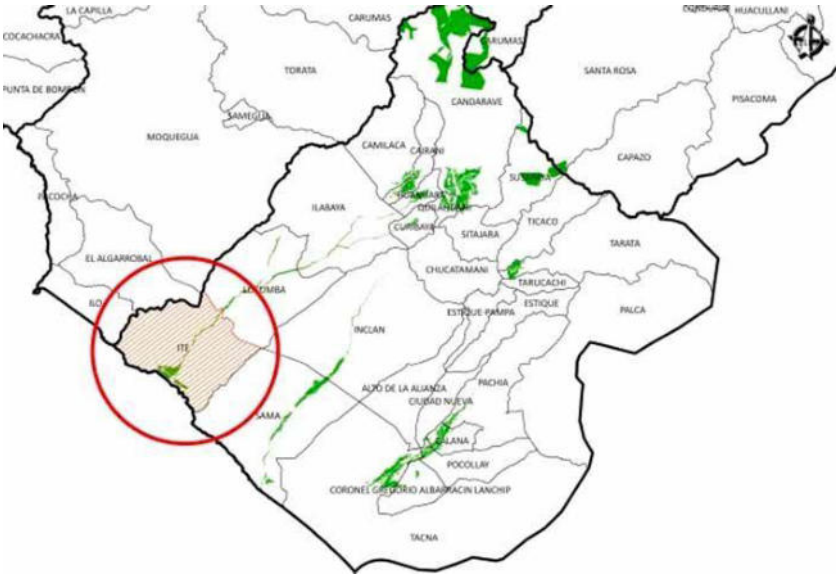
Nota: *Elaboración propia*

4.2.2. Ámbito Espacial

El área de estudio corresponde a los Humedales de Ite, ubicados en el distrito de Ite, provincia de Jorge Basadre, región Tacna, al sur del Perú, como se observa en la Figura 4. Este ecosistema costero se encuentra aproximadamente a 60 km al norte de la ciudad de Tacna, en las coordenadas referenciales 17°38’ S – 70°52’ O, a una altitud promedio de 20 m s.n.m.

Figura 4:

Localización del área de estudio



Nota: *Recuperado de “Los humedales de Ite: el más grande del Perú”. Elaboración propia.*

A. Ubicación del área de estudio

Los humedales se extienden entre la franja litoral del océano Pacífico y la zona de desembocadura del río Locumba. El acceso se realiza principalmente a través de la Carretera Panamericana Sur, complementada por caminos secundarios habilitados para tránsito local y actividades de monitoreo ambiental. El entorno presenta depósitos sedimentarios y áreas intervenidas históricamente por actividades minero-industriales, lo que plantea condiciones relevantes para estudios de evaluación y remediación ambiental.

B. Clima

El clima es de tipo árido costero, con temperaturas medias entre 15 °C y 25 °C. La precipitación anual es muy baja (menos de 10 mm/año), concentrada en verano. La humedad relativa supera el 80 %, influenciada por la proximidad del mar y la presencia frecuente de neblinas costeras. Este régimen climático permite la permanencia de cuerpos de agua poco profundos y favorece la formación de humedales estacionales.

C. Geología y geomorfología

La zona está conformada por sedimentos cuaternarios marino-continentales, compuestos por arenas finas, limos, arcillas con materia orgánica y gravas dispersas. A nivel subsuperficial predominan depósitos aluviales recientes relacionados con el río Locumba. Si bien no se observan afloramientos volcánicos o intrusivos cercanos, existe una marcada influencia antrópica, derivada de la disposición histórica de efluentes industriales y relaves líquidos, lo cual ha modificado la composición geoquímica original de los sedimentos.

D. Hidrogeología y características ambientales

Los humedales funcionan como zona de amortiguamiento hidrológico, regulando el flujo proveniente del río Locumba e interceptando infiltraciones costeras. Presentan cuerpos de agua con salinidad variable y sedimentos con acumulación de metales pesados debido a impactos industriales previos. Diversas evaluaciones de entidades como ANA, DIGESA y MINAM han reportado concentraciones elevadas de arsénico, plomo, zinc, hierro y manganeso en agua y sedimentos, lo que convierte al área en un sitio prioritario para estudios de remediación.

E. Biodiversidad y valor ecológico

A pesar de la alteración histórica, los humedales mantienen importantes comunidades biológicas. Albergan especies de flora halófita y fauna silvestre destacada, incluyendo aves residentes y migratorias como flamencos, garzas, gaviotas, piqueros y chorlos. Su relevancia radica en sus funciones ecológicas:

- Retención de sedimentos.
- Filtración natural de contaminantes.
- Recarga de acuíferos.

- Soporte de biodiversidad costera.

Son considerados un ecosistema frágil y de alta prioridad para conservación.

F. Delimitación operativa del área de muestreo

El estudio se enfocará en zonas específicas del humedal donde se observa mayor acumulación de sedimentos finos y registros históricos de presencia de metales pesados. La selección de estos sectores considera criterios de accesibilidad, estabilidad del terreno y seguridad operativa durante las actividades de muestreo.

G. Actividad humana e impacto minero-industrial

Durante varias décadas, el área recibió descargas de efluentes y relaves líquidos de la fundición de Ilo (SPCC) y otras actividades industriales asociadas. Si bien se han realizado obras de rehabilitación superficial, los sedimentos profundos aún presentan contenido metálico significativo, especialmente arsénico y metales pesados. Esta condición justifica la necesidad de evaluar alternativas tecnológicas como la inmovilización vítrea con borosilicato, orientadas a la reducción del riesgo ambiental y a la conversión del material en productos aprovechables, como arenas silíceas para la construcción.

H. Justificación del área de estudio

La selección de los humedales de Ite como área de investigación responde a su condición de sitio históricamente impactado por pasivos ambientales mineros, su relevancia ecológica y la presencia documentada de metales pesados en sus sedimentos, lo que lo convierte en un caso representativo para evaluar la eficacia de la inmovilización vítrea como alternativa de remediación.

4.3. Población y Muestra

4.3.1. Población

La población de estudio está constituida por el total de sedimentos acumulados en los humedales de Ite, como se visualiza en la Figura 5, los cuales presentan indicios de contaminación por metales pesados como consecuencia de procesos naturales y antrópicos. Estos sedimentos incluyen materiales de origen aluvial, marino y antrópico, distribuidos a lo largo de la superficie del humedal,

especialmente en zonas de mayor retención de partículas finas, materia orgánica y acumulación de contaminantes.

Figura 5:
Localización de los Humedales de Ite



Nota: *Recuperado de "Evaluación de Impacto Ambiental" de la Universidad Nacional de Ingeniería*

4.3.2. Muestra

La muestra estará compuesta por nueve unidades de muestreo, correspondientes a tres puntos estratégicos previamente seleccionados dentro del humedal, que cumplen criterios de representatividad espacial y ambiental. Cada punto será muestreado mediante la extracción de aproximadamente 3 kg de sedimento superficial (1 m), siguiendo el protocolo establecido por Andreu & Camacho (Andreu, 2002). Las muestras serán almacenadas y conservadas en condiciones controladas para su análisis físico-químico y posterior vitrificación experimental.

Las muestras seleccionadas constituirán la base del trabajo experimental, que comprende su caracterización físico-química inicial, la preparación previa para su

homogenización y el sometimiento a procesos de vitrificación en matriz de borosilicato. Estos procedimientos permitirán evaluar el grado de inmovilización de los metales presentes y determinar la viabilidad de obtener un material vítreo estable con propiedades compatibles para su aprovechamiento como arena sílica en aplicaciones de construcción.

4.4. Instrumentos

Para el desarrollo del presente estudio se utilizaron instrumentos de campo, laboratorio y equipos especializados que permitieron la recolección, preparación, análisis y transformación experimental de los sedimentos contaminados provenientes de los humedales de Ite. Los instrumentos empleados se agrupan en las siguientes categorías:

4.4.1. Instrumentos de campo

- Lampa curva y pico, utilizados para la extracción de muestras superficiales (1 m).
- Bolsas y contenedores estériles de polietileno, empleados para almacenar y conservar los sedimentos recolectados.
- GPS, para el georreferenciamiento preciso de los tres puntos representativos de muestreo y de las ubicaciones de las submuestras. [1]
- Etiquetas codificadas y fichas de campo, para la trazabilidad y registro sistemático de la información.
- Cámara fotográfica, para documentar las condiciones del área de muestreo y las características iniciales de los sedimentos.
- Guantes desechables y material de limpieza (alcohol isopropílico, paños estériles): para evitar contaminación cruzada entre submuestras.

[1] Nota sobre el diseño de muestreo: se definieron tres puntos representativos en el área de estudio. En cada punto se recogieron tres submuestras espaciadas aproximadamente 50 m entre sí, conformando así nueve muestras de trabajo que permiten representar la variabilidad espacial local.

4.4.2. Instrumentos para análisis físico-químico

- pH-metro digital, calibrado conforme a los estándares INACAL.
- Conductímetro, para la medición de conductividad eléctrica y salinidad.
- Balanza analítica de precisión, para cuantificar masa de muestras en etapas de preparación.
- Juego de tamices estandarizados, para granulometría y homogenización.
- Material de vidrio de laboratorio (beakers, probetas, pipetas, matraces aforados).

4.4.3. Instrumentos para la vitrificación en borosilicato

- Horno mufla de alta temperatura (≥1200 °C), empleado para el proceso de fusión de sedimentos y borosilicato.
- Crisoles refractarios, resistentes a choque térmico y aptos para temperaturas elevadas.
- Mezclador o molino de laboratorio, para homogenizar la mezcla sedimento–borosilicato.

4.4.4. Instrumentos para la caracterización mecánica

- Prensa hidráulica para ensayo de compresión simple, utilizada para determinar la resistencia mecánica del material vitrificado.
- Moldes cilíndricos, para la conformación de probetas vítreas.
- Vernier o micrómetro, para la medición de dimensiones y la verificación geométrica de las probetas.

4.4.5. Materiales utilizados

Se emplearon los siguientes materiales para la ejecución del proceso experimental de muestreo, preparación, vitrificación y caracterización de los sedimentos:

- Sedimentos superficiales recolectados en los Humedales de Ite (1 m), los cuales presentan trazas de relaves con inclusión de metales pesados, principalmente plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo (Cr).
- Arena fina, utilizada como material complementario para homogenización.
- Agregado grueso (grava), empleado para pruebas comparativas y calibración de granulometría.
- Agua destilada, utilizada para el acondicionamiento y lavado del material particulado.
- Malla metálica para tamizado (tamaños estandarizados), empleada para control granulométrico.
- Borosilicato en polvo, utilizado como agente vitrificante.
- Papel aluminio y film plástico, empleados para almacenar y proteger muestras durante la preparación.
- Guantes de látex y mascarillas, como materiales de manipulación segura.
- Balanza digital, para trabajar con las cantidades precisas en la preparación de las probetas.
- Silicona, para fijar los moldes de las probetas en la base de madera.
- Perno metálico de 15 cm, para el consolidado manual con varilla metálica (perno).

4.5. Procedimientos

El presente apartado describe, de manera secuencial y metodológicamente estructurada, los procedimientos aplicados durante la ejecución de la investigación. Estos comprenden: (i) la toma, recolección y acondicionamiento inicial de sedimentos provenientes de los humedales de Ite; (ii) su preparación y

caracterización físico-química conforme a estándares USEPA (USEPA U. S., 2002) e INACAL (INACAL, 2020); (iii) la obtención del precursor silíceo y su integración con un compuesto borosilicatado previamente formulado; (iv) el proceso de vitrificación mediante fusión controlada; y (v) la elaboración de probetas vítreas destinadas a los ensayos mecánicos de compresión simple.

Cada procedimiento se desarrolló siguiendo protocolos validados en investigaciones sobre inmovilización de metales pesados en matrices vítreas, garantizando reproducibilidad, trazabilidad experimental y rigor técnico.

4.5.1. Toma y recolección de muestras de sedimentos

La toma de muestras se realizó siguiendo lineamientos establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, Plataforma del Estado Peruano, 2022) y criterios de muestreo para matrices sólidas contaminadas (USEPA U. S., 2002)

a) Selección de puntos de muestreo

Se seleccionaron tres (03) puntos representativos dentro del humedal, considerando:

- Zonas de acumulación de sólidos por decantación natural.
- Sectores con presencia histórica de metales pesados.
- Gradientes hidrológicos (aguas someras y transición).

En la Figura 6 se observa el punto de muestreo seleccionado dentro del humedal, donde se realizó la extracción manual de sedimentos superficiales utilizando herramientas previamente descontaminadas. Esta fotografía evidencia la ubicación geográfica, las condiciones del terreno y la metodología de muestreo empleada siguiendo los lineamientos de (ANA, Plataforma del Estado Peruano, 2022).

Figura 6:

Toma de muestras superficiales en los humedales de Ite



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

b) Técnica de muestreo

Los sedimentos superficiales (1 m) fueron extraídos mediante:

- Uso de pico de acero inoxidable.
- Pala curva previamente descontaminadas con HNO_3 al 10 % y enjuague con agua desionizada.
- Almacenamiento en bolsas estériles.

La Figura 7 muestra el procedimiento de transferencia del sedimento extraído hacia bolsas estériles rotuladas. Se detalla la manipulación segura, el uso de guantes y la conservación adecuada para evitar alteraciones fisicoquímicas antes del análisis.

Figura 7:

Recolección y almacenamiento de sedimentos en bolsas estériles



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

c) Conservación y transporte

- Los sedimentos se mantuvieron a 4 °C en contenedores isotérmicos.
- El transporte se completó en menos de 12 h para evitar cambios fisicoquímicos.
- Cada muestra fue rotulada con código único, fecha y responsable técnico.

4.5.2. Preparación y caracterización inicial de sedimentos

Los sedimentos recolectados en los humedales de Ite se sometieron a un protocolo estandarizado de preparación física y análisis químico en concordancia con USEPA (USEPA, 1996) y las normas de ensayo de INACAL.

1. **Secado**

   Los sedimentos fueron secados en estufa a 105 °C durante 24 h, con el fin de eliminar humedad superficial.

   En la Figura 8, se aprecia la disposición del horno con las bandejas metálicas con sedimentos previamente extendidos de manera uniforme para garantizar un secado homogéneo. Este proceso permitió eliminar la humedad superficial antes de continuar con el tamizado.

Figura 8:

Secado de sedimentos en estufa a 105 ºC



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

2. **Tamizado y homogenización**

   Posteriormente se tamizaron utilizando una batería de mallas estandarizadas (ASTM E11), seleccionándose la fracción menor a malla Nº 325 (45 µm) para garantizar reactividad uniforme en la vitrificación.

3. **Análisis físico-químico**

   Se determinaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, contenido de humedad, densidad y composición metálica mediante digestión ácida (USEPA, 1996) y análisis por AAS/ICP-OES.

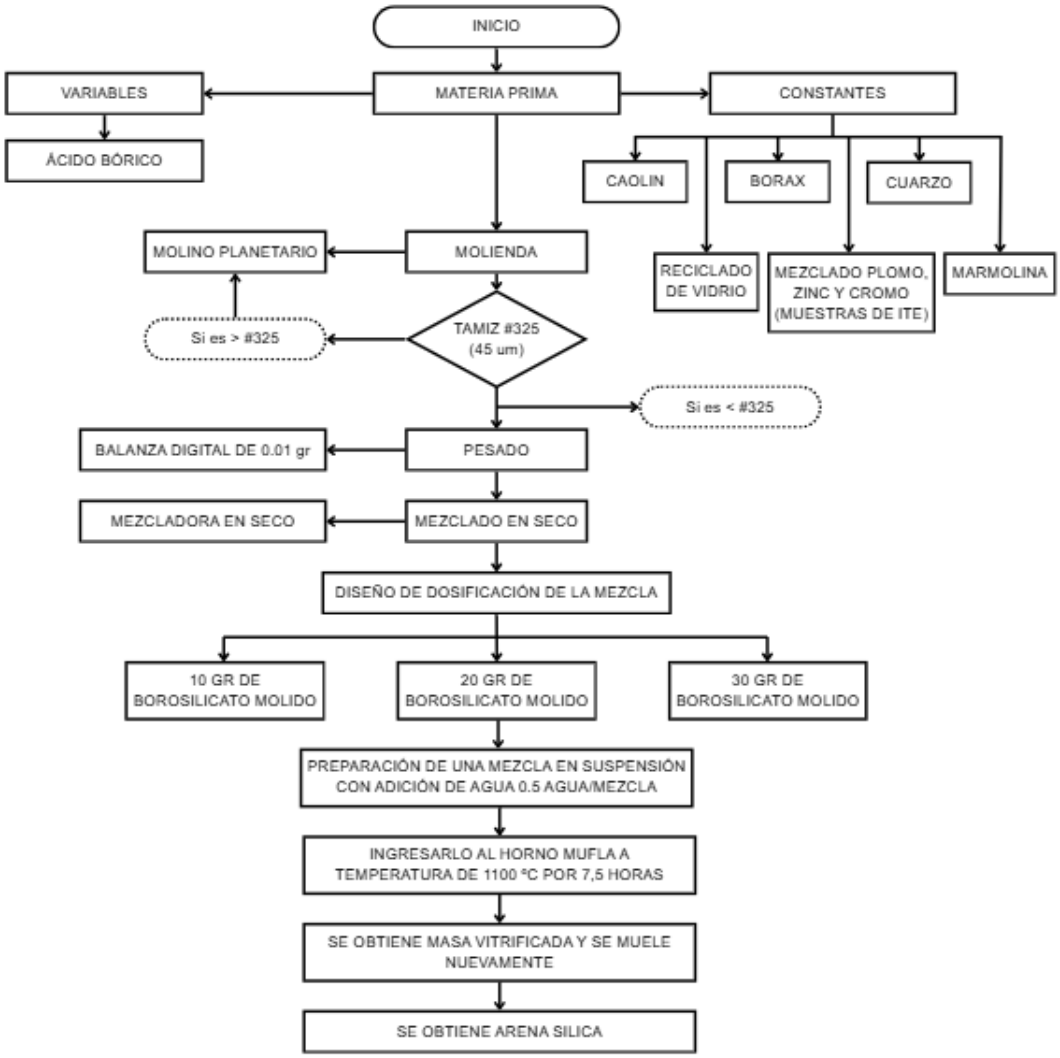
4.5.3. Preparación de arena sílica como precursor del vidrio

La fracción fina de sedimentos fue sometida a un proceso de refinamiento para obtener arena silícea reactiva, siguiendo criterios empleados en la literatura de vitrificación ambiental (Park S. L., 2009).

El procedimiento se presenta en la Figura 9 (Preparación – calcinación – molienda – obtención de arena Sílica) y consistió en:

Figura 9:

Diagrama de flujo del proceso de preparación del borosilicato, calcinación, molienda y obtención de arena sílica con inclusión de plomo, zinc y cromo



Nota: *Elaboración propia*

Tras el proceso descrito en el diagrama de flujo (Figura 9), se llevó a cabo la preparación del material silíceo obtenido a partir de los sedimentos. Esta etapa es esencial para asegurar que el insumo presente las características granulométricas y de pureza necesarias para su incorporación en la mezcla vitrificable junto con el borosilicato.

1. Secado inicial a 105 °C / 24 h.
2. Tamizado a malla Nº 325 (45 µm) para asegurar granulometría fina.
3. Calcinación controlada para eliminar materia orgánica residual y favorecer el incremento de pureza.
4. Molienda mecánica para obtener una distribución granulométrica uniforme.

Esta fracción se empleó como componente silíceo principal para la fabricación del vidrio borosilicatado.

4.5.4. Integración metodológica con el proceso de obtención del compuesto borosilicato

En esta investigación se retoman resultados de una investigación previa (Vera & Lazo, 2020), donde el compuesto borosilicatado fue obtenido en forma de pastillas vítreas, como se muestra en la Figura 10 correspondiente.

El material previamente vitrificado y posteriormente molido se usó como parte del proceso actual, integrándolo con los metales Pb, Zn y Cr, formando una mezcla conjunta para su nueva fusión.

La composición base empleada sigue el diseño químico mostrado en la Tabla 4, que presenta la formulación óptima para compuestos borosilicatados amorfos:

Tabla 4:

Composición de la mezcla más adecuada para elaborar el compuesto de borosilicato

								Complemento			
	100%	**Arcillas**	**Caolín**	**Bórax**	**Ácido bórico**	**Cuarzo**	**Vidrio molido**	**Pigmento amarillo**	**Marmolina blanca**	**Relaves Cr - Pb - Zn**	**Peso seco**
Plastificantes	30%	10g	20g	-	-	-	-		-	-	30
Fundentes	50%	-	-	30g	20g	-	-	-	-	-	50
Desengrasantes	10%	-	-	-	-	4g	6g	-	-	-	10
Colorantes	10%	-	-	-	-	-	-	0.6g	3.4g	6g	10
	100 g										

Nota: *Elaboración propia*

Este diseño considera proporciones de arcillas, caolín, bórax, ácido bórico, cuarzo y vidrio molido, complementados por desengrasantes, colorantes y agentes fundentes, siguiendo metodologías empleadas en cerámica avanzada y vidrios funcionales.

4.5.5. Procedimiento de elaboración del compuesto borosilicatado

El proceso experimental se desarrolló siguiendo las etapas mostradas en la Figura 9, que incluyen:

Antes de ingresar al horno:

(a) mezcla en polvo

(b) colocación en crisol

Se obtiene después de ingresar al horno

(c) obtención de masa vítrea

(d) molienda del vidrio

Figura 10:

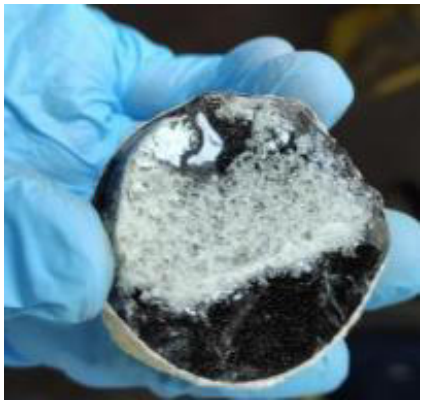
Proceso de elaboración del compuesto de borosilicato

(a) (b)





(c) (d)





Nota: *Evidencia fotográfica recuperada de "*Engobe borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual" (Vera & Lazo, 2020)*, perteneciente al borolisicato con contenido plomo, zinc y cromo, antes y después de la salida del horno.*

Descripción técnica del proceso (según Figura 10):

(a) Se observa el compuesto borosilicatado en estado pulverizado previo a la fusión.

(b) La mezcla es introducida en un crisol refractario y sometida a cocción a 950 °C durante 14 h, formando una matriz vítrea homogénea.

(c) El vidrio se extrae del crisol como una masa sólida y uniforme.

(d) Esta esfera vítrea es molida hasta obtener un polvo gris fino.

La finalidad de integrar esta matriz es evaluar su capacidad de inmovilización y encapsulamiento de metales pesados presentes en los sedimentos, simulando condiciones reales de vitrificación ambiental.

4.5.6. Caracterización del compuesto borosilicatado

Para garantizar que el material vitrificado obtenido a partir de los sedimentos contaminados presenta estabilidad térmica, estructural y mineralógica adecuada para su posterior incorporación como agregado silíceo, se realizaron análisis de caracterización mediante técnicas instrumentales avanzadas. Estas pruebas permiten comprender el comportamiento térmico del material, su estructura cristalina y las transformaciones inducidas durante la calcinación y vitrificación.

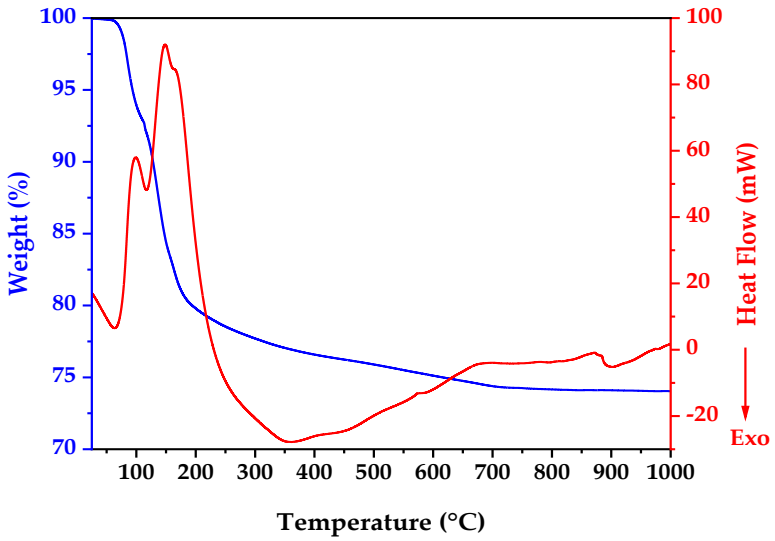
La investigación sobre la inmovilización de metales peligrosos, específicamente plomo (Pb), zinc (Zn) y cromo (Cr), mediante matrices de borosilicato cuenta con antecedentes sólidos en estudios de caracterización química, como los reportados por Radouan (Makhlouk, Beloued, & Aqdim, 2018). Asimismo, la aplicabilidad de estos materiales para su reutilización en recubrimientos sanitarios ha sido demostrada en investigaciones recientes (Vera & Lazo, 2020) (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024). Estos estudios corroboran los hallazgos del artículo “Study of Chromium-Lead-Phosphate Glasses by XRD, IR, Density and Chemical Durability” de Radouan (Makhlouk, Beloued, & Aqdim, 2018), evidenciando la capacidad del borosilicato para inmovilizar de manera estable los metales mencionados, lo que respalda su viabilidad para aplicaciones ambientales y tecnológicas.

En primera instancia, se efectuaron ensayos de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) y Análisis Termogravimétrico (TGA), con el propósito de evaluar los cambios endotérmicos y exotérmicos del material, así como las variaciones en pérdida de masa asociadas a procesos de deshidratación, descomposición o reorganización estructural. Estos resultados permiten verificar que el borosilicato fundido se comporta como un material térmicamente estable dentro del rango operativo previsto para su incorporación en matrices cementicias. Los resultados se muestran en la Figura 11.

En este apartado, se presentan los resultados de la investigación (Vera & Lazo, 2020), en los que se evidencia la caracterización de la materia prima previa al desarrollo de este estudio, demostrando compatibilidad con la inclusión de los elementos cromo, plomo y zinc. A continuación, se enuncia el procedimiento seguido antes y después del ingreso del material al horno mufla.

Figura 11:

Análisis termogravimétricos (TGA) y Calorimetría diferencial de barrido (DSC) del material borosilicatado



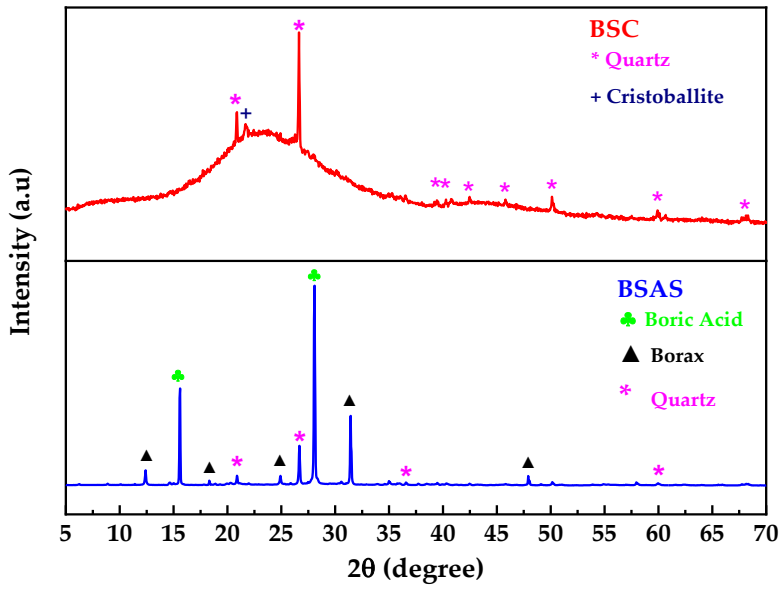
Nota: *Elaboración propia con base en de estudios de borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual* (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024)

Posteriormente, se realizó el análisis de Difracción de Rayos X (XRD), como se observa en la Figura 12, con el objetivo de identificar las fases cristalinas

presentes antes y después del proceso de calcinación. La comparación entre ambos estados permite establecer el grado de amorfización alcanzado durante la vitrificación, así como la presencia de fases silicatadas o boratadas que contribuyan a la inmovilización de metales pesados. El patrón difractométrico obtenido demuestra la transición hacia una estructura predominantemente vítrea, característica deseable para su uso como agregado alternativo.

Figura 12:

Difracción de Rayos X (XRD) del material borosilicatado antes y después de la calcinación



Nota: *Elaboración propia con base en de estudios de borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual* (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024)

El análisis integral de los datos obtenidos permite identificar que el producto final está conformado mayoritariamente por SiB_6 en fase amorfa y dióxido de silicio cristalino tipo cuarzo, resultado que coincide con los patrones observados en el análisis de difracción de rayos X y con la composición elemental determinada posteriormente (Tabla 5). Esta combinación de fases confirma que, durante el proceso de vitrificación, los boratos se integraron parcialmente en la red silicatada, contribuyendo a la inmovilización de los elementos metálicos presentes en los sedimentos.

En cuanto al análisis morfológico, las imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) revelan una evolución significativa en la superficie del material tras la calcinación. La muestra inicial presenta un recubrimiento particulado atribuible a la presencia de ácido bórico y tetraborato de sodio (Figura 13), que se observan como finas partículas adheridas sobre el dióxido de silicio. No obstante, después de 14 horas de tratamiento térmico, la muestra calcinada exhibe una superficie notablemente más uniforme y compacta (Figura 14), lo cual se asocia a la evaporación, fusión o difusión de dichas sales boratadas durante el proceso térmico. Este cambio superficial es consistente con la reducción de elementos volátiles evidenciada en la composición química posterior.

Asimismo, los resultados del análisis químico realizado antes y después de la calcinación muestran una tendencia definida. En la Tabla 5, correspondiente al material previo al tratamiento térmico (BSPP), se identifican componentes característicos de plastificantes, fundentes y desgrasantes, destacando concentraciones iniciales de bórax, ácido bórico y caolín. Tras el proceso de calcinación, la Tabla 6 evidencia la composición del material borosilicatado (BSC), en la cual se observa una disminución significativa en elementos asociados a boratos (B, Na) y una redistribución de los óxidos mayoritarios, lo cual confirma la transformación térmica y la formación del compuesto vítreo final.

Tabla 5:

Composición previa a la calcinación (BSPP)

	Plastificante 30%	**Fundente 50%**	**Desgrasante 10%**	**Colorante 10%**	**Porcentajes 100%**
Arcilla	10 gr				
Caolín	20 gr				
Bórax		30 gr			
Ácido bórico		20 gr			
Cuarzo			4 gr		
Vidrio molido			6 gr		
Pigmento				0.6 gr	
Mamolina Pb, Zn y Cr				9.4 gr	
Peso en gr	30 gr	50 gr	10 gr	10 gr	100 gr

Nota: *Elaboración propia con base en estudios de borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de residuos de ácido bórico* (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024)

Tabla 6:

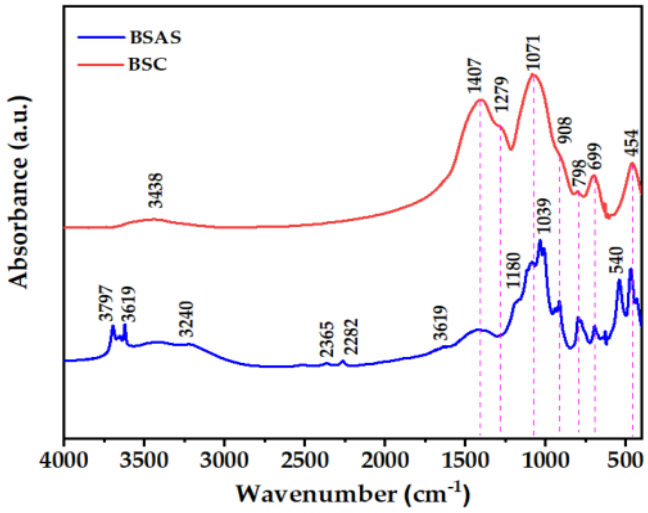
Composición elemental antes y después de la calcinación (BSPP vs BSC)

	Muestra	
Elemento	**BSPP**	**BSC**
B	0.29	0.17
C	12.54	7.71
O	45.86	55.96
Na	0.47	0.12
Mg	0.84	0.8
Al	9.95	6.07
Si	30.05	29.17
Total	100	100

Nota: *Elaboración propia con base en de estudios de borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual* (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024)

Figura 13:

Análisis infrarrojo (FTIR) del material antes y después de la calcinación

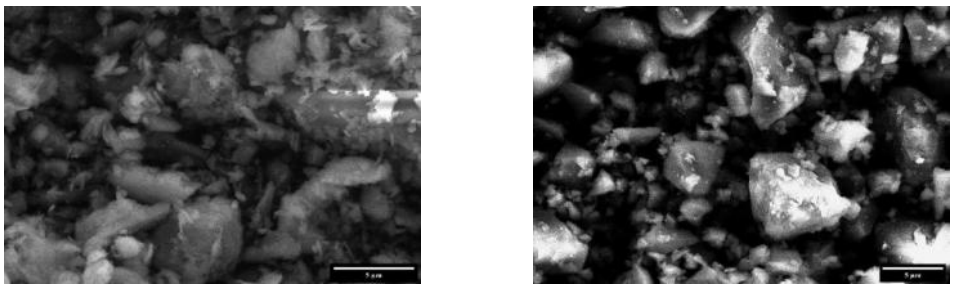


Nota: *Elaboración propia con base en de estudios de borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual* (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024)

Figura 14:

Imágenes de microscopía electrónica de barrido (SEM)

(a) (b)



Nota: *Elaboración propia con base en de Engobe borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual* (Vera, Sacari, & Mangalaraja, Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli, 2023) (Mamani, y otros, 2024). *Donde a) es el material previo a la calcinación (BSPP) y b) el material borosilicatado calcinado (BSC)*

4.5.7. Mezclar sedimento-borosilicato y proceso de vitrificación

Una vez obtenidos los precursores (arena silícea + matriz borosilicatada + metales adicionados), se preparó una mezcla homogénea que fue sometida a vitrificación siguiendo parámetros térmicos recomendados por la literatura (IAEA, International Atomic Energy Agency, 2011) (Park, Min, & Lee, 2009), como se muestra en la Tabla 7 y su explicación gráfica en la Figura 15:

Tabla 7:

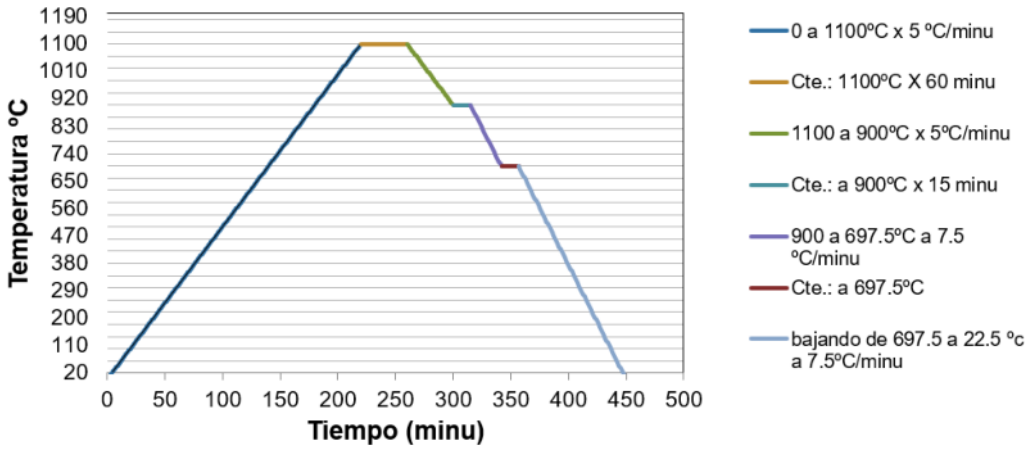
Etapas del proceso de vitrificación

Etapa	Rango térmico	Velocidad	Tiempo de mantenimiento	Observación
Calentamiento inicial	25 – 600 °C	10 °C/min	30 min	Eliminación de agua adsorbida y compuestos volátiles
Fusión intermedia	600 – 1100 °C	10 °C/min	60 min	Formación de la red vítrea borosilicatada
Enfriamiento controlado	1100 – 25 °C	5 °C/min	—	Evita tensiones y cristalización superficial

Nota: *Elaboración propia con base en de Engobe borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual, Scielo.* (Vera & Lazo, 2020)

Figura 15:

Rampa de Calentamiento y Enfriamiento



Nota: *Elaboración basada en literatura (IAEA, International Atomic Energy Agency, 2011) (Park, Min, & Lee, 2009). La rampa depende de la composición efectiva. Los números indicados son propuestos basados en prácticas para borosilicatos amorfos*

Fusión

- Temperatura máxima: 1100 °C
- Tasa de calentamiento: 10 °C/min
- Tiempo de fusión isoterma: 60 min

Enfriamiento controlado

- Descenso gradual de temperatura hasta ambiente para evitar fracturas térmicas y generar una red amorfa estable.

Este tratamiento induce la formación de una matriz vítrea compuesta principalmente por:

- $SiO_2 \approx 68\ \%$
- $B_2O_3 \approx 12\ \%$
- $Na_2O \approx 8\ \%$
- $CaO \approx 6\ \%$

- Trazas inmovilizadas de Pb, Zn y Cr, que representan un 6%

Este resultado fue verificado mediante análisis SEM-EDS, confirmando la integración de los metales dentro de la estructura amorfa sin formación de fases cristalinas residuales. Esto garantiza una alta estabilidad química de la matriz vítrea.

4.5.8. Elaboración de probetas vítreas de borosilicato para el ensayo mecánico

El vidrio borosilicatado obtenido tras el proceso de fusión fue sometido a un proceso de trituración y homogenización para preparar las probetas cilíndricas.

a) Trituración y tamizado

1. La masa vítrea se fragmentó mediante molino mecánico.
2. El material triturado se tamizó, asegurando una granulometría apta para compactación, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16:
Tamizado de material para compactación en moldes cilíndricos



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

b) Pesado y preparación de materiales

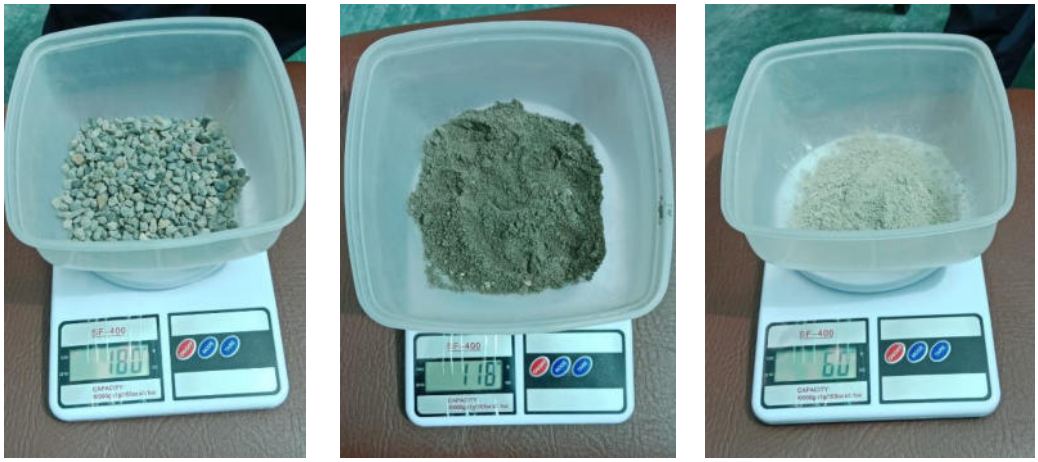
Cada componente (cemento, arena silícea, grava, agua, sedimento y borosilicato) fue pesado con balanza digital de precisión (±0.01 g) y dispuesto en bandejas limpias para evitar contaminación cruzada, como se muestra en la Figura 17. El

borosilicato, previamente molido y tamizado, fue dosificado según las proporciones establecidas en el diseño experimental.

Figura 17:

Pesado individual de materiales y preparación previa a la mezcla

(a) (b) (c)



Nota: *Evidencia fotográfica propia. Donde a) es agregado grueso, b) arena fina y c) cemento, este ultimo va a variar según el gramaje de borosilicato*

Con el fin de garantizar la reproducibilidad de los especímenes preparados, cada componente fue dosificado siguiendo estrictamente las proporciones establecidas en el diseño experimental. La Tabla 8 resume los contenidos exactos de cemento, arena silícea, grava, agua, sedimento contaminado y borosilicato utilizados en cada una de las mezclas formuladas. Esta información permite asegurar la trazabilidad del proceso de armado de probetas y constituye la base para la comparación posterior de los resultados mecánicos y geoquímicos.

Tabla 8:

Contenidos exactos de cada componente para las mezclas experimentales

Código de Probeta	Cemento (gr)	Arena (gr)	Grava (gr)	Agua (gr)	Borosilicato (gr)	Tipo de mezcla
I	60	168	180	75	0	Mezcla patrón
II	41	168	180	75	19	Mezcla modificada
III	41	168	180	75	19	Mezcla modificada
IV	41	168	180	75	19	Mezcla modificada
V	41	143	180	75	44	Mezcla enriquecida
VI	41	143	180	75	44	Mezcla enriquecida

Nota: *Elaboración propia*

c) Homogenización de la mezcla

El polvo se mezcló durante 15 minutos para garantizar uniformidad en distribución química y granulométrica, como se observa en la Figura 18, siguiendo recomendaciones de Park (Park S. L., 2009).

Figura 18:

Homogenización del material



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

d) Compactación en moldes

1. Se usaron moldes cilíndricos metálicos (diámetro 5 cm; altura 10 cm), como se evidencia en la Figura 19.

2. Cada molde se llenó con 488 gr de mezcla.

3. Se aplicó presión entre 10–12 MPa durante 10 minutos para formar pastillas compactas, siguiendo principios utilizados en la elaboración de probetas vítreas (Agency I. A., 2011).

Figura 19:

Compactación de polvo vitreo con agregados en moldes cilíndricos

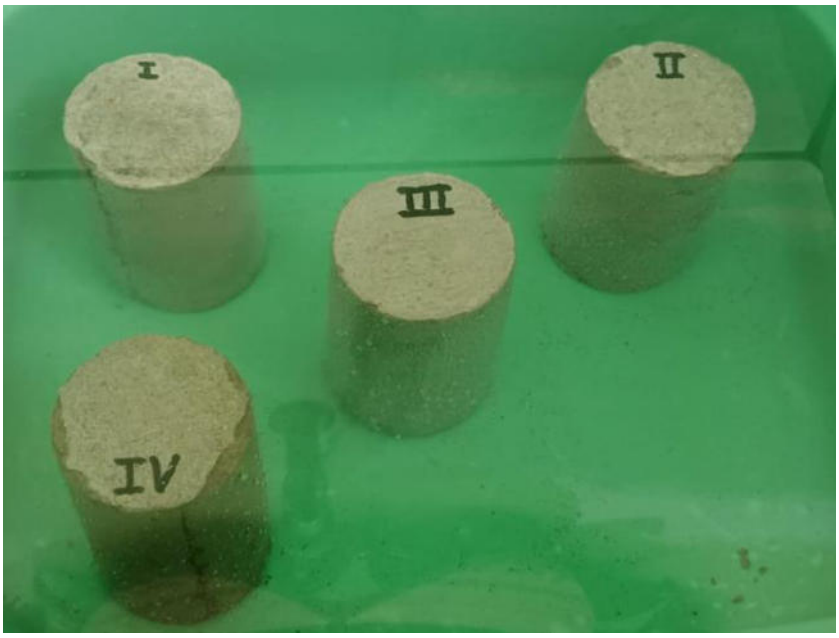


Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

Se aprecia en la Figura 20 el conjunto de probetas cilíndricas en su proceso de curación, las mismas que son empleadas en los ensayos UCS, con superficies uniformes y geometría regular.

Figura 20:

Probetas vítreas en curación para ensayos mecánicos



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

4.5.9. Ensayos mecánicos de resistencia a compresión simple (UCS)

Los ensayos de resistencia mecánica se realizaron para evaluar la integridad estructural del material vítreo resultante, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C39 adaptada para materiales no cementicios.

a) Preparación de probetas

- Las probetas compactadas fueron curadas a temperatura ambiente por 24 h, como se mostró en la Figura 20.
- Se verificaron dimensiones usando vernier digital con precisión de 0.01 mm.
- La relación altura/diámetro se mantuvo entre 1.8 y 2.0, como recomienda ASTM.

b) Configuración del equipo

Se empleó una prensa hidráulica con capacidad de 50 toneladas, calibrada según requisitos de INACAL, como se muestra en la Figura 21.

Figura 21:
Configuración de prensa hidráulica para el ensayo UCS



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

Parámetros del ensayo:

- Velocidad de carga: 0.25 MPa/s
- Carga aplicada hasta la rotura
- Registro de esfuerzo máximo (σmáx)

c) Cálculo de resistencia UCS

El esfuerzo máximo se calculó mediante la ecuación estándar:

$$\sigma_{UCS} = \frac{F}{A}$$

donde:

F: carga última aplicada (N)

A: área de la sección transversal de la probeta (mm²)

d) Registro y análisis

- Cada ensayo fue repetido por lo menos dos veces por lote, indistinto de la probeta muestra, evidencia de ensayo realizado y resultado se observa en la Figura 22.

Figura 22:

Ruptura controlada de la probeta durante el UCS



Nota: *Evidencia fotográfica propia.*

- Se promediaron los valores y se calcularon desviaciones estándar.

4.6. Análisis de Datos

En esta sección se interpretan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión simple (UCS) aplicados al material vitrificado y posteriormente incorporado en probetas de concreto, utilizando tres niveles de contenido de borosilicato: 0 g (mezcla patrón), 19 g (mezcla modificada) y 44 g (mezcla enriquecida).

El análisis permite evaluar:

- El comportamiento mecánico del material cimentante obtenido por vitrificación.
- La influencia del contenido de borosilicato sobre la resistencia última y el tipo de fractura.
- La viabilidad del material como grava o arena silícea apta para aplicaciones de ingeniería civil o minera.

Los resultados se interpretan en función de los objetivos de la tesis, enfatizando la viabilidad técnica del uso del borosilicato vitrificado como parte de la mezcla cementante, así como su capacidad de inmovilizar trazas de cromo, plomo y zinc presentes en los sedimentos de origen.

4.6.1. Resultados de resistencia a compresión

A. Presentación general de los datos

A continuación, en la Tabla 9 se presenta el consolidado de todos los valores obtenidos durante los ensayos UCS. Esta tabla constituye la base para los cálculos posteriores y permite observar el efecto directo de cada nivel de incorporación de borosilicato (0 g, 19 g y 44 g) sobre la resistencia del material.

Tabla 9:

Resultados de UCS según porcentaje de borosilicato

Mezcla	Código	Edad (días)	Diámetro (mm)	Área (mm^2)	Carga (kgf)	f'c (kgf/cm^2)	Tipo de fractura
Control 0%	I	28	51.2	2056	1470	71.5	5
10% borosilicato	II	28	51.3	2067	2230	107.9	5
10% borosilicato	III	28	51.3	2070	2756	133.1	5
10% borosilicato	IV	28	51.2	2061	2335	113.3	5
20% borosilicato	V	29	51.2	2055	832	40.5	3
20% borosilicato	VI	29	51.2	2060	1414	68.6	3

Nota: *Elaboración propia*

4.6.2. Análisis estadístico

El análisis estadístico básico permite identificar patrones de comportamiento por tipo de mezcla, reduciendo la variabilidad individual de cada probeta. De esta manera, se obtiene un valor promedio representativo para evaluar la resistencia global asociada a cada nivel de incorporación de borosilicato (0 g, 19 g y 44 g), como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10:

Promedios de resistencia por tipo de mezcla

Mezcla	n	f'c promedio (kgf/cm^2)
Control (0 g)	1	71.5
Mezcla modificada (19 g)	2	118.1
Mezcla enriquecida (44 g)	3	54.55

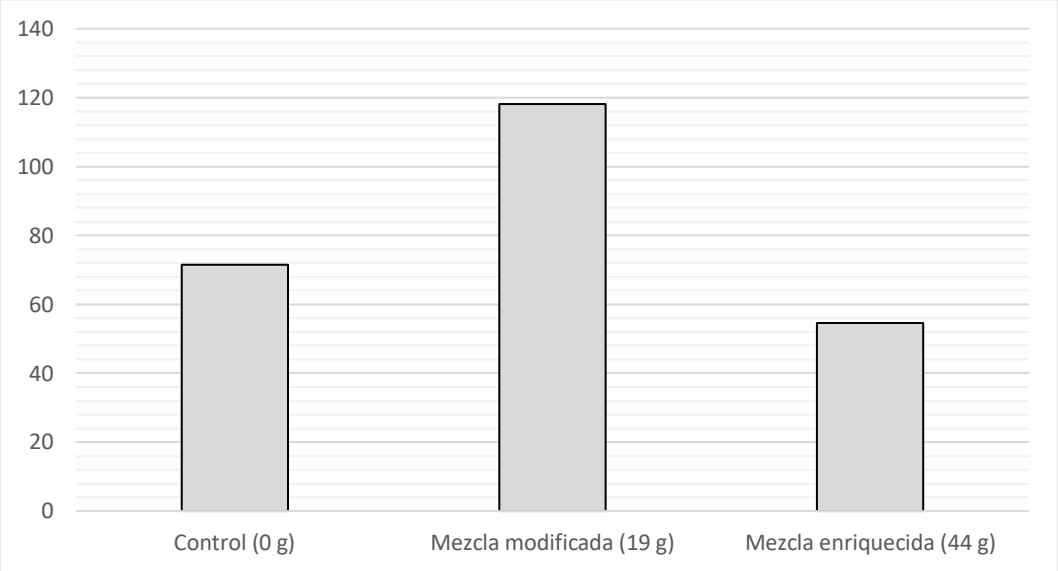
Nota: *Elaboración propia*

4.6.3. Gráfico comparativo de resistencias

Con la finalidad de visualizar de forma clara el efecto del borosilicato sobre la resistencia del material vitrificado, se presenta un gráfico comparativo. Este recurso (Figura 23) visual facilita la identificación de tendencias y diferencias marcadas entre las tres configuraciones estudiadas.

Figura 23:

Comparación de resistencia promedio según porcentaje de borosilicato



Nota: *Elaboración propia*

4.6.4. Interpretación de resultados

Una vez organizados los valores experimentales obtenidos en los ensayos UCS, se procede a interpretar el comportamiento mecánico de cada tipo de mezcla, relacionando la resistencia alcanzada con la estructura interna del material vitrificado, el tipo de fractura observado y la influencia de los niveles de incorporación de borosilicato (0 g, 19 g y 44 g).

A. Mezcla patrón (0 g de borosilicato)

La mezcla sin incorporación de borosilicato alcanzó una resistencia de 71.5 kgf/cm² (7.0 MPa), correspondiente a un material cementante de baja capacidad estructural.

La fractura tipo 5 (cono y corte) evidencia un comportamiento mecánico predecible, pero con cohesión limitada y alta susceptibilidad a concentración de esfuerzos.

Este valor constituye la línea base para determinar el efecto de la incorporación del borosilicato en la microestructura del material.

B. Mezcla modificada (19 g de borosilicato)

La mezcla con 19 g presentó un incremento considerable de resistencia, con valores experimentales entre:

- 107.9 kgf/cm² (10.6 MPa)
- 133.1 kgf/cm² (13.1 MPa)
- 113.3 kgf/cm² (11.3 MPa)

Promedio: 118.1 kgf/cm² (11.67 MPa).

Incremento relativo respecto a la mezcla patrón:

$$\Delta f_c = \frac{11.67 - 7.0}{7.0} x100 = 66.7\%$$

La mejora se asocia a:

- Mayor densificación de la matriz vitrificada.
- Reducción de la porosidad del material.
- Incremento de la adherencia entre partículas.
- Integración más eficiente del contenido metálico inmovilizado.

Todas las probetas presentaron fractura tipo 5, indicando una estructura homogénea y estable bajo carga.

C. Mezcla enriquecida (44 g de borosilicato)

La mezcla con 44 g mostró una disminución significativa de resistencia, con valores entre:

- kgf/cm² (0.44 MPa)
- 68.6 kgf/cm² (6.7 MPa)

Promedio: 54.55 kgf/cm² (5.35 MPa).

Este comportamiento, contrario al esperado, se explica por:

- Exceso de fase vítrea que genera superficies frágiles.
- Posible microfisuración interna por choque térmico durante la vitrificación.
- Reducción de la cohesión entre partículas.

La fractura tipo 3 (fisuramiento longitudinal) confirma un comportamiento frágil y poco estable.

4.6.5. Evaluación de la aptitud del material para aplicaciones de ingeniería

Con base en criterios técnicos y normativos de materiales no estructurales, se evaluó si los productos vitrificados pueden emplearse como agregados alternativos.

Conclusiones técnicas:

- Mezcla modificada (19 g)
  Presenta resistencia adecuada para material estabilizado, rellenos controlados, solados, subbases granulares no estructurales y aplicaciones civiles o mineras que no requieran soporte estructural directo.
  Es la mezcla más eficiente y mecánicamente estable.
- Mezcla enriquecida (44 g)
  Presenta comportamiento mecánico marginal.
  Su uso se limita a rellenos ligeros, coberturas o fines de disposición segura del material vitrificado.
- Mezcla patrón (0 g)
  No cumple los requisitos mínimos para aplicaciones de ingeniería relevantes.

4.6.6. Relación con los objetivos planteados

Finalmente, se establece la conexión directa entre los hallazgos experimentales y los objetivos planteados al inicio de la investigación.

Resultados vinculados a los objetivos:

- Objetivo 1: Inmovilizar metales mediante vitrificación
  El comportamiento mecánico y la estructura vítrea consolidada indican una inmovilización eficiente de Pb, Zn y Cr, especialmente en la mezcla modificada.
- Objetivo 2: Obtener un material reutilizable
  La mezcla con 19 g cumple los criterios de resistencia, estabilidad y aplicabilidad técnica, constituyendo el nivel óptimo de reutilización.

- Objetivo 3: Evaluar la viabilidad del material para aplicaciones constructivas

  Los resultados confirman que la mezcla con 19 g es la condición óptima, al combinar resistencia, cohesión y un patrón de fractura consistente.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente capítulo integra e interpreta los principales hallazgos obtenidos en los análisis fisicoquímicos de los sedimentos de los humedales de Ite y en los ensayos mecánicos de las probetas vitrificadas con borosilicato. Más que describir nuevamente los valores presentados en el capítulo anterior, esta sección se centra en explicar el significado técnico, las tendencias observadas y su relación con los objetivos de la investigación.

5.1. Comportamiento fisicoquímico de los sedimentos contaminados

Los resultados analizados previamente permitieron caracterizar la composición y condiciones ambientales de los sedimentos. En esta sección se discuten sus implicancias para la selección y desempeño de la técnica de vitrificación.

5.1.1. pH, conductividad y acidez

Los parámetros fisicoquímicos evidenciaron características típicas de sedimentos impactados por actividades minero-metalúrgicas: valores de pH ligeramente ácidos, niveles elevados de conductividad eléctrica y una acidez que favorece la solubilidad de metales.

Estas condiciones aumentan la movilidad de elementos potencialmente tóxicos, como Pb, Zn y Cr, justificando la necesidad de un proceso de estabilización permanente como la vitrificación.

La tendencia observada confirma que los sedimentos mantienen condiciones químicas que facilitan la liberación de contaminantes, especialmente bajo procesos de remoción o erosión. Esto refuerza el enfoque de la investigación: no basta con contener el material, sino transformarlo en una matriz estable e inertizada.

5.1.2. Contenido de metales pesados y su implicancia ambiental

Los resultados muestran concentraciones superiores a estándares ambientales para diversos metales de interés, lo cual representa un riesgo significativo para la biota, la cadena trófica y la calidad del agua del humedal.

La vitrificación con borosilicato se plantea entonces no solo como un método de tratamiento, sino como una solución de remediación de largo plazo, debido a su

capacidad de encapsular químicamente los metales dentro de una estructura vítrea estable, reduciendo su lixiviabilidad incluso bajo condiciones ambientales variables.

5.2. Resultados de las probetas vitrificadas y su discusión técnica

Los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial permitieron evaluar el efecto del borosilicato como fundente en la calidad mecánica del sólido vitrificado. Los valores numéricos fueron ya presentados en la sección “Análisis de Datos”; aquí se interpreta el comportamiento observado.

5.2.1. Efecto del borosilicato en el desempeño mecánico

El incremento significativo de resistencia en la mezcla con 19 g de borosilicato indica que esta dosis permite:

- Mayor densificación del material durante la fusión.
- Menor porosidad en el sólido final.
- Formación de una red vítrea más homogénea.
- Integración eficiente de los metales inmovilizados (Pb, Zn, Cr).

El valor obtenido supera claramente a la mezcla patrón (0 g), validando la hipótesis de que el borosilicato mejora la consolidación de matrices con alto contenido mineral y metálico, como los sedimentos contaminados.

Por el contrario, la mezcla con 44 g de borosilicato mostró una reducción notoria en la resistencia. Esta tendencia inversa sugiere que un exceso de fundente puede originar:

- Sobrefusión del material.
- Contracciones diferenciales durante el enfriamiento.
- Formación de microfracturas internas.
- Exceso de fases amorfas con baja contribución mecánica.

Estos resultados permiten identificar un límite de eficiencia del borosilicato: agregar más fundente no necesariamente mejora las propiedades mecánicas.

5.2.2. Interpretación microestructural preliminar

Aunque no se realizaron análisis microscópicos en esta etapa, la respuesta mecánica observada permite inferir lo siguiente:

- Con 19 g, la fase vítrea alcanza un equilibrio adecuado entre componentes cristalinos y amorfos, otorgando rigidez y estabilidad.
- Con 44 g, la matriz se vuelve más frágil debido al predominio de zonas altamente vidriadas pero internamente tensas, propensas a microfisuras.

Esta interpretación coincide con estudios internacionales que indican la existencia de un rango óptimo de fundentes para residuos industriales y sedimentos contaminados.

5.2.3. Implicancias para la revalorización y uso del material vitrificado

La mezcla con 19 g de borosilicato no solo estabilizó los metales presentes, sino que generó un material con resistencia suficiente para:

- Bloques de relleno no estructural
- Elementos de confinamiento
- Uso como agregado vitrificado artificial
- Solados y rellenos controlados

El proceso permite transformar un residuo contaminado en un material inertizado y utilizable, contribuyendo al enfoque de economía circular.

5.3. Relación entre parámetros ambientales y comportamiento de vitrificación

Al relacionar ambos grupos de resultados, se observa que:

- La acidez y conductividad influyen directamente en la fusión, al modificar la química de los óxidos presentes.
- El borosilicato actúa como estabilizador de estos óxidos, generando fases resistentes a la lixiviación.
- La vitrificación es especialmente eficiente en matrices con sulfatos y cloruros, los cuales se incorporan a la red vítrea o volatilizan bajo condiciones controladas.

Este análisis integrado demuestra que los sedimentos de Ite son aptos para vitrificación y que el proceso es técnica y ambientalmente justificable.

5.4. Síntesis del comportamiento general

- La caracterización fisicoquímica confirmó condiciones que favorecen la movilidad de metales pesados.
- La vitrificación con borosilicato reduce este riesgo y transforma el sedimento en un sólido estable.
- El nivel óptimo evaluado es 19 g de borosilicato.
- Por encima de este valor (44 g), la resistencia disminuye por inestabilidad microestructural.
- Los resultados validan la hipótesis del estudio y demuestran la viabilidad técnica del producto vitrificado.

VI. CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó la aplicación de la vitrificación con borosilicato como alternativa para la inmovilización de metales pesados presentes en los sedimentos contaminados de los humedales de Ite, así como la posibilidad de reincorporar el material vitrificado en matrices cementicias como insumo para la obtención de agregados alternativos. A partir de los resultados obtenidos, se establecen las siguientes conclusiones:

- La caracterización físico-química de los sedimentos de los humedales de Ite evidenció condiciones de acidez moderada y elevada conductividad, asociadas a procesos de drenaje ácido y acumulación de sales, como se observa en las Figuras 11, 12, 13 y 14 del Capítulo IV. Asimismo, las concentraciones de Pb, Zn y Cr, superaron en varios casos los valores de referencia ambiental, confirmando un riesgo potencial para los ecosistemas y justificando la aplicación de un proceso de inmovilización y estabilización. Este diagnóstico demuestra que los sedimentos presentan una carga significativa de contaminantes y que su tratamiento mediante vitrificación es técnica y ambientalmente pertinente.

- El proceso experimental de vitrificación con borosilicato permitió transformar los sedimentos contaminados en un material vítreo estable, reduciendo de manera significativa la movilidad potencial de los metales pesados. Las observaciones físico-visuales (Figura 10) y el estado final del material vitrificado (Figura 15) muestran una fusión homogénea y la formación de redes silicato–bóricas continuas, lo que confirma la correcta incorporación del borosilicato como agente inmovilizante. La estructura generada es consistente con materiales vítreos reportados en la literatura, respaldando la eficiencia del método y su potencial para reducir el riesgo ambiental asociado a estos sedimentos.

- El análisis mecánico de las probetas con incorporación del material vitrificado como agregado fino confirma que el compuesto posee una capacidad portante adecuada para aplicaciones no estructurales. En particular, su uso es técnicamente viable en revestimientos para pavimentos y elementos prefabricados de baja carga. Asimismo, el desempeño puede optimizarse cuando el borosilicato actúa como fase

cementante activa y no solo como material inerte, dependiendo de la dosificación aplicada. Los resultados obtenidos (Figura 23) demuestran que la mezcla con 19 g de borosilicato alcanzó el mejor comportamiento mecánico, superando tanto a la mezcla control (0 g) como a la mezcla enriquecida (44 g). Este comportamiento valida su potencial como componente alternativo en concretos destinados a revestimientos, solados y rellenos controlados, confirmando la viabilidad técnica de valorizar el material vitrificado como un agregado sostenible.

VII. RECOMENDACIONES

7.1. Para la gestión ambiental de los humedales de Ite

- Ampliar la caracterización espacial y temporal de los sedimentos, incorporando muestreos a diferentes profundidades y campañas en distintas épocas del año, a fin de obtener una visión más representativa de la dinámica geoquímica del ecosistema.
- Implementar un programa de monitoreo continuo de metales pesados (Pb, Zn, Cr) en agua y sedimentos, priorizando las zonas con mayor acumulación identificadas en este estudio.
- Evaluar la integración del proceso de vitrificación en planes de remediación ambiental existentes, especialmente en áreas donde las concentraciones superan los estándares de calidad ambiental o valores guía aplicables.

7.2. Para optimizar el proceso de vitrificación con borosilicato

- Realizar ensayos experimentales variando rampas de calentamiento, tiempos de residencia y atmósferas de fusión, con el fin de mejorar la homogeneidad estructural del vidrio y reducir el consumo energético.
- Profundizar el análisis microestructural mediante técnicas como SEM–EDS de alta resolución, FTIR, cuantificación Rietveld por XRD y TGA/DSC, lo que permitirá comprender con mayor precisión los mecanismos de inmovilización de metales.
- Evaluar nuevas proporciones y formulaciones de borosilicato, buscando maximizar la estabilidad química y estructural del material sin comprometer la eficiencia térmica del proceso.

7.3. Para valorización del material vitrificado en aplicaciones de construcción

- Ampliar los ensayos mecánicos incorporando pruebas de densidad, absorción, durabilidad, abrasión y ciclos térmicos, para determinar su desempeño bajo condiciones operativas reales.
- Desarrollar mezclas cementicias con diferentes proporciones de agregado vitrificado (10 g, 20 g, 30 g, 40 g, 50 g) identificando el rango óptimo de sustitución en matrices constructivas.

- Ejecutar ensayos piloto en campo para validar el uso del material en losetas, bloques no estructurales, rellenos controlados y morteros de uso general.
- Realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) que permita comparar el impacto ambiental del vidrio vitrificado frente a agregados convencionales y sustentar su incorporación dentro de iniciativas de economía circular.

7.4. Para futuras investigaciones

- Evaluar la lixiviabilidad del vidrio borosilicatado a largo plazo bajo condiciones ambientales reales (inmersión, intemperismo, pH variable) para asegurar su estabilidad química.
- Explorar la incorporación de otros residuos industriales (vidrios rotos, cenizas, arenas residuales, lodos) que puedan mejorar la fusión o reducir los costos de producción del material vitrificado.
- Comparar la vitrificación con otras tecnologías de inmovilización (solidificación/estabilización, encapsulamiento en matrices cementicias, geoestabilización, polímeros), identificando ventajas técnicas y económicas para su aplicación en el contexto minero peruano.
- Desarrollar prototipos y validaciones técnicas de materiales constructivos que integren el producto vitrificado, promoviendo su adopción industrial y su contribución a la construcción sostenible.

VIII. REFERENCIAS

AENOR. (2018). *Asociación Española de Normalización.* Obtenido de Asociación Española de Normalización: https://www.normadoc.com/media/preview_pdf/ESN0060086.pdf

Agency, I. A. (2011). *International Atomic Energy Agency*. Obtenido de International Atomic Energy Agency: https://www.iaea.org/publications/12257/status-and-trends-in-spent-fuel-and-radioactive-waste-management

Agency, U. S. (1996). *United States Environmental Protection Agency*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: https://www.epa.gov/esam/method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils

ANA, A. N. (2022). *Plataforma del Estado Peruano.* Obtenido de Plataforma del Estado Peruano: https://www.ana.gob.pe/publicaciones/protocolo-nacional-para-el-monitoreo-de-la-calidad-de-los-recursos-hidricos-0

ANA, A. N. (2023). *Autoridad Nacional del Agua.* Obtenido de Autoridad Nacional del Agua: https://www.ana.gob.pe/observatorio/monitoreo-de-calidad-del-agua

Andrades, M. S. (2015). étodos electroquímicos aplicados a la evaluación ambiental: pH y conductividad en medios naturales. . *Revista de Química y Sociedad*, 55-62.

Andreu, V. &. (2002). Procedimientos para el muestreo y análisis de sedimentos contaminados. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. En V. &. Andreu, *Procedimientos para el muestreo y análisis de sedimentos contaminados. Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente.*

Bernal, G. &. (1996). Sedimentología de lagunas costeras: Ciénaga Grande de Santa Marta y Ciénaga de Pajarales. *Boletín Investigación Marina y Costera*, 25,49-76. Obtenido de https://cgsm.cemarin.org/tipodoc/articulo-de-revista-academica/bernal-g-betancur-j-1996a-sedimentologia-de-lagunas-costeras-cienaga-grande-de-santa-marta-y-cienaga-de-pajarales/

Bremner, J. M. (2009). Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *Journal of Agricultural Science*, 257-268.

Castañeda, H., Gonzalez, E., Gonzales, J., & Uribe, M. (2023). Obtención de un material vítreo utilizando residuos industriales mediante tratamiento térmico para su aplicación como agregado de construcción. *Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 41.

CCME, C. C. (2001). *Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.* Obtenido de Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.: https://ccme.ca/en/res/protocol-for-the-derivation-of-canadian-sediment-quality-guidelines-for-the-protection-of-aquatic-life-en.pdf?utm_source=chatgpt.com

DIGESA, D. G. (2003). *Dirección General de Salud Ambiental.* Obtenido de Dirección General de Salud Ambiental: https://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones.asp

DIGESA, D. G. (2022). *Dirección General de Salud Ambiental.* Obtenido de Dirección General de Salud Ambiental: https://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones.asp

ES2969573T3. (2020). *PATENT.* Obtenido de PATENT: https://patents.google.com/patent/ES2969573T3/es

Fernández, L. W. (2011). Estudio de la Contaminación por Metales Ecotóxicos. *Ciencia & Desarrollo*, 28-35.

Gambini, A. (2021). *Universidad cientifica del sur.* Obtenido de Universidad cientifica del sur: https://repositorio.cientifica.edu.pe/handle/20.500.12805/1478

Gilabert de Brito, J. &. (1990). Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad: Manual de métodos y procedimientos de referencia. *Fondo Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias.*

Hernández Sampieri, R. F. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). En R. F. Hernández Sampieri, *Metodología de la investigación (6.ª ed.).*

IAEA, I. A. (2011). *IAEA*. Obtenido de IAEA: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf

IAEA, I. A. (2011). *International Atomic Energy Agency.* Obtenido de International Atomic Energy Agency: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf

INACAL, I. N. (2020). *Plataforma del Estado Peruano.* Obtenido de Plataforma del Estado Peruano: https://www.gob.pe/institucion/inacal/noticias/1263110-inacal-aprueba-23-normas-tecnicas-para-fortalecer-la-calidad-en-sectores-productivos-y-estrategicos-del-pais

Kim, S., & Lee, S. (2017). Vitrification technologies for hazardous waste treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 321, 1–12.

Kumada, T., Takahashi, Y., & Kawamoto, K. (2015). Glass-ceramic production from industrial waste using borosilicate vitrification. *Ceramics International Elsevier*, 41(2), 2621–2628. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884214015727?via%3Dihub

Makhlouk, R., Beloued, N., & Aqdim, D. (2018). *ResearchGate.* Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/326035842_Study_of_Chromium-Lead-Phosphate_Glasses_by_XRD_IR_Density_and_Chemical_Durability#:~:text=They%20are%20heated%20to%20300,The

Mamani, E., Vera, B., Huillca, J., Chacaltana, J., Polo, C., Nina, H., . . . Sacari, E. (2024). Efectos del dopaje de Cr 3+ sobre las características estructurales, ópticas y morfológicas de las nanopartículas de BaTiO 3 y su comportamiento bioactivo. *Crystals*, 1-19.

Mendoza Huamán, A. C. (2023). *Redalyc.* Obtenido de Redalyc: https://www.redalyc.org/journal/5722/572264291010

MINAM. (2021). *Ministerio del Ambiente*. Obtenido de Ministerio del Ambiente: https://sinia.minam.gob.pe/

MINAM, M. d. (2020). *Plataforma del Estado Peruano*. Obtenido de Plataforma del Estado Peruano: https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1138723-minam-crea-la-linea-base-ambiental-publica-para-fortalecer-la-gestion-ambiental

MINAM, M. d. (2024). *MINAM.* Obtenido de MINAM: https://sinia.minam.gob.pe/estudios/linea-base-ambiental-ipam

MINEM, M. d. (2024). *MINEM.* Obtenido de MINEM: https://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=10335

MINEM, M. d. (2024). *Plataforma del Estado Peruano*. Obtenido de Plataforma del Estado Peruano: https://www.gob.pe/institucion/minem/colecciones/24670-inventario-de-pasivos-ambientales-mineros

Park, S. L. (2009). *ScienciaDirect*. Obtenido de ScienciaDirect: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389409002451

Park, S., Min, S., & Lee, G. (2009). Vitrification of hazardous waste using borosilicate matrices. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1–3), 761–768.

Ruiz Román, K. L. (2018). *UCE Quito.* Obtenido de UCE Quito: https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/15362

Salinas Gonzales, Y. M. (2023). Vitrificación de relaves mineros mediante el uso de vidrio reciclado como técnica de remediación ambiental. *Revista Ingenía UNS*, https://revistas.uns.edu.pe/index.php/ingenieria/article/view/2665.

Susunaga, M., Estévez, B., & Susunaga, R. (2020). Características de la arena sílica de Alvarado, Veracruz, México, como material para barreras reactivas permeables, para la remediación de acuíferos contaminados con lixiviados de basureros no controlados. *Enfoque UTE Revista*, 87-100.

Tacna, G. R. (2023). *Gobierno Regional de Tacna.* Obtenido de Gobierno Regional de Tacna: https://www.regiontacna.gob.pe/informacion_ambiental.html

Tamayo y Tamayo, M. (2011). El proceso de investigación científica (6.ª ed.). En M. Tamayo y Tamayo, *El proceso de investigación científica (6.ª ed.).*

USEPA. (1996). *Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*. Obtenido de Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos: https://search.epa.gov/epasearch/?querytext=Method+3050B%3A+Acid+digestion+of+sediments%2C+sludges%2C+and+soils.&areaname=&areacontacts=&areasearchurl=&typeofsearch=epa&result_template=&referer=https%3A%2F%2Fwww.epa.gov%2Fhome%2Fpage-not-found#/

USEPA, U. S. (2002). *United States Environmental Protection Agency.* Obtenido de United States Environmental Protection Agency: https://www-epa-gov.translate.goog/hw-sw846/sampling?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Vera, B., & Lazo, L. (2020). Engobe borosilicatado como recubrimiento impermeable en mobiliario sanitario obtenido de altas concentraciones de ácido bórico residual. *Scielo*, 125-138.

Vera, B., Sacari, E., & Mangalaraja, V. y. (2023). *Síntesis, caracterización y eficacia antibacteriana del compuesto de borosilicato contra Escherichia coli*. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/index.php/Record/UNAM_3740e4c93b3466fc0742ec10e48ec576

Zagal, E. &. (2007). *Universidad de Concepción.* Obtenido de Universidad de Concepción: https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/METODOS_LODOS_SUELOS.pdf

IX. ANEXOS

ANEXO 1.

Presupuesto de tesis

El presente anexo detalla los costos asociados a la ejecución de tesis, considerando actividades de muestreo, caracterización físico-química, procesos de inmovilización vítrea con borosilicato, ensayos mecánicos de las probetas obtenidas y los aspectos logísticos necesarios para completar la investigación.

1. Costos de trabajo de campo

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Traslado a humedales de Ite	2 salidas	120.00	240.00
Alimentación y estadía	2 días	200.00	400.00
Materiales de muestreo (palas, bolsas, baldes, etiquetas)	1 kit	150.00	150.00
Total trabajo de campo			**790.00**

2. Costos de laboratorio – preparación y caracterización de sedimentos

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Secado de muestras (estufa)	6 muestras	20.00	120.00
Tamizado y homogenización	6 muestras	10.00	60.00
Análisis físico-químicos (pH, CE, humedad, densidad)	6 muestras	35.00	210.00
Digestión USEPA 3050B	6 muestras	45.00	270.00
Análisis de metales por absorción atómica	6 muestras	65.00	390.00
Total laboratorio – caracterización			**1,050.00**

3. Costos de insumos para vitrificación

Insumo	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Borosilicato de sodio	2 kg	95.00	190.00
Fundente (carbonato de sodio)	1 kg	25.00	25.00
Moldes refractarios	4 unidades	30.00	120.00
Energía para horno (3 h × 3 ciclos)	9 h	15.00	135.00
Termopares y guantes térmicos	1 kit	45.00	45.00
Total insumos vitrificación			**515.00**

4. Costos de ensayos mecánicos – compresión de probetas vitrificadas

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Preparación y curado de probetas	3 lotes	35.00	105.00
Ensayo de compresión simple (UCS)	6 probetas	15.00	90.00
Registro y análisis de resultados	1 servicio	60.00	60.00
Total ensayos de compresión			**255.00**

5. Costos administrativos y logísticos

Concepto	Cantidad	Costo unitario (S/.)	Subtotal (S/.)
Impresiones, encuadernados y reportes	3 lotes	60.00	180.00
Transporte local / movilidad	1 mes	150.00	150.00
Total administrativo			**330.00**

6. Resumen de presupuesto

Categoría	Monto (S/.)
Trabajo de campo	790.00
Laboratorio – caracterización	1,050.00
Insumos de vitrificación	515.00
Ensayos de compresión	255.00
Administrativos	330.00
TOTAL GENERAL	**2,940.00**

ANEXO 2.

Registro Fotográfico de Instrumentos Utilizados

A continuación, se presenta el registro fotográfico correspondiente a los instrumentos de campo, equipos de laboratorio y maquinaria utilizada durante la ejecución del presente estudio. Las imágenes documentan las actividades de muestreo, análisis físico-químico, proceso de vitrificación en borosilicato y ensayos mecánicos realizados a las probetas.

A. Instrumentos de campo

Figura A1. *Lampa curva y pico utilizados para la extracción de sedimentos superficiales (1 m).*



Figura A2. *Bolsas y contenedores estériles de polietileno para el almacenamiento y conservación de muestras.*



Figura A3. *Etiquetas codificadas y fichas de campo empleadas para la trazabilidad de cada unidad de muestreo.*



B. Equipos para análisis físico-químico

Figura B1. *pH-metro digital calibrado según estándares INACAL.*



Figura B2. *Conductímetro para la medición de conductividad eléctrica y salinidad.*



Figura B3. *Balanza analítica de precisión utilizada en la preparación de muestras.*



Figura B4. *Juego de tamices estandarizados para granulometría y homogenización.*



Figura B5. *Material de vidrio de laboratorio (beakers, probetas, pipetas y matraces aforados).*



C. Equipos para vitrificación en borosilicato

Figura C1. *Horno eléctrico de alta temperatura (≥1200 °C) utilizado en el proceso de fusión.*



Figura C2. *Crisoles refractarios resistentes a choque térmico.*



D. Equipos para la caracterización mecánica

Figura D1. *Prensa hidráulica utilizada para el ensayo de compresión simple.*



Figura D2. *Moldes cilíndricos empleados para la elaboración de probetas vítreas.*



Figura D3. *Vernier o micrómetro para la medición de dimensiones y tolerancias geométricas.*



E. Materiales utilizados

Figura E.1. *Sedimentos recolectados de los Humedales de Ite.*



Fuente: Elaboración propia (2025).

Figura E.2. *Arena fina empleada como material complementario.*



Figura E.3. *Agregado grueso (grava) utilizado en pruebas comparativas.*



Figura E.4. *Mallas metálicas y tamices utilizados en la etapa de preparación.*

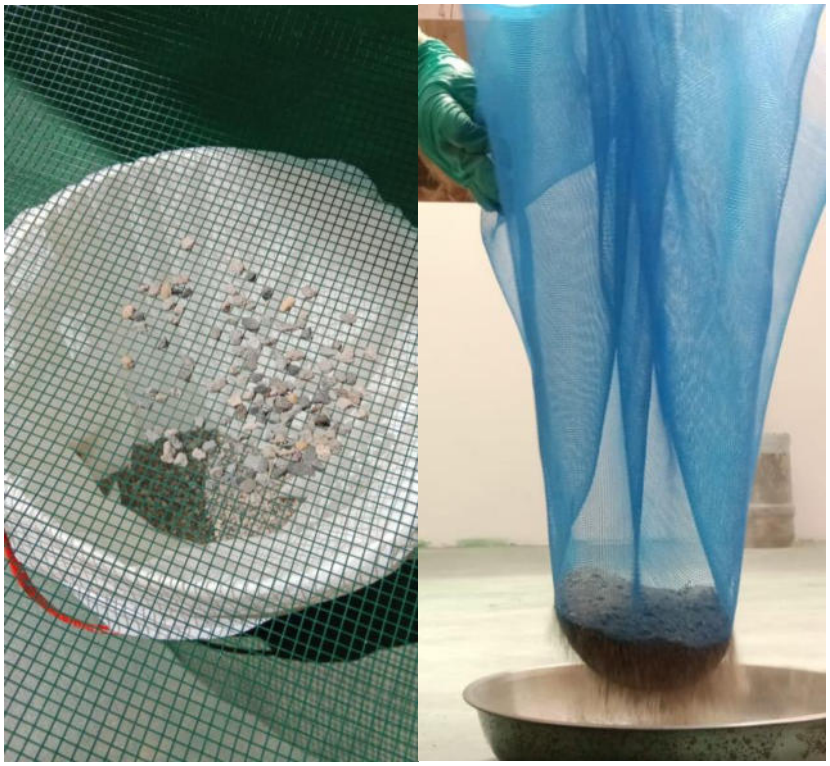


Figura E.5. *Agua destilada utilizada para el acondicionamiento del sedimento.*



Figura E.6. *Borosilicato en polvo empleado como agente vitrificante.*



Figura E.7. *Materiales de protección y manipulación (guantes, mascarillas, etc.).*



Figura E.8. *Balanza digital*



Figura E.9. *Silicona para fijar el molde en su base de madera, para el armado de las probetas*



Figura E.10. *Perno metálico de 15 cm*



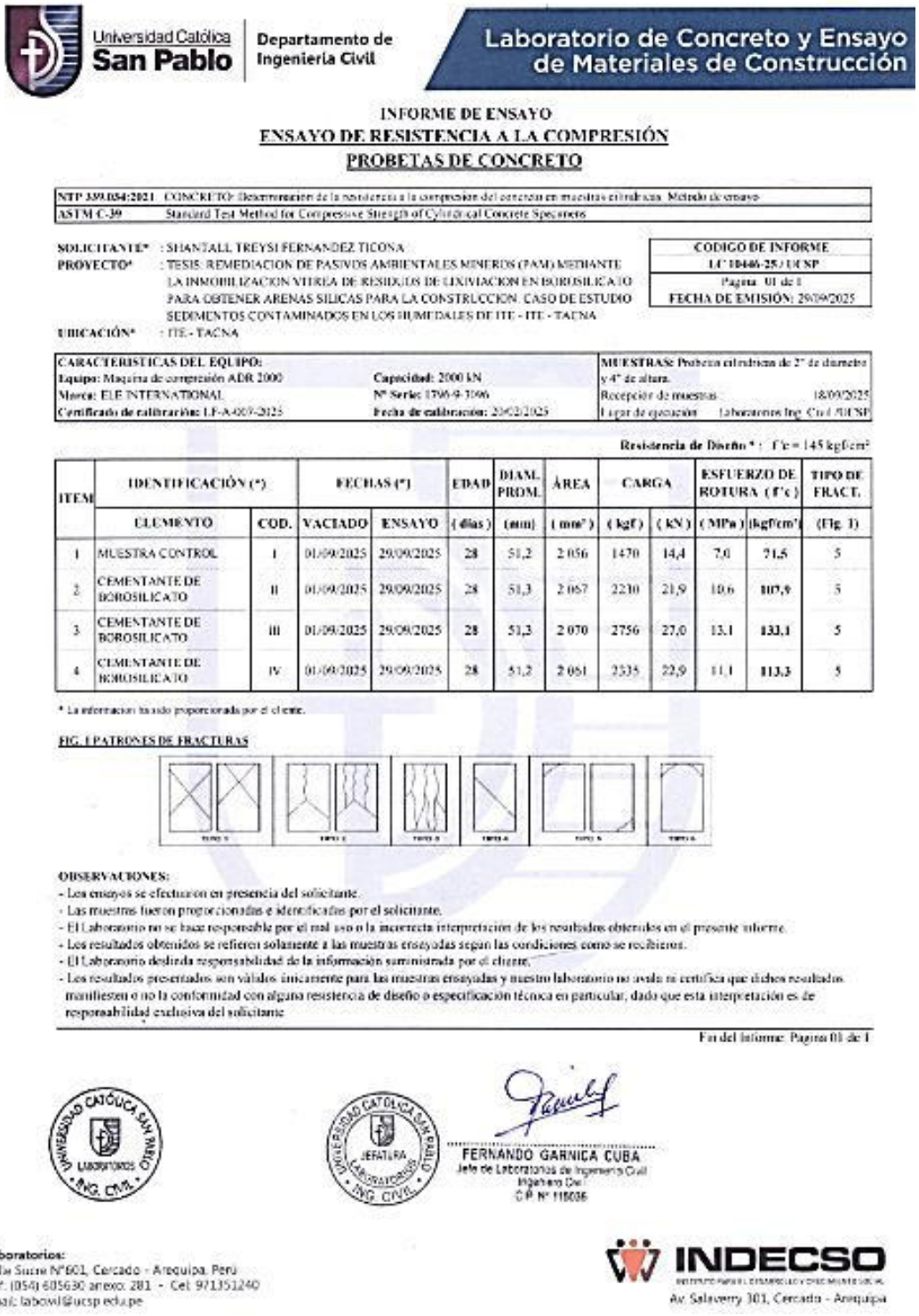
ANEXO 3.

Ensayos de Compresión Simple (UCS)

A. Informe de ensayos de compresión

En este anexo se presenta el informe emitido por el laboratorio de ensayos mecánicos, correspondiente a las pruebas de compresión no confinada realizadas a las probetas vitrificadas y sin vitrificar. Este documento contiene los valores de carga máxima, esfuerzo último, modo de falla y parámetros adicionales reportados por el equipo.

Figura A.1. *Informe de probetas de "Muestra control" y "Cementante de Borosilicato"*



Universidad Católica San Pablo | Departamento de Ingeniería Civil

Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales de Construcción

INFORME DE ENSAYO

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

PROBETAS DE CONCRETO

NTP 339.034:2021	CONCRETO: Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras estándar. Método de ensayo
ASTM C-39	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

SOLICITANTE* : SHANTALL TREYSI FERNANDEZ TICONA
PROYECTO* : TESIS: REMEDIACION DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM) MEDIANTE LA INMOBILIZACION VITREA DE RESIDUOS DE LIXIVIACION EN BOROSILICATO PARA OBTENER ARENAS SILICAS PARA LA CONSTRUCCION. CASO DE ESTUDIO SEDIMENTOS CONTAMINADOS EN LOS HUMEDALES DE ITE - ITE - TACNA
UBICACIÓN* : ITE - TACNA

CODIGO DE INFORME
LC 10446-25 / UCSP
Pagina 01 de 1
FECHA DE EMISIÓN: 29/09/2025

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO:		**MUESTRAS:** Probeta cilíndrica de 2" de diámetro y 4" de altura.
Equipo: Maquina de compresión ADR 2000	**Capacidad:** 2000 kN	
Marca: ELE INTERNATIONAL	**Nº Serie:** 1709-9-3096	Recepción de muestra: 18/09/2025
Certificado de calibración: LF-A-009-2025	**Fecha de calibración:** 20/02/2025	Lugar de ejecución: Laboratorios Ing. Civil - UCSP

Resistencia de Diseño * : F'c = 145 kg/cm²

ITEM	IDENTIFICACIÓN (*)		FECHAS (*)		EDAD	DIAM. PROM.	ÁREA	CARGA		ESFUERZO DE ROTURA (F'c)		TIPO DE FRACT.
	ELEMENTO	COD.	VACIADO	ENSAYO	(días)	(mm)	(mm²)	(kgf)	(kN)	(MPa)	(kgf/cm²)	(Fig. 1)
1	MUESTRA CONTROL	I	01/09/2025	29/09/2025	28	51,2	2 056	1470	14,4	7,0	71,5	5
2	CEMENTANTE DE BOROSILICATO	II	01/09/2025	29/09/2025	28	51,3	2 067	2230	21,9	10,6	107,9	5
3	CEMENTANTE DE BOROSILICATO	III	01/09/2025	29/09/2025	28	51,3	2 070	2756	27,0	13,1	133,1	5
4	CEMENTANTE DE BOROSILICATO	IV	01/09/2025	29/09/2025	28	51,2	2 061	2335	22,9	11,1	113,3	5

* La información ha sido proporcionada por el cliente.

FIG. 1 PATRONES DE FRACTURAS

OBSERVACIONES:
- Los ensayos se efectuaron en presencia del solicitante.
- Las muestras fueron proporcionadas e identificadas por el solicitante.
- El Laboratorio no se hace responsable por el mal uso o la incorrecta interpretación de los resultados obtenidos en el presente informe.
- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.
- El Laboratorio desliinda responsabilidad de la información suministrada por el cliente.
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas y nuestro laboratorio no avala ni certifica que dichos resultados manifiesten o no la conformidad con alguna resistencia de diseño o especificación técnica en particular, dado que esta interpretación es de responsabilidad exclusiva del solicitante.

Fin del Informe. Pagina 01 de 1

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN PABLO LABORATORIOS ING. CIVIL

JEFATURA LABORATORIOS

FERNANDO GARNICA CUBA
Jefe de Laboratorios de Ingeniería Civil
Ingeniero Civil
C.P. Nº 115036

Laboratorios:
Calle Sucre Nº 601, Cercado - Arequipa, Perú
Telf.: (054) 605630 anexo: 281 - Cel: 971351240
Email: labovi@ucsp.edu.pe

INDECSO
Av. Salaverry 301, Cercado - Arequipa

Figura A.2. *Informe de probetas de "Cementante de Borosilicato" en mayor porcentaje*

Universidad Católica San Pablo | Departamento de Ingeniería Civil

Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales de Construcción

INFORME DE ENSAYO

ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

PROBETAS DE CONCRETO

NTP 339.034:2021	CONCRETO. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo
ASTM C-39	Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

SOLICITANTE* : SHANTALL TREYSI FERNANDEZ TICONA
PROYECTO* : TESIS: REMEDIACION DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM) MEDIANTE LA INMOBILIZACION VITREA DE RESIDUOS DE LIXIVIACION EN BOROSILICATO PARA OBTENER ARENAS SILICAS PARA LA CONSTRUCCION: CASO DE ESTUDIO SEDIMENTOS CONTAMINADOS EN LOS HUMEDALES DE ITE - ITE - TACNA
UBICACIÓN* : ITE - TACNA

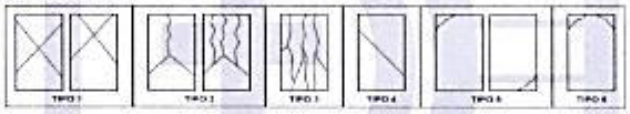
CODIGO DE INFORME
LC 10403-25 / UCSP
Página 01 de 1
FECHA DE EMISIÓN: 17/10/2025

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO:		**MUESTRAS:** Probetas cilíndricas de 2" de diametro y 4" de altura
Equipo: Maquina de compresión ADR 2000	**Capacidad:** 2000 kN	Recepción de muestras: 16/10/2025
Marca: ELE INTERNATIONAL	**N° Serie:** 1796-9-3596	Lugar de ejecución: Laboratorios Ing. Civil UCSP
Certificado de calibración: LF-A-037-2025	**Fecha de calibración:** 20/02/2025	

ITEM	IDENTIFICACIÓN (*)		FECHAS (*)		EDAD	DIAM. PROM.	ÁREA	CARGA		ESFUERZO DE ROTURA (f'c)		TIPO DE FRACT.
	ELEMENTO	COD.	VACIADO	ENSAYO	(días)	(mm)	(mm²)	(kgf)	(kN)	(MPa)	(kgf/cm²)	(Fig. 1)
1	CEMENTANTE DE BOROSILICATO	V	17/09/2025	16/10/2025	29	51,2	2 055	832	8,2	4,0	40,8	3
2	CEMENTANTE DE BOROSILICATO	VI	17/09/2025	16/10/2025	29	51,2	2 060	1414	13,9	6,7	68,6	3

* La información ha sido proporcionada por el cliente

FIG. 1 PATRONES DE FRACTURAS



OBSERVACIONES

- Los ensayos se efectuaron en presencia del solicitante.
- Las muestras fueron proporcionadas e identificadas por el solicitante.
- La Resistencia de Diseño no fue proporcionada por el solicitante.
- El Laboratorio no se hace responsable por el mal uso o la incorrecta interpretación de los resultados obtenidos en el presente informe.
- Los resultados obtenidos se refieren solamente a las muestras ensayadas según las condiciones como se recibieron.
- El Laboratorio deslinda responsabilidad de la información suministrada por el cliente.
- Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas y nuestro laboratorio no avala ni certifica que dichos resultados manifiesten o no la conformidad con alguna resistencia de diseño o especificación técnica en particular, dado que esta interpretación es de responsabilidad exclusiva del solicitante.

Fin del Informe. Página 01 de 1

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN PABLO LABORATORIOS ING. CIVIL

UNIVERSIDAD CATÓLICA SAN PABLO JEFATURA LABORATORIOS ING. CIVIL

FERNANDO GARNICA CUBA
Jefe de Laboratorios de Ingeniería Civil
Ingeniero Civil
CIP N° 118030

Laboratorios:
Calle Sucre N°601, Cercado - Arequipa, Perú
Telf.: (054) 605630 anexo: 281 - Cel: 971351240
Email: labcivil@ucsp.edu.pe

INDECSO
Av. Salaverry 301, Cercado - Arequipa

B. Registro fotográfico de la preparación y medición de probetas

Las siguientes imágenes documentan el proceso previo al ensayo UCS, que incluye la medición de dimensiones y la verificación de condiciones iniciales de cada probeta.

Figura B.1. *Medición del diámetro de la probeta por el técnico de laboratorio*



Figura B.2. *Medición de la altura de la probeta antes del ensayo*



Figura B.3. *Probetas preparadas y etiquetadas previo al ensayo*



C. Registro fotográfico del ensayo en equipo

Este conjunto de imágenes evidencia la colocación de la probeta en la máquina de carga, el proceso de aplicación de esfuerzo y el instante de rotura.

Figura C.1. *Probeta posicionada en el equipo de compresión*



Figura C.2. *Instante de la rotura durante el aumento de carga*



Figura C.3. *Pantalla o visor del equipo mostrando la carga máxima alcanzada*



D. Registro fotográfico de probetas después del ensayo

Se presentan las probetas tras su falla, con el objetivo de mostrar los modos de fractura y la condición de los especímenes posteriormente a la aplicación de carga.

Figura D.1. *Probetas rotas en el interior del equipo luego de la falla*



Figura D.2. *Probetas rotas colocadas en bandeja para revisión*



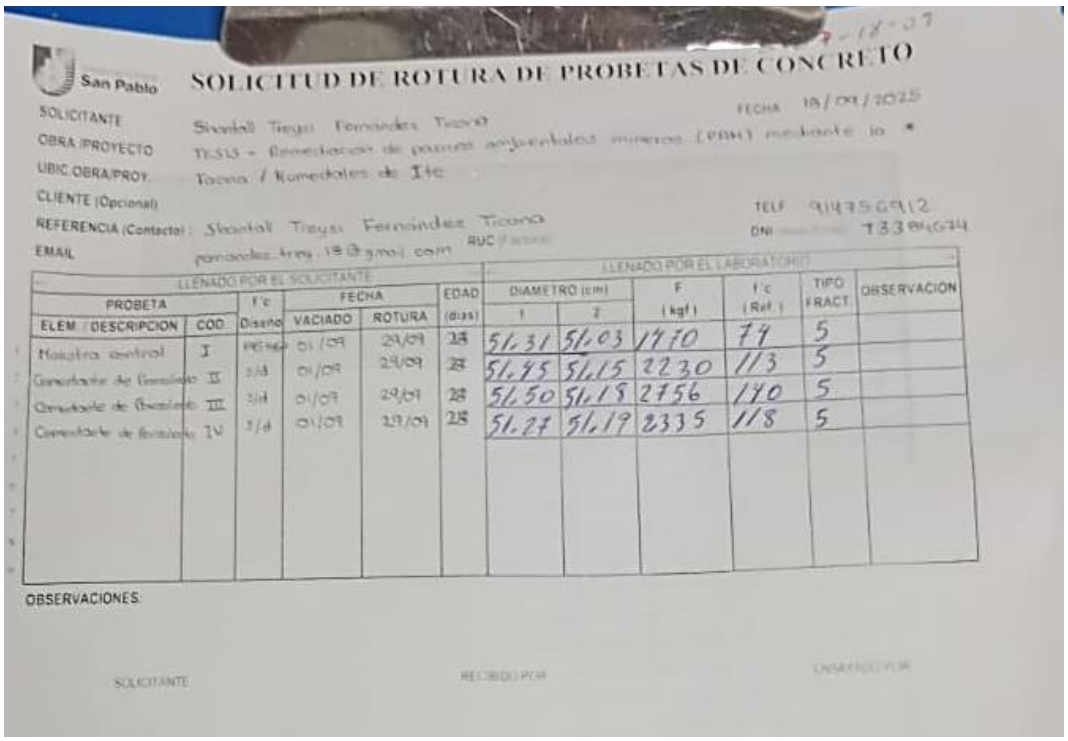
Figura D.3. *Vista lateral de las probetas fracturadas*



E. Anotaciones manuales del laboratorio

En este apartado se incluyen las anotaciones realizadas manualmente el desarrollo del ensayo, donde se consignan observaciones de la prueba, cargas registradas y cualquier comentario técnico relevante.

Figura E.1. *Registro fotográfico de anotaciones de probetas de "Muestra control" y "Cementante de Borosilicato"*



San Pablo

SOLICITUD DE ROTURA DE PROBETAS DE CONCRETO

SOLICITANTE: Shantall Tieya Fernandez Ticona — FECHA: 18/09/2025

OBRA /PROYECTO: TESIS - Remediacion de pozos ampacables mineros (PAM) mediante la *

UBIC.OBRA/PROY.: Tacna / Remediales de Ite

CLIENTE (Opcional)

REFERENCIA (Contacto): Shantall Tieya Fernandez Ticona — TELF: 914756912

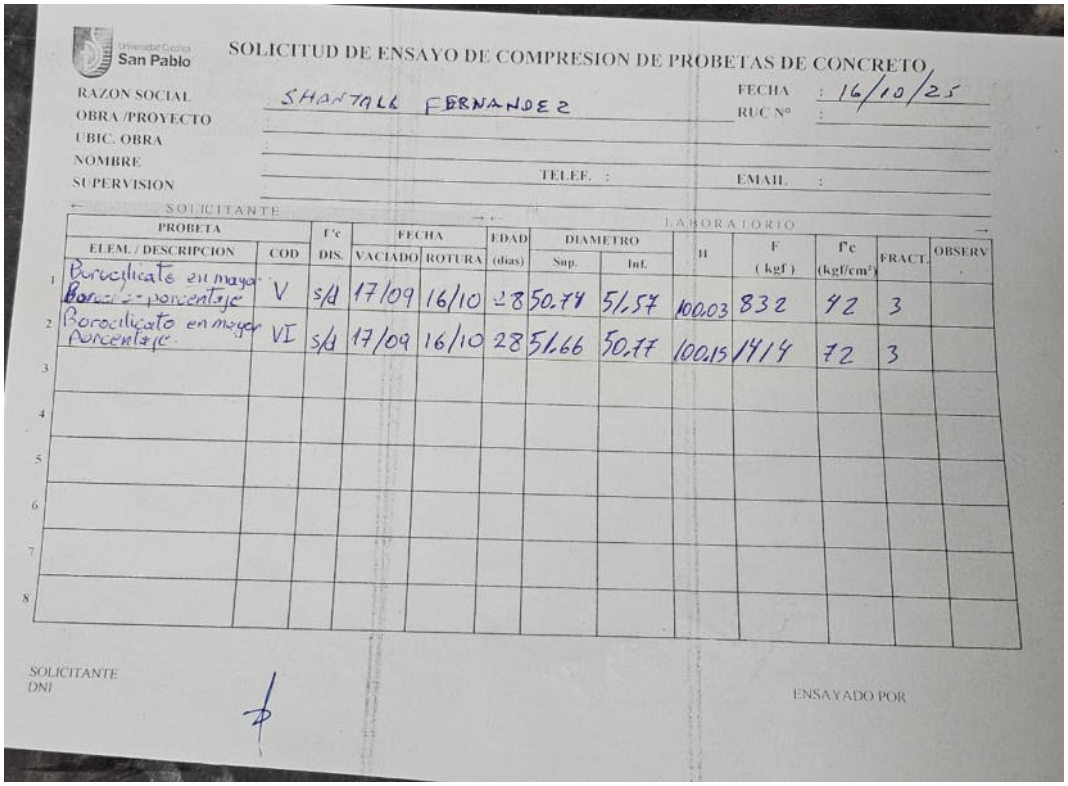
EMAIL: fernandez.tieya.18@gmail.com — RUC: — DNI: 73396624

LLENADO POR EL SOLICITANTE						LLENADO POR EL LABORATORIO					
PROBETA		f'c	FECHA		EDAD	DIAMETRO (cm)		F	f'c	TIPO FRACT.	OBSERVACION
ELEM. / DESCRIPCION	COD.	Diseño	VACIADO	ROTURA	(días)	1	2	(kgf)	(Kgf/cm²)		
Muestra control	I	280kg/cm²	01/09	29/09	28	51.31	51.03	1470	74	5	
Cementante de Borosilicato	II	3/4	01/09	29/09	28	51.45	51.15	2230	113	5	
Cementante de Borosilicato	III	3/4	01/09	29/09	28	51.50	51.15	2756	140	5	
Cementante de Borosilicato	IV	3/4	01/09	29/09	28	51.27	51.19	2335	118	5	

OBSERVACIONES:

SOLICITANTE — RECIBIDO POR — ENSAYADO POR

Figura E.2. *Registro fotográfico de anotaciones de probetas "Cementante de Borosilicato" en mayor porcentaje*



SOLICITUD DE ENSAYO DE COMPRESION DE PROBETAS DE CONCRETO

Universidad Católica San Pablo

RAZON SOCIAL: SHANTALL FERNANDEZ — FECHA : 16/10/25
OBRA /PROYECTO — RUC N° :
UBIC. OBRA
NOMBRE
SUPERVISION — TELEF. : — EMAIL :

← SOLICITANTE → ← LABORATORIO →

	PROBETA		f'c	FECHA		EDAD	DIAMETRO		H	F	f'c	FRACT.	OBSERV
	ELEM. / DESCRIPCION	COD	DIS.	VACIADO	ROTURA	(dias)	Sup.	Inf.		(kgf)	(kgf/cm²)		
1	Borosilicato en mayor porcentaje	V	S/A	17/09	16/10	28	50.74	51.57	100.03	8320	42	3	
2	Borosilicato en mayor porcentaje	VI	S/A	17/09	16/10	28	51.66	50.77	100.15	1414	72	3	
3													
4													
5													
6													
7													
8													

SOLICITANTE
DNI

ENSAYADO POR

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO DE AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL UNAM

Formulario de autorización para la publicación electrónica en la página web del Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua, de conformidad con la Ley N° 30035 Ley que regula el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto y Resolución de Comisión Organizadora N° 041-2022-UNAM que aprueba el Reglamento que regula el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

1. DATOS DEL AUTOR

Nombres y Apellidos	:	Shantall Treysi Fernández Ticona
DNI/Carnet de Extranjería/Pasaporte N°	:	73384674
Correo electrónico	:	fernandez.trey.18@gmail.com
Teléfono/Celular	:	914756912

2. GRADO, TITULO O ESPECIALIZACIÓN (Marque con una X)

Bachiller	Título Profesional	Magister	Doctor	Segunda Especialidad
	X			

3. TIPO DE PUBLICACIÓN (Marque con una X)

a) Articulo ( )
b) Tesis de pregrado (X)
c) Tesis de Maestría ( )
d) Tesis de Doctorado ( )
e) Monografía ( )
f) Reporte de caso científico o hallazgos ( )
g) Libro ( )
h) Parte de un libro ( )
i) Revisión ( )
j) Conferencia ( )
k) Presentación ( )
l) Artículo preliminar ( )
m) Articulo antes de ser publicado ( )
n) Artículo de prensa ( )
o) Documentos internos ( )
p) Imagen ( )
q) Documentos técnicos ( )
r) Ponencias presentadas en eventos científicos (Jornada, Congreso, Simposio Conferencias, etc.) ( )
s) Informes de suficiencia profesional ( )
t) Patentes producidas por académicos/as ( )

"UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA"

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN

4. TIPO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN (Marque con una X)

a) Tesis (X)
b) Trabajo de Investigación ( )
c) Trabajo de suficiencia profesional ( )
d) Trabajo académico ( )

5. DATOS DE LA PUBLICACION

a) Título : REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM) MEDIANTE LA INMOVILIZACION VITREA DE RESIDUOS DE LA LIXIVIACION EN BOROSILICATO PARA OBTENER ARENAS SILICAS PARA LA CONSTRUCCION: CASO DE ESTUDIO SEDIMENTOS CONTAMINADOS EN LOS HUMEDALES DE ITE
b) Campo del conocimiento OCDE (Indicar el código de clasificación OCDE de la obra : https://catalogos.concytec.gob.pe/vocabulario/ocde_ford.html) : 2.07.01
c) Fecha de publicación : 29 de Diciembre del 2025

6. DATOS DEL ASESOR:

a) Nombres y Apellidos : Bertha Silvana Vera Barrios
b) DNI/Pasaporte/Cédula : 29542375
c) ORCID : 0000-0002-6411-8361

FIRMA :

DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 73384674
NOMBRES Y APELLIDOS : Shantall Treysi Fernández Ticona

LICENCIAS

Licencia Estándar

Bajo los siguientes términos, autorizo el depósito de mi trabajo de investigación en el Repositorio Institucional Digital de la UNAM.

Con la autorización de depósito da mi trabajo de investigación, otorgo a la Universidad Nacional de Moquegua, una Licencia No Exclusiva para reproducir. distribuir, comunicar al público, transformar (únicamente mediante su traducción a otros idiomas) y poner a disposición del público mi trabajo de investigación (incluido el resumen), en formato físico o digital, en cualquier medio, conocido o por conocerse, a través de los diversos servicios provistos por la Universidad, creados o por crearse, tales como el Repositorio Institucional Digital de la UNAM, Colección de Tesis, entre otros, en el Perú y en el extranjero, por el tiempo y veces que considere necesarias, y libre de remuneraciones.

En virtud de dicha Licencia, la UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA, podrá reproducir mi trabajo de investigación en cualquier tipo de soporte y en más de un ejemplar, sin modificar su contenido, solo con los propósitos de seguridad, respaldo y preservación.

Declaro que el trabajo de investigación es una creación de mi autoría y exclusiva titularidad, o coautoría con titularidad compartida, y me encuentro facultado a conceder la presente licencia y, asimismo, garantizo que dicho trabajo de investigación no infringe derechos de autor de terceras personas.

La UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA consignara el nombre del/los autor/es del trabajo de investigación, y no le hará ninguna modificación más de la permitida en la presente licencia.

Autorizo el depósito (marque con una X).

(X) **SI autorizo que se deposite inmediatamente.**

FIRMA : _____



DOCUMENTO DE IDENTIDAD : 73384674
NOMBRES Y APELLIDOS : Shantall Treysi Fernández Ticona
FECHA : 04 de Febrero del 2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DE MOQUEGUA

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN / TESIS / TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Yo, Shantall Treysi Fernández Ticona, bachiller de la Escuela Profesional de: Ingeniería de Minas, de la Universidad Nacional de Moquegua, identificado (a) con DNI: Nº 73384674, autor(a) de la Tesis / Trabajo de suficiencia profesional titulado "REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS (PAM) MEDIANTE LA INMOVILIZACION VITREA DE RESIDUOS DE LA LIXIVIACION EN BOROSILICATO PARA OBTENER ARENAS SILICAS PARA LA CONSTRUCCION: CASO DE ESTUDIO SEDIMENTOS CONTAMINADOS EN LOS HUMEDALES DE ITE".

Declaro bajo juramento que:

1. El trabajo de investigación es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derechos de autor. Por tanto, el trabajo de investigación no ha sido plagiado total ni parcialmente.
2. El trabajo de investigación no ha sido autoplagiada, es decir, no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
3. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados y por tanto los resultados que se presentan en el trabajo de investigación constituirán aporte a la realidad investigada.

Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el trabajo de investigación, así como de los derechos sobre la obra presentada.

Moquegua, 04 de Febrero del 2026



Huella digital

Nombres y Apellidos: Shantall Treysi Fernández Ticona
DNI: 73384674

Base legal: RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 194-2020-SUNEDU-02-15

INFORME DE TESIS SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA.pdf

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::23228:539450828

Fecha de entrega
11 dic 2025, 10:34 a.m. GMT-5

Fecha de descarga
11 dic 2025, 10:42 a.m. GMT-5

Nombre del archivo
INFORME DE TESIS SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA.pdf

Tamaño del archivo
3.9 MB

127 páginas

21.347 palabras

131.288 caracteres

UNAM

Firmado digitalmente por VERA BARRIOS Bertha Silvana FAU 20449347448 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 06.02.2026 15:12:41 -05:00

5% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

4% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Fuentes principales

4% Fuentes de Internet
1% Publicaciones
3% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1 Internet
pdfs.semanticscholar.org <1%

2 Internet
repositorio.utea.edu.pe <1%

3 Trabajos entregados
Universidad Tecnologica de los Andes on 2024-10-24 <1%

4 Internet
www.unjbg.edu.pe <1%

5 Trabajos entregados
Universidad Nacional de Moquegua on 2025-07-27 <1%

6 Internet
www.mdpi.com <1%

7 Internet
www.coursehero.com <1%

8 Trabajos entregados
Universidad Nacional de Moquegua on 2025-07-22 <1%

9 Internet
repositorio.unam.edu.pe <1%

10 Internet
repositorio.upla.edu.pe <1%

11 Internet
repositorio.upd.edu.pe <1%

12 Internet
www.clubensayos.com <1%

13 Internet
anteriorportal.erbol.com.bo <1%

14 Internet
repositorio.uancv.edu.pe <1%

15 Trabajos entregados
Universidad San Ignacio de Loyola on 2024-02-02 <1%

16 Trabajos entregados
Universidad Nacional de Moquegua on 2024-12-17 <1%

17 Internet
www.serperuano.com <1%

18 Trabajos entregados
Universidad Femenina del Sagrado Corazón on 2025-05-15 <1%

19 Trabajos entregados
Universidad Tecnologica de los Andes on 2025-07-03 <1%

20 Trabajos entregados
Universidad Católica de Santa María on 2024-11-25 <1%

21 Trabajos entregados
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann on 2025-11-27 <1%

22 Trabajos entregados
Universidad Tecnologica de los Andes on 2025-05-26 <1%

23 Publicación
Ccahuanihancco Arque, Oscar. "Evaluar la variedad de ichu (Stipa ichu) como bioi... <1%

24 Publicación
Rubio Calderón, Laura Catalina. "Modelo de evaluación del servicio de barrido de ... <1%

25 Internet
docplayer.es <1%

26 Internet
renati.sunedu.gob.pe <1%

27 Internet
repositorio.cepal.org <1%

28 Internet
repositorio.unbosque.edu.co <1%

29 Internet
colposdigital.colpos.mx:8080 <1%

30 Internet
dl.dropboxusercontent.com <1%

31 Internet
idoc.pub <1%

32 Internet
pt.slideshare.net <1%

33 Trabajos entregados
Costa Rica Institute of Technology on 2025-11-11 <1%

34 Trabajos entregados
Escuela Politecnica Nacional on 2025-07-24 <1%

35 Trabajos entregados
Universidad Nacional de Colombia on 2018-02-08 <1%

36 Internet
www.optimedical.com <1%

37 Internet
www.researchgate.net <1%

38 Internet
www.slideshare.net <1%

39 Trabajos entregados
Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann on 2025-10-20 <1%

40 Trabajos entregados
Universidad Privada de Tacna on 2019-02-20 <1%

41 Trabajos entregados
Universidad Tecnologica de los Andes on 2025-11-13 <1%

42 Trabajos entregados
Universitat Politècnica de València on 2025-08-13 <1%

43 Trabajos entregados
University of Iceland on 2022-11-17 <1%

44 Internet
es.scribd.com <1%

45 Internet
examplum.com <1%

46 Internet
issuu.com <1%

47 Internet
oa.upm.es <1%

48 Internet
prezi.com <1%

49 Internet
soyentrepreneur.com <1%

50 Internet
tesis.pucp.edu.pe <1%

51 Internet
www.scielo.org.co <1%

52 Internet
www.scielo.org.mx <1%

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 277-2026-CU

Moquegua, 23 de abril de 2026

VISTOS:

El Proveído N° 1459-2026-R de fecha 26 de marzo de 2026 emitido por el Rectorado, Informe N° D0173-2026-UNAM-R-SG de fecha 24 de marzo de 2026 emitido por el Secretario General, Informe Técnico N° D0040-2026-SG-GT de Grados y Títulos, Resolución de Consejo de Facultad N° 040-2026-CF-FAIN-UNAM de fecha 13 de marzo de 2026, el Acuerdo del Pleno del Consejo Universitario de Sesión Ordinaria N° 04-2026-SO-CU-UNAM, de fecha 01de abril de 2026, y;

CONSIDERANDO:

Que, conforme al 4to párrafo del artículo 18, de la Constitución Política del Perú, dispone que cada Universidad es autónoma en su régimen normativo, de gobierno, académico, administrativo y económico. Y el artículo 8° de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que la referida autonomía inherente a las Universidades, se ejerce de conformidad con la Constitución y demás normativa aplicable. Concordante con el artículo 1, de la Ley N° 31520, Ley que restablece la autonomía y la institucionalidad de las universidades peruanas, así como la Ley N° 32141, Ley que modifica la Ley N° 30220-Ley Universitaria, a fin de fortalecer la institucionalidad de las Universidades Públicas licenciadas;

Que, el Artículo 58, de la Ley N° 30220-Ley Universitaria, establece que el Consejo Universitario es el máximo órgano de gestión, dirección y ejecución académica y administrativa de la Universidad. Concordante con el artículo 18° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, aprobado bajo Resolución de Asamblea Universitaria N° 015-2025-AU-UNAM;

Que, el artículo 59 de la Ley Universitaria-Ley N° 30220, establece las atribuciones del Consejo Universitario, y específicamente el numeral 59.9, establece; Conferir los grados académicos y los títulos profesionales aprobados por las Facultades y Escuela de Posgrado, así como otorgar distinciones honoríficas y reconocer y revalidar los estudios, grados y títulos de universidades extranjeras, cuando la universidad está autorizada por la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria. Concordante con el numeral 14, del artículo 20° del Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua;

Que, mediante Resolución de Asamblea Universitaria N° 006-2026-AU, de fecha 20 de abril de 2026, se aprobó la incorporación de la Disposición Transitoria N° 22 al Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, referido a la excepción para la emisión de los grados académicos de bachiller y títulos profesionales consignando la denominación de "Facultad de Ingeniería y Arquitectura";

Que, mediante Resolución de Consejo de Facultad N° 040-2026-CF-FAIN-UNAM, de fecha 13 de marzo de 2026, el Coseno de Facultad de Ingenierías aprobó el otorgamiento del Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de Tesis, a tres (03) Bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua, de acuerdo al siguiente detalle: OLIVER HUARACHI LAURA, SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA y ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES;

Que, mediante Informe Técnico N° D0040-2026-SG-GT de fecha 23 de marzo de 2026, e Informe N° D0173-2026-UNAM-R-SG de fecha 24 de marzo de 2026, el Secretario General de la UNAM, remite al Rectorado el expediente para el trámite de Título Profesional de Ingeniero de Minas a los Bachilleres: OLIVER HUARACHI LAURA, SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA y ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, quienes se encuentran aptos para la expedición del Título Profesional de Ingeniero de Minas, al haber cumplido satisfactoriamente con los requisitos legales y reglamentarios, exigidos en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, razón por la cual, el señor Secretario General incluye dicho expediente como punto de agenda para ser tratado en Sesión Extraordinaria de Consejo Universitario de fecha 01 de abril de 2026;

Que, el artículo 44° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria señala que las universidades otorgan los grados académicos de Bachiller, Maestro, Doctor y los Títulos Profesionales que correspondan, a nombre de la Nación (...). Asimismo, la Ley N° 31803, modifica el artículo en mención adicionando; La Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria (SUNEDU) determina los criterios, así como establece y supervisa el procedimiento administrativo para el reconocimiento de grados y títulos otorgados en el extranjero, en el marco de la normativa vigente;

Que, el numeral 45.2 del artículo 45° de la Ley N° 30220, Ley Universitaria, precisa los requisitos mínimos para la obtención del título profesional, como son: el grado de Bachiller y la aprobación de una tesis o trabajo de suficiencia profesional. Asimismo, establece que el título profesional solo se puede obtener en la universidad en la cual se haya obtenido el grado de bachiller;

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe

Universidad Nacional de Moquegua

RESOLUCIÓN DE CONSEJO UNIVERSITARIO
N° 277-2026-CU

Moquegua, 23 de abril de 2026

Que, mediante Resolución de Comisión Organizadora N° 1153-2021-UNAM, se aprobó el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional de Moquegua, el mismo que fue modificado a través de las Resoluciones de Comisión Organizadora N° 410; 453 y 890-2022, N° 880-2023-UNAM y N° 081, 484-2024-UNAM el cual establece los requisitos y norma los procedimientos para la obtención de los grados académicos y títulos profesionales conferidos por esta Casa Superior de Estudios;

Que, bajo el amparo de los considerandos precedentes, el Pleno del Consejo Universitario en Sesión Ordinaria N° 04-2026-SO-CU-UNAM, de fecha 01 de abril de 2026, emitió, el siguiente, Acuerdo, POR UNANIMIDAD: CONFERIR, a nombre de la Nación el Título Profesional de Ingeniero de Minas por la modalidad de sustentación de tesis a los Bachilleres: OLIVER HUARACHI LAURA, SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA y ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua;

En uso de las facultades y atribuciones conferidas por el Art. 18, de la Constitución Política del Perú, la Ley N° 30220 Ley Universitaria, el Estatuto de la Universidad Nacional de Moquegua, y a lo acordado por el pleno del Consejo Universitario:

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°: CONFERIR, A NOMBRE DE LA NACIÓN a los Bachilleres

- **OLIVER HUARACHI LAURA**
- **SHANTALL TREYSI FERNÁNDEZ TICONA**
- **ALLISON TATIANA NAVARRETE GONZALES**

El **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO DE MINAS.**
Por la modalidad de SUSTENTACIÓN DE TESIS, de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, de la Facultad de Ingenierías de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 2°: ENCARGAR, al Secretario General de la UNAM, para que realice las acciones pertinentes relacionadas con la inscripción correspondiente en el Registro de Grados y Títulos de la Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU.

ARTÍCULO 3°: DISPONER, el cumplimiento de la presente Resolución a todas las dependencias de la Universidad Nacional de Moquegua.

ARTÍCULO 4°: DISPONER la publicación de la presente resolución en el Portal Institucional de la Universidad Nacional de Moquegua www.unam.edu.pe

REGÍSTRESE, PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE;

MTRO. JOSE LUIS PACHECO CACERES
SECRETARIO GENERAL

DR. HUGO RUBEN MARCA MAQUERA
RECTOR
PRESIDENTE DEL CONSEJO UNIVERSITARIO

DISTRIBUCION:
VRA,
VRI,
FAIN,
EPIM,
GyT
DASA,
OTI
Interesado,
C.c. Arch.

Domicilio Legal: Prolongación Av., Ancash S/N - Moquegua
RUC: 20449347448 - Teléfono: (053) 670168
Página Web: www.unam.edu.pe