

UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
ÁREA DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL



TESIS DE GRADO

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL
SUELO A-4 ESTABILIZADO CON CEMENTO Y PARCIALMENTE
SUSTITUIDO POR CENIZA DE HOJA DE BAMBÚ**

TESIS DE GRADO PRESENTADO PARA OBTENER EL TÍTULO ACADÉMICO
DE LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL

Postulante: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

Tutor Colectivo: Ing. Fabricio Ocampo Vedia

Asesor: Ing. Alfredo Escobar Arana

Cobija - Pando - Bolivia

2025

AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a mi Padre Celestial, por guiarme y cuidarme en cada etapa de mi vida, por fortalecerme y por ser la base fundamental en todo lo que soy y he logrado.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mi grupo de amigas, especialmente a Milenca, por acompañarme en las etapas más ajetreadas de esta investigación, y también a Estefani, Karen y María, por su apoyo y compañía.

Agradezco también a Kevin, por su orientación y colaboración en el laboratorio, y a Alexis, por su ayuda incondicional en la obtención de la esencia de esta investigación.

También deseo expresar mi agradecimiento a mi grupo de amigos con quienes compartí cada semestre hasta noveno, en especial a Alvaro y Kevin, por todos los momentos compartidos, entre el estrés y la alegría de superar juntos cada materia.

De igual manera, expreso mi gratitud a todas las personas que, de una u otra forma, me orientaron y brindaron su apoyo para hacer posible este trabajo.

Extiendo un especial agradecimiento a mis docentes de la carrera de Ingeniería Civil, quienes, con sus enseñanzas y exigencia académica, me permitieron adquirir los conocimientos necesarios para fortalecer mi formación profesional y mi vocación como futura ingeniera civil.

Finalmente, deseo expresar mi reconocimiento y gratitud a mi asesor, Ing. Alfredo Escobar, por su paciencia, compromiso y apoyo constante a lo largo de esta investigación. Asimismo, agradezco al Ing. Fabricio Ocampo, mi tutor, por su orientación y aporte fundamental en la revisión de la redacción de este documento.

DEDICATORIA

A mi Padre Celestial, por haber hecho posible que culmine esta investigación y por darme la fortaleza necesaria para llegar hasta aquí.

A mis padres, Estela y Efraín, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor motivación para ser fuerte, perseverante para poder cumplir cada uno de mis objetivos.

A mis hermanos Jhon, Leonardo y Keysi, por acompañarme y brindarme su ayuda durante todo este proceso.

A mis abuelitos, Felipa, Porfirio, Estela y Adolfo, por sus enseñanzas, cariño y oraciones que siempre me acompañaron.

Y a mis tíos, por sus palabras de aliento que me impulsaron a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Este logro no es solo mío, es el reflejo del amor, la fe y el apoyo que siempre me brindaron. Gracias por creer en mí y acompañarme en cada paso. ¡Los amo con el alma!

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB) en la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) del suelo tipo A-4, característico de la ciudad de Cobija, Pando. El estudio surge como una alternativa sostenible para reducir el consumo de cemento Portland en la estabilización de suelos empleados en capas de subbase o base de pavimentos.

Se elaboraron mezclas con 4 % de cemento Portland IP-30 (mezcla de control) y sustituciones parciales del cemento por CHB en proporciones de 2 %, 4 % y 6 %. Los ensayos de compactación (Proctor) y resistencia a la compresión se realizaron conforme a las normas ASTM D558-03 y ASTM D1633.

Los resultados mostraron grados de compactación superiores al 95 % en todas las mezclas, cumpliendo los criterios técnicos de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). En cuanto a la RCU, se evidenció un incremento progresivo conforme aumentó el porcentaje de CHB, alcanzando su valor máximo de 3,09 MPa con 6 % de sustitución, superando el mínimo exigido de 2,5 MPa. El análisis estadístico mediante ANOVA confirmó diferencias significativas entre las dosificaciones, demostrando la influencia positiva de la CHB en el comportamiento mecánico del suelo-cemento.

La CHB obtenida de la especie *Guadua angustifolia* que presentó un 83 % de sílice, evidenciando su alta reactividad puzolánica y su potencial como material cementante suplementario en la estabilización de suelos.

Palabras clave: ceniza de hoja de bambú (CHB), resistencia a la compresión uniaxial (RCU), estabilización de suelos, suelo-cemento, sustitución parcial, puzolana.

ABSTRACT

This research evaluated the effect of the partial replacement of cement with bamboo leaf ash (BLA) on the unconfined compressive strength (UCS) of A-4 type soil, characteristic of the city of Cobija, Pando. The study emerges as a sustainable alternative to reduce Portland cement consumption in soil stabilization processes used for subbase or base layers in pavement construction.

Mixtures were prepared with 4% Portland cement type IP-30 (control mixture) and partial substitutions of cement with BLA at proportions of 2%, 4%, and 6%. The compaction (Proctor) and compressive strength tests were carried out following ASTM D558-03 and ASTM D1633 standards.

The results showed compaction degrees higher than 95% for all mixtures, meeting the criteria established by the Bolivian Road Administration (ABC). Regarding UCS, a progressive increase was observed as the BLA percentage rose, reaching a maximum value of 3.09 MPa at 6% replacement, exceeding the minimum required strength of 2.5 MPa. Statistical analysis using ANOVA confirmed significant differences among the mixtures, demonstrating the positive influence of BLA on the mechanical behavior of the soil–cement material.

The BLA obtained from the *Guadua angustifolia* species contained 83% silica, evidencing its high pozzolanic reactivity and its potential as a supplementary cementitious material for soil stabilization.

Keywords: bamboo leaf ash (BLA); unconfined compressive strength (UCS); soil stabilization; soil–cement; partial replacement; pozzolan.

INDICE

AGRADECIMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT	iv
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCION.....	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del problema.....	5
1.2.1. Descripción del problema.....	5
1.3. Hipótesis.....	6
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos Específicos	7
1.5. Justificación	7
1.5.1. Técnica.....	7
1.5.2. Social.....	8
1.6. Metodología.....	9
1.7. Alcances	10
CAPÍTULO II.....	12
2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	12
2.1. Marco teórico	12
2.1.1. Estabilización de suelos.....	12
2.1.2. Relevancia de la estabilización en obras viales	15

2.1.3. Clasificación y caracterización de suelos	16
2.1.4. Propiedades físicas de suelos finos.....	18
2.1.5. Propiedades mecánicas de los suelos	19
2.1.6. Características del suelo tipo A-4.....	20
2.1.7. Presencia del suelo A-4 en Cobija.....	21
2.1.8. Estabilización con cemento	22
2.1.9. Materiales cementantes suplementarios (puzolanas).....	32
2.1.10. Ceniza de hoja de bambú (CHB).....	36
2.1.11. Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial	41
2.2. Estado del Arte-----	42
CAPÍTULO III	45
3. DISEÑO METODOLÓGICO	45
3.1. Tipo de investigación -----	45
3.2 Diseño de investigación -----	45
3.3 Enfoque de la investigación -----	46
3.4. Variables de estudio-----	46
3.4.1. Operacionalización de las variables.	47
3.5. Población y muestra -----	48
3.6. Materiales empleados -----	49
3.6.1. Suelo A-4.....	49
3.6.2. Cemento Portland tipo IP 30	49
3.6.3. Ceniza de hoja de bambú (CHB).....	49
3.6.4. Agua	49
3.7. Equipos y herramientas de laboratorio -----	49
3.8. Localización del estudio-----	52

3.9. Extracción y preparación de muestras de suelo	53
3.9.1. Ensayos de caracterización del suelo.....	56
3.10. Recolección y proceso de obtención de la ceniza de hoja de bambú	64
3.10.1. Procedimiento inicial:.....	65
3.10.2. Obtención de mayor cantidad de ceniza para la investigación.....	67
3.11. Diseño de mezclas de suelo-cemento con CHB	69
3.12. Procedimiento del ensayo Proctor para mezclas de suelo-cemento según norma ASTM D558	71
3.12.1. Preparación del material	71
3.12.2. Procedimiento.....	72
3.13. Elaboración de probetas de suelo-cemento y suelo-cemento con CHB	74
3.13.1. Dosificación.....	74
3.14. Ensayo de resistencia a la compresión del suelo-cemento con CHB	77
CAPÍTULO IV	79
4. DESARROLLO DE RESULTADOS	79
4.1. Caracterización físico - mecánica del suelo tipo A-4.....	79
4.1.1 Contenido de humedad natural	79
4.1.2. Análisis granulométrico.....	79
4.1.3 Límites de Atterberg.....	80
4.1.4 Clasificación del suelo.....	81
4.1.4 Ensayo Proctor Modificado.....	84
4.1.5 Ensayo de CBR del suelo natural	85
4.2. Caracterización de la ceniza de hoja de bambú	87
4.2.1. Composición química de la ceniza	87
4.2.2. Actividad puzolánica de la ceniza de hoja de bambú.....	89

4.3. Elaboración y compactación de mezclas suelo–cemento con diferentes porcentajes de sustitución de CHB-----	90
4.3.1. Ensayo de compactación del suelo-cemento	90
4.3.2. Grado de compactación de las mezclas suelo–cemento con CHB	91
4.3.3. Análisis estadístico de la compactación	93
4.4. Resultados de la resistencia a la compresión uniaxial-----	94
4.5. Comportamiento de la resistencia con respecto al porcentaje de sustitución de CHB	97
4.7. Análisis estadístico de varianza (ANOVA) aplicado a los resultados de resistencia a la compresión -----	98
CAPÍTULO V	104
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	104
5.1. Conclusión General -----	104
5.2. Conclusiones específicas -----	104
5.3 Recomendaciones -----	106
CAPÍTULO VI	107
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	107
7. ANEXOS	111

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Símbolos y descripciones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	17
Tabla 2 Composición química de Clinker	23
Tabla 3 Productos de hidratación del cemento Portland	24

Tabla 4 Componentes del cemento y productos formados	26
Tabla 5 Etapas del proceso de hidratación y estabilización	27
Tabla 6 Requisitos típicos de cemento para varios tipos de suelo.....	29
Tabla 7 Resistencias a la compresión comunes de suelos y mezclas suelo-cemento.....	31
Tabla 8 Requisitos químicos mínimos para materiales puzolánicos según ASTM C618-19..	33
Tabla 9 Comparación de la composición química de las CHB reportadas por diferentes autores.....	39
Tabla 10 Comparación química entre el cemento Portland IP-30 y CHB.....	41
Tabla 11 Operacionalización de las variables	47
Tabla 12 Distribución de las muestras elaboradas.....	48
Tabla 13 Equipos y herramientas utilizados en los ensayos de laboratorio	50
Tabla 14 Tamaños nominales de abertura según norma ASTM	57
Tabla 15 Codificación de mezclas utilizadas en la estabilización del suelo con sustitución parcial de cemento por CHB	70
Tabla 16 Características y dosificación de las probetas suelo-cemento y suelo-cemento con CHB	74
Tabla 17 Clasificación del suelo según los sistemas AASHTO y SUCS	84
Tabla 18 Comparación de los resultados obtenidos con los requerimientos establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)	86
Tabla 19 Resultados de los ensayos de caracterización del suelo natural	87
Tabla 20 Contenido de óxido de silicio (SiO_2) en hojas de distintas especies de bambú	88
Tabla 21 Análisis de composición química de la especie de bambú: <i>Guadua Angustifolia</i> ...	89

Tabla 22 Resultados del ensayo Proctor modificado para el suelo natural y el suelo-cemento	91
Tabla 23 Resultados del de compactación promedio en probetas con diferentes porcentajes de sustitución de CHB.....	92
Tabla 24 Resultados de compactación y confiabilidad estadística.....	93
Tabla 25 valores promedio de resistencia a la compresión obtenidos a los 7 días de curado.	94
Tabla 26 Resultados corregidos del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial para las mezclas de suelo-cemento con diferentes porcentajes de CHB	96
Tabla 27 Resultados experimentales de resistencia a la compresión (mpa).....	100
Tabla 28 Análisis de varianza de una vía (ANOVA)	101
Tabla 29 Incremento porcentual de la resistencia con respecto a la mezcla de control	102
Tabla 30 Porcentaje de sustitución de CHB con mayor efecto respecto a la mezcla de control	103

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Punto de muestreo de Punto de muestreo de suelo en el Barrio 27 de Junio, ciudad de Cobija – Pando suelo	52
Figura 2 Recolección de muestras de suelo.....	53
Figura 3 Secado de la muestra y disgregación de terrones de suelo	54
Figura 4 Cuarteo de muestra de acuerdo con la norma ASTM D75	55
Figura 5 Determinación del contenido de humedad natural del suelo.	57
Figura 6 Elaboración del ensayo de Limite Liquido	59
Figura 7 Ensayo de Limite plástico	60

Figura 8 Ceniza de hoja de bambú obtenida y procesada en el laboratorio de la UMSA	66
Figura 9 Esquema del proceso de obtención de la ceniza de hoja de bambú (CHB)	68
Figura 10 Proceso de elaboración de ensayo Proctor para suelo-cemento.....	73
Figura 11 Distribución porcentual de los componentes en las mezclas suelo-cemento con sustitución parcial por CHB	75
Figura 12 Probetas elaboradas.....	76
Figura 13 Curva granulométrica.....	80
Figura 14 Sistema de clasificación de la AASHTO	82
Figura 15 Grafica de plasticidad.....	83
Figura 16 curva gráfica de humedad - peso unitario seco	85
Figura 17 Grado de compactación promedio de probetas elaboradas para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de mezclas suelo-cemento con sustitución parcial de CHB.	92
Figura 18 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial para las mezclas de suelo-cemento con CBH.....	95
Figura 19 Valores promedio de resistencia a la compresión uniaxial de las mezclas suelo- cemento con diferentes porcentajes de CHB, comparados con el mínimo permitido por la ABC ($\geq 2,5$ MPa).....	96
Figura 20 Relación entre el porcentaje de CHB y la resistencia a la compresión simple	97
Figura 21 Tabla de ANOVA Formulas	99
Figura A22. Recolección de muestras de suelo mediante calicatas.	113
Figura A23. Ensayo de límites de Atterberg y granulometría por tamizado.....	114
Figura A24. Ensayo Proctor Modificado y CBR	115

Figura B25. Recolección de hojas de bambú <i>Guadua angustifolia</i>	117
Figura B26. Recolección de hojas de <i>Bambusa vulgaris</i>	118
Figura B27. Recolección de hojas de <i>Guadua Paniculata</i>	118
Figura B28. Limpieza, secado y trituración de las hojas de bambú recolectadas	119
Figura B29. Proceso de calcinación controlada de hojas de bambú.....	120
Figura B30. Ceniza de hoja de bambú obtenida y tamizada para uso en mezclas	121
Figura B31. Porcentaje de sustitución al 2% de sustitución.....	123
Figura B32. Porcentaje de sustitución al 4% de sustitución.....	124
Figura B33. Porcentaje de sustitución al 6% de sustitución.....	124
Figura D34. Medición de las probetas y pesado antes de la rotura	127
Figura D35. Probeta fallada tras el ensayo de compresión a 7 días – 2% CHB.....	128
Figura D36. Probeta fallada tras el ensayo de compresión a 7 días – 4% CHB.....	129
Figura D37. Probeta fallada tras el ensayo de compresión a 7 días – 6% CHB.....	129
Figura E38 Planilla de contenido de humedad (ASTM D2216).....	131
Figura E39 Planilla de análisis granulométrico (ASTM D422-ASTM T889	132
Figura E40 Planilla de Límites de Consistencia (ASTM D4318 – ASTM T89)	133
Figura E41 Planilla de ensayo Proctor modificado (ASTM D1557)	134
Figura E42 Planilla de ensayo de Relacion de Soporte de California CBR (ASTM 1883 - ASTM T193)	135
Figura E43 Informe de análisis químico de especies de bambú: <i>Bambusa Vulgaris</i> y <i>Guadua Paniculata</i>	136
Figura E44 Informe de análisis químico de especie de bambú <i>Guadua Angustifolia</i>	137
Figura E45 Planilla de ensayo Proctor para mezclas de suelo-cemento (ASTM D558).....	139

Figura E46 Planilla de RCU de probetas de suelo- cemento y la sustitución parcial del cemento por CHB	140
--	-----

Figura E47 Planilla de grado de compactación de mezclas de suelo-cemento	141
---	-----

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Recolección y caracterización del suelo A-4.....	112
--	-----

Anexo B. Proceso de Obtención de la ceniza de hoja de bambú	116
--	-----

Anexo C. Preparación de las mezclas suelo–cemento–CHB	122
--	-----

Anexo D. Ensayo de resistencia a la compresión.....	126
--	-----

Anexo E. Planillas de ensayos de laboratorio	130
---	-----

Anexo F. Elaboración de presupuesto comparativo.....	143
---	-----

CAPITULO I

1. INTRODUCCION

El presente estudio tuvo como finalidad evaluar el efecto de sustituir parcialmente el cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB) en la resistencia a la compresión del suelo tipo A-4, un material común en la ciudad de Cobija y que presenta una baja capacidad portante. La investigación se fundamentó en la necesidad de contar con alternativas sostenibles para mejorar su desempeño, considerando la disponibilidad de bambú en el departamento de Pando y el potencial puzolánico de la ceniza obtenida de sus hojas.

La hipótesis planteó que la sustitución parcial del cemento por CHB en porcentajes del 2 %, 4 % y 6 % podría influir significativamente en la resistencia a la compresión del suelo-cemento. Para comprobarla, se plantearon objetivos orientados a caracterizar el suelo natural, analizar la composición química de la CHB, elaborar mezclas con diferentes porcentajes de sustitución y comparar sus resistencias con la mezcla control bajo normas ASTM.

El suelo fue clasificado como A-4(0) según AASHTO y CL-ML conforme al SUCS (Tabla 17), confirmando su baja plasticidad y la necesidad de estabilización. La CHB proveniente de *Guadua angustifolia* presentó un 83 % de sílice amorfa (Tabla 21), cumpliendo con la ASTM C618 y demostrando su potencial como material cementante suplementario.

Las mezclas de suelo-cemento y las sustituidas con CHB fueron preparadas según ASTM D1632, alcanzando en todos los casos una compactación mayor al 95 % (Tabla 23). Posteriormente, se realizaron los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial conforme a ASTM D1633.

Los resultados mostraron que la mezcla con 2 % de CHB obtuvo una resistencia similar al control, mientras que las mezclas con 4 % y 6 % alcanzaron 3,05 MPa y 3,09 MPa (Figura 19), superando el mínimo de 2,5 MPa exigido por la ABC. Esto evidenció que la CHB, especialmente en proporciones intermedias y altas, mejora la resistencia del suelo-cemento gracias a las reacciones puzolánicas que contribuyen a la formación de compuestos cementantes secundarios.

El análisis ANOVA (Tabla 28) confirmó diferencias significativas entre las dosificaciones evaluadas ($p < 0,05$), mientras que el mayor incremento relativo de resistencia se obtuvo con el 6 % de sustitución (Tabla 30), identificándose este porcentaje como el más favorable dentro del rango estudiado.

En conjunto, los resultados permitieron aceptar la hipótesis planteada y demostraron que la CHB es una alternativa viable para sustituir parte del cemento en la estabilización del suelo tipo A-4, promoviendo además el aprovechamiento de un recurso local y el desarrollo de soluciones más sostenibles para la infraestructura vial de la región.

1.1. Antecedentes

La presente investigación se fundamenta en el uso de la ceniza de hoja de bambú (CHB) como material estabilizante en suelos tipo A-4. Diversos estudios han evidenciado que la CHB posee propiedades puzolánicas capaces de mejorar las características mecánicas de los suelos tratados con cemento, especialmente en lugares tropicales donde predominan suelos finos de baja capacidad portante. A continuación, se sintetizan los principales antecedentes que sustentan esta línea de estudio.

Utodio et al. (2015), en Filipinas, evaluaron la sustitución parcial de cemento por ceniza de hoja de bambú (BLA) en bloques de laterita. Identificaron que el 5 % fue la dosificación

óptima, alcanzando aproximadamente 10.5 N/mm² de resistencia a la compresión, además de mejorar la resistencia a la penetración de agua y a la abrasión. Concluyeron que esta proporción ofrece el mejor desempeño mecánico y durabilidad en comparación con porcentajes mayores de reemplazo (p. 45).

En Indonesia, Wijaya et al. (2020), demostró que la sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB) en suelos arcillosos blandos puede reducir el consumo de cemento sin afectar de manera significativa la resistencia del material. Los autores identificaron un contenido óptimo de sustitución del 25 %, con el cual se obtuvo un incremento del CBR y una notable reducción del hinchamiento en suelos expansivos. Estos resultados evidencian que la BLAsh posee un alto potencial como material estabilizador ecológico y eficiente para la mejora de suelos de baja capacidad portante (pp. 112-115).

De igual manera, Nnochiri y Ezeokonkwo (2023) en Nigeria examinaron suelos lateríticos estabilizados con 8 % de cemento y 8 % de CHB, obteniendo un CBR del 90 % en condiciones no saturadas, lo cual confirma el potencial de la CHB como complemento en procesos de estabilización (p. 78).

En países vecinos como Perú, García Guzmán (2022) estabilizó subrasantes con 5 % de CHB y 1 % de caucho granulado, alcanzando un CBR de 20,1 % (p. 34). Este valor supera ampliamente los mínimos exigidos para suelos de subrasante en normativas viales, evidenciando el efecto positivo de la estabilización en la capacidad de soporte del suelo.

Por su parte, Paucar Moreno (2024) evaluó suelos A-4 y A-6 con 2,5 % de CHB y 2,5 % de cal, obteniendo un CBR de 7,70 % (p. 56), resultado que se aproxima al rango mínimo aceptable para subrasantes mejoradas.

Cabe señalar que la mayoría de los estudios en países vecinos se han centrado en el ensayo CBR, dado su uso tradicional en la caracterización de subrasantes. Sin embargo, la presente investigación adopta la resistencia a compresión uniaxial (RCU) como parámetro principal, al ser una medida más directa y representativa del desempeño mecánico de mezclas suelo-cemento, lo que permite evaluar con mayor precisión el efecto de la sustitución parcial de cemento por CHB en suelos A-4.

En Bolivia, Uluri Mamani (2022) analizó suelos arcillosos estabilizados con 20 % de ceniza de cáscara de arroz y cal, logrando incrementar el CBR de 0,073 a 5,50, lo que evidencia el potencial de los residuos agroindustriales locales en el mejoramiento de suelos (p. 22). No obstante, los antecedentes nacionales disponibles se han enfocado principalmente en residuos como la ceniza de cáscara de arroz, evaluados mediante ensayos de CBR.

Hasta la fecha, no se registran estudios en Bolivia que empleen específicamente la ceniza de hoja de bambú combinada con cemento para la estabilización de suelos, lo cual representa una línea de investigación aún no explorada en el país.

En la región de Cobija, Pando, no se han desarrollado investigaciones sobre el uso de CHB en suelos tipo A-4, a pesar de la disponibilidad de esta biomasa y su potencial técnico. Esta carencia científica y técnica justifica la realización del presente estudio, orientado a evaluar el efecto de la sustitución parcial de cemento por CHB en la resistencia a compresión uniaxial de suelos A-4.

De esta forma, se busca generar evidencia experimental sobre una alternativa sostenible, económica y localmente aplicable, que contribuya al mejoramiento de suelos de baja capacidad portante utilizados en infraestructura vial.

En conjunto, los estudios internacionales han demostrado que la ceniza de hoja de bambú posee propiedades puzolánicas capaces de mejorar el comportamiento mecánico de los suelos, aunque la mayoría de las investigaciones se han limitado a la evaluación mediante el ensayo CBR. En Bolivia, los trabajos sobre cenizas vegetales en estabilización de suelos son escasos y se concentran en otros residuos, sin reportes sobre la aplicación de CHB en combinación con cemento.

Esta ausencia de antecedentes nacionales evidencia una brecha de conocimiento, cuya exploración constituye el aporte principal de la presente investigación: determinar experimentalmente la influencia de la sustitución parcial de cemento por CHB en la resistencia a compresión uniaxial del suelo A-4 en Cobija, generando información técnica aplicable al desarrollo de infraestructuras viales sostenibles.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Descripción del problema

De acuerdo con estudios geotécnicos realizados en proyectos viales y tesis académicas desarrolladas en la ciudad de Cobija, se ha evidenciado la presencia recurrente de suelos clasificados como A-4, los cuales presentan baja capacidad portante, limitando el desarrollo de obras de infraestructura vial duradera y eficiente. Frente a esta problemática, la estabilización con cemento es una técnica ampliamente aplicada para mejorar el comportamiento mecánico de estos suelos.

Sin embargo, en Bolivia se han realizado investigaciones respecto al uso de cenizas vegetales como aditivos en ingeniería geotécnica. Por ejemplo, en un estudio realizado en La Paz, la estabilización de un suelo arcilloso con ceniza de carbón vegetal obtenida de cáscara de coco y almendra demostró un incremento significativo de la capacidad portante (valor

CBR), recomendando un 25 % de adición como dosificación óptima para su uso en subrasante (Condori Cuentas, 2024).

Dado que la región de Pando, y especialmente Cobija, cuenta con abundante biomasa de bambú, se plantea la posibilidad de aprovechar ceniza de hoja de bambú (CHB) como material de sustitución parcial del cemento para la estabilización de suelos A-4, con base en su contenido de sílice puzolánica.

No obstante, no existen estudios específicos para la zona de Cobija o el departamento de Pando que permitan evaluar el efecto estructural de la CHB en suelos A-4 estabilizados con cemento. Esta carencia técnica genera incertidumbre en cuanto a si la adición de CHB podría:

- Mejorar, mantener o reducir la resistencia a compresión uniaxial del suelo-cemento.
- Determinar qué porcentaje de sustitución de cemento por CHB contribuye mayor incremento de la resistencia del suelo-cemento, considerando los criterios técnicos establecidos por la ABC.

Por tanto, se hace necesaria una investigación experimental que evalúe directamente la influencia de diferentes proporciones de CHB en la resistencia a compresión uniaxial del suelo A-4 estabilizado, con el objetivo de validar su uso como una alternativa técnica localmente aplicable.

1.3. Hipótesis

La sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú en proporciones del 2%, 4% y 6% podría influir en la resistencia a la compresión uniaxial del suelo tipo A-4 estabilizado con cemento, permitiendo evaluar si dicha incorporación generar un cambio en el comportamiento del suelo-cemento.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de la sustitución parcial de cemento por ceniza de hoja de bambú en la resistencia a la compresión del suelo tipo A-4, en mezclas de suelo-cemento para su aplicación en infraestructura vial.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas del suelo tipo A-4 en su estado natural.
- Determinar la composición química y la actividad puzolánica de la ceniza de hoja de bambú, para evaluar su potencial como material cementante suplementario.
- Elaborar mezclas de suelo-cemento con 4% de cemento como base, incorporando un 2%, 4% y 6% de ceniza de hoja de bambú en sustitución parcial, siguiendo procedimientos estandarizados de preparación y curado ASTM D1632.
- Comparar el desempeño mecánico del suelo estabilizado con ceniza de hoja de bambú en comparación con el suelo-cemento tradicional, mediante ensayos de resistencia a la compresión según la norma ASTM D1633.

1.5. Justificación

1.5.1. Técnica

En la ciudad de Cobija, la construcción de vías enfrenta desafíos debido a la presencia de suelos tipo A-4, los cuales tienen una resistencia limitada para soportar cargas. Para mejorar esta condición, se utiliza comúnmente cemento como estabilizante, pero su aplicación puede optimizarse mediante el uso de materiales complementarios.

Una alternativa técnica viable es la incorporación de ceniza de hoja de bambú (CHB) como sustituto parcial del cemento en la estabilización del suelo. Esta ceniza, obtenida a partir de biomasa local, podría mejorar las propiedades del suelo al mezclarse con el cemento, generando un material más resistente.

En esta investigación se evaluará el comportamiento del suelo A-4 estabilizado con una proporción base de 4 % de cemento, y se ensayarán reemplazos parciales del 2 %, 4 % y 6 % con CHB. Los resultados permitirán determinar si esta combinación mejora la resistencia a compresión y si puede ser aplicada técnicamente en obras viales de la región.

1.5.2. Social

El desarrollo de alternativas para estabilizar suelos utilizando materiales disponibles localmente puede generar un impacto social positivo en regiones como Cobija, donde las necesidades de infraestructura vial son crecientes. En este contexto, la ceniza de hoja de bambú representa una opción accesible, ya que el departamento de Pando posee condiciones ambientales favorables como clima tropical, alta humedad y suelos propicios que permiten la reproducción natural y abundante del bambú.

El aprovechamiento de esta biomasa no solo promueve el uso de recursos propios, sino que también puede impulsar la economía local al generar oportunidades de empleo, especialmente para mano de obra no calificada, en tareas de recolección, secado, carbonización y procesamiento del material. A su vez, el empleo de este tipo de materiales en obras de estabilización promueve el uso de tecnologías sostenibles, al enfocarse en soluciones que aprovechan recursos renovables y reducen la dependencia de insumos externos.

Finalmente, mejorar las condiciones de las vías locales con técnicas sostenibles contribuye directamente al bienestar de la población, facilitando el acceso a servicios básicos, el transporte y el desarrollo de las actividades económicas en zonas urbanas y rurales.

1.6. Metodología

La metodología empleada en esta investigación es de tipo cuantitativa con un enfoque experimental aplicado, ya que se manipulan variables controladas para observar su efecto en la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y ceniza de hoja de bambú (CHB). Esta metodología fue adoptada por su adecuación a los objetivos específicos, especialmente aquellos relacionados con:

- Determinar el efecto de diferentes porcentajes de CHB como sustituto parcial del cemento.
- Comparar el desempeño mecánico del suelo estabilizado.
- Identificar el porcentaje de sustitución de cemento por ceniza de hoja de bambú que alcance o supere la resistencia a la compresión obtenida en la mezcla de control de suelo-cemento.

La aplicación de esta metodología permitirá obtener datos comparativos de resistencia del suelo tratado y análisis gráfico de resultados que facilitarán la toma de decisiones técnicas sobre su aplicabilidad en infraestructura vial.

Se trabajará con una dosificación base de 4 % de cemento, al cual se le aplicarán sustituciones del 2 %, 4 % y 6 % por CHB, con el fin de identificar la influencia de cada proporción en la resistencia a compresión uniaxial.

Para el desarrollo de la investigación experimental se emplearán herramientas y equipos del laboratorio de suelos que permitirán caracterizar y ensayar el suelo de forma controlada:

- Tamices y balanza de precisión: para análisis granulométrico y determinación de la cantidad de masa.
- Equipo para límites de Atterberg: caracterización índice de plasticidad del suelo.
- Molde Proctor modificado y martillo compactador: para obtener la densidad máxima seca y humedad óptima.
- Prensa hidráulica de carga: para la realización del ensayo de compresión uniaxial.

Estas herramientas han sido seleccionadas por cumplir con las normas ASTM y AASHTO, garantizando la correcta ejecución y validez de los resultados obtenidos.

1.7. Alcances

Este trabajo se enfoca en la evaluación experimental del uso de ceniza de hoja de bambú (CHB) como sustituto parcial del cemento en la estabilización de suelos tipo A-4, en condiciones controladas de laboratorio. Se considerará únicamente la resistencia a compresión uniaxial como parámetro de evaluación del comportamiento mecánico del suelo tratado.

Lo que incluye

- Caracterización del suelo A-4 (clasificación AASHTO y SUCS).
- Preparación de mezclas suelo-cemento-CHB en proporciones específicas.
- Ensayos Proctor modificado para determinar parámetros óptimos de compactación.
- Curado de probetas durante 7 días.
- Evaluación de resistencia mediante el ensayo de compresión uniaxial.
- Análisis comparativo entre muestras con y sin sustitución por CHB.
- Identificación del porcentaje de sustitución que presentó el mayor incremento en la resistencia a la compresión uniaxial.

Limitaciones del alcance:

- La investigación se circunscribe a ensayos de laboratorio, por lo que no contempla aplicaciones en campo ni validaciones a escala real.
- No se desarrollará diseño de pavimento ni análisis de comportamiento estructural a nivel de capas (subrasante, subbase o base).
- Los resultados estarán orientados a generar conocimiento técnico sobre la viabilidad de la CHB como sustituto parcial del cemento, sin implicar una aplicación inmediata en proyectos constructivos.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Marco teórico

El presente capítulo desarrolla los fundamentos teóricos necesarios para comprender el problema de investigación y sustentar técnicamente el uso de materiales alternativos en la estabilización de suelos. Se abordan aspectos clave sobre la clasificación y comportamiento del suelo tipo A-4, los métodos convencionales y alternativos de estabilización, así como las propiedades puzolánicas de la ceniza de hoja de bambú (CHB). Además, se describen los ensayos de laboratorio aplicables para la caracterización física y mecánica del suelo, lo cual permite establecer una base técnica sólida para la evaluación experimental propuesta.

2.1.1. Estabilización de suelos

La estabilización de suelos es una técnica que busca mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos naturales, con el fin de incrementar su capacidad portante, resistencia y durabilidad bajo condiciones de carga y clima. Según la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2007), este proceso consiste en modificar la estructura interna de los suelos para aumentar su resistencia, disminuir su deformabilidad y mejorar su durabilidad frente a variaciones de humedad o cargas externas (p. 15).

Mendieta (2011) señala que la estabilización de suelos es fundamental en la ingeniería vial, pues permite optimizar el desempeño de las bases y sub-bases de pavimentos. Su aplicación busca reducir la deformabilidad, mejorar la cohesión interna y controlar la sensibilidad a la humedad, garantizando así estructuras estables y seguras durante la vida útil de la infraestructura.

La literatura técnica distingue dos enfoques principales para estabilizar suelos:

2.1.1.1. Estabilización mecánica.

Se basa en procesos físicos como la compactación y la mezcla granulométrica. La compactación incrementa la densidad seca del suelo al reducir el volumen de vacíos, lo que aumenta su resistencia y disminuye su compresibilidad. Según la norma ASTM D1557 (2012), el ensayo Proctor modificado determina la humedad óptima y la densidad máxima de compactación, parámetros esenciales para proyectos viales. Este método resulta eficaz en suelos granulares; sin embargo, en suelos finos (como los del grupo A-4) suele ser insuficiente, por lo que se complementa con la estabilización química.

2.1.1.2. Estabilización química

Consiste en la incorporación de aditivos o ligantes que, al reaccionar con los minerales del suelo y con el agua, modifican su estructura interna para generar compuestos de mayor cohesión y resistencia. Este procedimiento es especialmente efectivo en suelos finos de baja capacidad portante, como los clasificados en el grupo A-4 según la AASHTO, que requieren refuerzo adicional para su uso en capas de base o sub-base vial (Mendieta Pacheco, 2011).

Entre los materiales más empleados se encuentran:

- **Cal:** Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es económica. Genera reacciones inmediatas de floculación y aglomeración, que mejoran la trabajabilidad, y posteriormente reacciones puzolánicas con la sílice y la alúmina del suelo, formando compuestos cementantes como Silicato de calcio hidratado (C-S-H) y Aluminato de calcio hidratado (C-A-H) que aumentan la resistencia y la durabilidad.

- **Cemento Portland:** Es uno de los estabilizantes más universales en ingeniería vial. Se emplea en determinadas proporciones para obtener mezclas homogéneas y compactas de alta resistencia y durabilidad. Durante su hidratación, genera geles de C-S-H y C-A-H que rellenan los poros, rigidizan la estructura y mejoran la resistencia frente al agua y las cargas vehiculares.
- **Cloruros de sodio y calcio:** Se aplican principalmente como impermeabilizantes y reductores de polvos en suelos arcillosos o limosos. Estos compuestos absorben la humedad ambiental, mejoran la cohesión superficial y reducen la plasticidad, contribuyendo a estabilizar caminos no pavimentados.
- **Productos asfálticos:** Emulsiones utilizadas para estabilizar materiales sin cohesión, como las bases granuladas. Reducen la permeabilidad del suelo y mejoran la vida útil de las capas superiores.
- **Materiales puzolánicos y aditivos especiales:** Comprenden subproductos industriales y residuos vegetales ricos en sílice o alúmina, como la ceniza volante, la ceniza de cáscara de arroz y, más recientemente, la ceniza de hoja de bambú. Estas adiciones reaccionan con el hidróxido de calcio liberado en la hidratación del cemento, formando compuestos cementantes adicionales que mejoran la resistencia y permiten reducir el consumo de cemento. Representan, por tanto, una alternativa técnica y ambientalmente sostenible en comparación con los aditivos convencionales (Flórez-Góngora, 2008; ScienceDirect, 2024).

El mecanismo de estabilización química se puede resumir en tres procesos principales:

1. Intercambio iónico y floculación inmediata, que mejora la textura del suelo y reduce la plasticidad.
2. Hidratación del cemento a corto plazo, que genera compuestos cementantes responsables de la resistencia inicial.
3. Reacciones puzolánicas a mediano y largo plazo, que forman productos adicionales de C-S-H y C-A-H, aumentando la resistencia, reduciendo la porosidad y mejorando la durabilidad.

La efectividad de la estabilización química depende de tres factores clave: el tipo de suelo, la selección del aditivo y su dosificación adecuada. A esto se suman la correcta mezcla, compactación y curado, procesos indispensables para lograr resultados satisfactorios. Cuando estas condiciones se cumplen, la estabilización química permite mejorar significativamente la resistencia, la durabilidad, la impermeabilidad y la capacidad del suelo para soportar el tránsito repetitivo.

2.1.2. Relevancia de la estabilización en obras viales

El comportamiento del suelo es determinante en la construcción de carreteras. Cuando un suelo presenta alta plasticidad, baja resistencia o excesiva variación volumétrica, puede comprometer la estabilidad y reducir la vida útil de la infraestructura. En estas condiciones, la estabilización se convierte en una solución técnica necesaria.

De acuerdo con Firoozi et al. (2017), el uso de agentes estabilizantes como cemento, cal o fibras naturales incrementa la resistencia, reduce la plasticidad y minimiza las deformaciones (p. 12). Estos beneficios se traducen en pavimentos más estables, con menor riesgo de fallas prematuras y con costos de mantenimiento más bajos a lo largo de su vida útil.

2.1.3. Clasificación y caracterización de suelos

El conocimiento y correcta clasificación de los suelos son esenciales para cualquier proyecto de ingeniería civil, ya que permiten identificar sus propiedades, comportamiento y posibles limitaciones ante cargas o condiciones ambientales. En obras viales, esta información resulta determinante para el diseño y la estabilización de capas estructurales como la subrasante, la base y la subbase.

2.1.3.1. Definición de suelo.

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre, formada por la desintegración física y química de las rocas, junto con materia orgánica en constante transformación. Está compuesto por minerales, agua, aire y, en algunos casos, componentes biológicos, que determinan sus propiedades físicas y mecánicas (Whitlow, 1994).

Desde la perspectiva de la ingeniería civil, el suelo se considera un material natural no consolidado, cuya composición y estructura influyen directamente en su comportamiento ante cargas. Su análisis se centra en características como granulometría, plasticidad, densidad y resistencia, las cuales determinan su capacidad para servir como subrasante, base o subbase en obras viales (Das, 1999; Mendieta, 2011).

En términos prácticos, el suelo se comporta como un sistema trifásico compuesto por partículas sólidas, agua y aire. La proporción entre estas fases define su estabilidad: un exceso de humedad reduce su resistencia, mientras que una compactación adecuada mejora su capacidad portante. Por ello, conocer sus propiedades es esencial para aplicar métodos de estabilización que optimicen su desempeño en proyectos de infraestructura.

2.1.3.2. *Sistemas de clasificación de suelos.*

La clasificación de suelos tiene como propósito identificar su comportamiento ingenieril y prever su respuesta ante cargas. Los sistemas más empleados son el AASHTO y el SUCS, que agrupan los suelos según su granulometría, plasticidad y contenido de finos.

2.1.3.2.1. *Sistema AASHTO.*

El sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) clasifica los suelos en ocho grupos, del A-1 al A-8, considerando la granulometría, los límites de Atterberg y el Índice de Grupo (IG). Este último expresa la calidad del suelo como subrasante: valores bajos indican buena capacidad portante, mientras que valores altos sugieren la necesidad de estabilización (Das, 2012).

- A-1 a A-3: suelos granulares con alta capacidad portante, como arenas y gravas.
- A-4 a A-7: suelos finos (limos y arcillas) con resistencia intermedia o baja.
- A-8: suelos orgánicos, generalmente inadecuados para pavimentos.

2.1.3.2.2. *Sistema SUCS (Unified Soil Classification System).*

El SUCS clasifica los suelos según granulometría y plasticidad, utilizando símbolos normalizados como los de la siguiente tabla:

Tabla 1

Símbolos y descripciones del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Símbolo	Descripción
G	Grava
S	Arena
M	Limo
C	Arcilla
O	Material orgánico
Pt	Turba
W	Bien graduado
P	Mal graduado
L	Baja plasticidad

H

Alta plasticidad

Nota. Adaptado de Principios de mecánica de suelos (7ª ed.) por B. M. Das, 2012, Cengage Learning.

Esta denominación permite describir con precisión la textura y plasticidad del suelo, siendo útil en la planificación de obras viales y estudios geotécnicos (Das, 2012, pp. 19–24).

2.1.4. Propiedades físicas de suelos finos.

Los suelos finos se caracterizan por su alta capacidad de retención de agua, cohesión moderada y baja permeabilidad. Estas propiedades les proporcionan cierta estabilidad, pero también los hacen sensibles a los cambios de humedad, provocando expansiones o retracciones que afectan su comportamiento estructural.

Las principales propiedades a considerar son

2.1.4.1. Granulometría (ASTM D422).

Determina la proporción de partículas gruesas y finas, influyendo en la compactación, permeabilidad y capacidad portante del suelo. Según Das (2012), “en cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían en gran medida. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. La distribución granulométrica de un suelo de grano grueso se determina por lo general mediante un análisis granulométrico con mallas” (p. 2). Esta información permite definir la textura y comportamiento del suelo bajo carga, siendo fundamental en los procesos de clasificación y diseño de mezclas suelo-cemento.

2.1.4.2. Límites de Atterberg (ASTM D4318)

Describen el comportamiento del suelo en función de su contenido de humedad, identificando las transiciones entre los estados líquido, plástico, semisólido y sólido. De acuerdo con Das (2012), “cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de

agua, puede fluir como un semilíquido. Si el suelo se seca gradualmente, se comportará como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de humedad” (p.15).

El contenido de humedad en el que el suelo pasa del estado líquido al plástico se denomina límite líquido (LL), mientras que el cambio del estado plástico al semisólido se conoce como límite plástico (LP).

El índice de plasticidad (IP), se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico e indica el rango de humedad en el cual el suelo puede deformarse sin romperse.

2.1.5. Propiedades mecánicas de los suelos

Las propiedades mecánicas permiten evaluar el comportamiento de un suelo frente a cargas aplicadas, determinando su capacidad para resistir esfuerzos y deformaciones en obras de infraestructura vial. Entre los ensayos más empleados para esta evaluación se encuentran el Proctor y el CBR, ambos fundamentales en el diseño y control de capas estructurales.

2.1.5.1. Ensayo Proctor (ASTM D1557 – Compactación modificada)

Este ensayo establece la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca alcanzada por un suelo al ser compactado bajo una energía controlada. Su objetivo es determinar la humedad óptima de compactación y la densidad seca máxima, parámetros esenciales para lograr una compactación eficiente en campo. La humedad óptima representa el punto en el que el suelo puede alcanzar su mayor densidad con un esfuerzo mínimo, mientras que la densidad seca máxima refleja la compactación más eficiente posible para las condiciones de ensayo.

2.1.5.2. Ensayo CBR California Bearing Ratio (ASTM D1883)

El ensayo CBR mide la capacidad de soporte del suelo, comparando su resistencia a la penetración con la de un material patrón. Los resultados se expresan como un porcentaje que

indica la capacidad relativa del suelo para resistir cargas aplicadas. Este parámetro es clave en el diseño de pavimentos, ya que permite estimar el espesor necesario de las capas estructurales para garantizar un desempeño adecuado frente al tránsito repetitivo.

2.1.6. Características del suelo tipo A-4

De acuerdo con el sistema de clasificación, el suelo tipo A-4 pertenece al grupo de suelos finos, conformado principalmente por limos con algo de arena o limos arcillosos de baja plasticidad. Presenta un porcentaje de finos que pasa por el tamiz N°200 superior al 35%, con límites de Atterberg moderados y un índice de grupo (IG) que suele oscilar entre 4 y 10, lo que indica una capacidad de soporte media a baja (AASHTO M 145, 2012).

En el sistema SUCS los, suelos con características equivalentes al tipo A-4 suelen clasificarse como ML (limos de baja plasticidad) o, en algunos casos, CL-ML (mezcla de limos y arcillas de baja plasticidad). Estos suelos presentan comportamiento no plástico o ligeramente plástico, con una textura suave y una tendencia a retener humedad, lo que puede generar pérdida de estabilidad volumétrica en condiciones saturadas.

Respecto a sus propiedades mecánicas el suelo A-4 suele presentar una densidad seca máxima baja y una humedad óptima de compactación relativamente alta, lo que refleja su comportamiento durante el proceso de compactación. Esto significa que, incluso aplicando una energía considerable, el suelo no alcanza una gran densidad debido a su predominancia de partículas finas, las cuales no se interconectan fácilmente. Asimismo, requiere un mayor contenido de agua para facilitar la reorganización de las partículas durante la compactación, ya que su estructura limosa tiende a absorber humedad. En conjunto, estas características indican una compactación menos eficiente y una sensibilidad moderada a las variaciones de

humedad, aspectos que limitan su desempeño en capas estructurales si no se aplica un tratamiento de estabilización adecuado.

Según Das (2012), los suelos limosos con características A-4 tienden a presentar una plasticidad baja a media, con un índice de plasticidad (IP) generalmente menor a 12. Aunque son menos expansivos que los suelos arcillosos (A-6 o A-7), su estructura interna suelta y baja cohesión limitan su comportamiento frente a cargas repetitivas y su durabilidad en presencia de agua.

Comprender las propiedades físicas y mecánicas del suelo tipo A-4 permite justificar su tratamiento mediante estabilización química, especialmente en regiones como Cobija, donde este tipo de suelo es común en las zonas de emplazamiento de las vías.

2.1.7. Presencia del suelo A-4 en Cobija

En la ciudad de Cobija, ubicada en el norte amazónico de Bolivia, predominan suelos arcillosos y limosos, entre los cuales el tipo A-4 es uno de los más frecuentes. Este tipo de suelo ha sido identificado en diversos estudios geotécnicos de tesis y proyectos viales desarrollados en la región.

Por ejemplo, Pinto y Machado (2023), en su tesis sobre la Propuesta de dosificación de material para capa base y subbase en pavimento flexible, determinaron la presencia mayoritaria de suelos A-4 en el tramo “Cruce Villa Bush – Villa Fátima”. Asimismo, Puerta Da Silva (2024), en su investigación Evaluación de la resistencia del suelo-cemento con ensayos de compresión simple y esclerometría, corroboró que los suelos limosos de baja plasticidad (A-4) son comunes en las subrasantes de Cobija, donde su comportamiento mecánico limitado exige la aplicación de técnicas de estabilización.

La presencia de este tipo de suelo plantea desafíos técnicos para la construcción de pavimentos por lo que la estabilización con cemento y la sustitución parcial por ceniza de hoja de bambú (CHB) surge como una alternativa para incrementar la capacidad portante, mejorar la resistencia a la compresión y reducir la deformabilidad del suelo A-4.

2.1.8. Estabilización con cemento

La estabilización de suelos con cemento es una técnica utilizada desde comienzos del siglo XX para mejorar las propiedades mecánicas de suelos con baja capacidad portante. En 1917, Joseph Hay Amies patentó una mezcla denominada Soilamies, considerada una de las primeras aplicaciones formales del suelo-cemento. Esta innovación consistía en combinar suelo natural con cemento Portland para crear una base estable y económica destinada a pavimentos, marcando el inicio del uso sistemático del suelo-cemento en la ingeniería vial moderna (Montejo, 2011, p. 113).

Desde entonces, esta técnica ha evolucionado y se ha adaptado a diferentes tipos de suelos, convirtiéndose en una práctica habitual en proyectos viales de todo el mundo.

2.1.8.1. Definición y composición del cemento Portland

El cemento Portland es un material inorgánico finamente pulverizado que, al mezclarse con agua, forma una pasta capaz de fraguar y endurecer tanto en el aire como bajo el agua. Según la ASTM C150, su composición fundamental proviene de una mezcla calcinada de materias primas ricas en cal (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃). Estos óxidos se someten a temperaturas cercanas a 1450 °C para formar el clínker, el componente base del cemento.

- a) Materias primas del cemento Portland

De acuerdo con Mindess & Young y PSU Engineering, las principales fuentes de óxidos son:

- Cal (CaO): piedra caliza
- Sílice (SiO₂): arena o arcilla
- Alúmina (Al₂O₃): bauxita o arcillas.
- Óxido de hierro (Fe₂O₃): arcilla, minerales de hierro o cenizas industriales.
- Yeso (CaSO₄·2H₂O): agregado posteriormente para controlar el fraguado.

Tras la dosificación, molienda y calcinación, los componentes reaccionan formando cuatro fases principales del clínker, sintetizadas mediante notación abreviada:

Tabla 2

Composición química de Clinker

Compuesto	Fórmula	Función principal
Silicato tricálcico	C ₃ S	Desarrolla la resistencia inicial y libera alto calor de hidratación.
Silicato dicálcico	C ₂ S	Contribuye a la resistencia tardía.
Aluminato tricálcico	C ₃ A	Acelera el fraguado; el yeso controla su reacción.
Ferroaluminato tetracálcico	C ₄ AF	Actúa principalmente en la estabilidad del fraguado y aporta coloración al cemento.

Nota. Adaptado de *Composition of cement* (n.d.), Pennsylvania State University, College of Engineering, Elaboración propia.

Cuando el cemento Portland entra en contacto con el agua, los compuestos del clínker (C₃S, C₂S, C₃A y C₄AF) reaccionan químicamente, dando lugar a productos de hidratación que definen la resistencia y la durabilidad del material. Los principales compuestos generados se observan en la Tabla 3.

Tabla 3
Productos de hidratación del cemento Portland

Producto de hidratación	Fórmula / Sigla	Origen (fase del clínker)	Función principal en la pasta de cemento
Silicato cálcico hidratado	C-S-H	Hidratación de C ₃ S y C ₂ S	Principal responsable de la resistencia mecánica. Rellena poros, une partículas y densifica la matriz, reduciendo la permeabilidad.
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	Hidratación de C ₃ S y C ₂ S	Producto secundario típico del cemento Portland.
Aluminato cálcico hidratado	C-A-H	Hidratación de C ₃ A	Contribuye al fraguado inicial y aporta cohesión temprana. Asociado al calor de hidratación inicial.
Ferrito cálcico hidratado	C-F-H	Hidratación de C ₄ AF	Aporta estabilidad química al sistema y participa marginalmente en el desarrollo de resistencia.

Nota. Elaboración propia basada en Mehta & Monteiro (2014) y Neville (2011).

Mediante esta composición y a las reacciones de hidratación que desarrolla, el cemento Portland actúa como un ligante hidráulico, capaz de transformar suelos sueltos o de baja capacidad portante en materiales rígidos, cohesivos y duraderos, adecuados para su aplicación en capas estructurales de pavimentos y obras geotécnicas.

2.1.8.2. Concepto y finalidad del suelo-cemento

El suelo-cemento es una mezcla densamente compactada de suelo natural o agregado, cemento Portland o una combinación de cemento con otros materiales cementantes y agua, que al ser compactada y curada adecuadamente, adquiere propiedades de resistencia y durabilidad superiores a las del suelo original. De acuerdo con la American Cement Association (ACA, 2020), el suelo-cemento, aunque inicialmente presenta la apariencia de un suelo común, durante la compactación y el curado, el cemento reacciona con el agua y une las partículas del

suelo, formando una matriz endurecida que mejora significativamente su comportamiento mecánico.

Este material recibe distintas denominaciones según su aplicación o composición, como base estabilizada con cemento, base tratada con cemento, suelo tratado con cemento o incluso hormigón de tierra; sin embargo, los principios que rigen su elaboración y desempeño estructural son los mismos (ACA, 2020). En esencia, la adición de cemento busca modificar la estructura interna del suelo para mejorar su estabilidad volumétrica, su capacidad portante y su resistencia a la humedad y al tránsito vehicular.

La aplicación del suelo-cemento en la ingeniería vial persigue los siguientes objetivos fundamentales:

- Incrementar la capacidad portante del suelo, permitiendo su empleo en capas estructurales como subbases o bases de pavimentos.
- Reducir la plasticidad y la variabilidad volumétrica, minimizando problemas de expansión o contracción por cambios de humedad.
- Aumentar la durabilidad, frente a condiciones climáticas adversas y ciclos de humedecimiento-secado.
- Aprovechar los materiales locales, reduciendo costos de transporte y el impacto ambiental asociado al uso de agregados externos.

Gracias a estas ventajas, el suelo-cemento se considera una técnica sostenible y económicamente viable de estabilización, especialmente útil en regiones donde los suelos naturales presentan baja capacidad portante

2.1.8.3. Hidratación del cemento en el suelo: reacciones químicas, interacción suelo–cemento y formación de geles cementantes.

El proceso de estabilización con cemento se basa en una serie de reacciones químicas de hidratación e hidrólisis que ocurren cuando el cemento Portland entra en contacto con el agua y los minerales del suelo. Estas reacciones producen compuestos cementantes que incrementan la cohesión y resistencia del material tratado.

Durante la hidratación, los principales componentes del cemento, silicato tricálcico (C_3S) y silicato dicálcico (C_2S) reaccionan con el agua para formar silicatos de calcio hidratados ($C-S-H$), responsables de la resistencia y la unión entre partículas del suelo. También se genera hidróxido de calcio [$Ca(OH)_2$], un subproducto que actúa como fuente de iones calcio (Ca^{2+}) en el sistema (Mehta & Monteiro, 2014, p. 115).

Tabla 4
Componentes del cemento y productos formados

Componente del cemento	Fórmula	Producto de hidratación	Función en el suelo estabilizado
Silicato tricálcico	C_3S	$C-S-H + Ca(OH)_2$	Resistencia temprana
Silicato dicálcico	C_2S	$C-S-H + Ca(OH)_2$	Resistencia a largo plazo
–	–	$Ca(OH)_2$	Fuente de Ca^{2+} para floculación y reacciones puzolánicas

Nota. Elaboración propia basado en Mehta & Monteiro, 2014, p. 115.

Al mismo tiempo, los iones de calcio liberados por el cemento actúan sobre las partículas finas del suelo, que normalmente tienen cargas eléctricas negativas. Estos iones ayudan a neutralizar esas cargas, haciendo que las partículas se acerquen y formen pequeños grupos o aglomerados. Este proceso, conocido como floculación, mejora la estructura del suelo, facilita

su compactación y permite obtener una mezcla más densa y estable durante la construcción (Montejo, 2011, p. 113).

A medida que avanza el tiempo de curado, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puede reaccionar con óxidos de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) presentes en el suelo o en materiales puzolánicos añadidos, generando silicato de calcio hidratado (C–S–H) y aluminatos cálcicos hidratados (C–A–H) adicionales. Estos compuestos cementantes rellenan vacíos, reducen la porosidad y consolidan una matriz más densa y rígida.

Tabla 5
Etapas del proceso de hidratación y estabilización

Etapas	Tiempo aproximado	Reacciones predominantes	Efectos en el material
Inicial	Horas	Hidratación rápida del C_3S y floculación	Cohesión temprana
Intermedia	Días	Formación de geles C–S–H y C–A–H	Desarrollo de resistencia básica
Maduración	Semanas a meses	Reacciones puzolánicas continuas	Mayor durabilidad y menor permeabilidad

Nota. Elaboración propia basado en Mehta & Monteiro, 2014.

La hidratación del cemento no solo une las partículas del suelo, sino que transforma su microestructura, convirtiendo un material natural de baja capacidad portante en una masa endurecida, resistente al agua y adecuada para aplicaciones en subrasantes, subbases y capas de base de pavimentos.

2.1.8.4. Dosificación y procedimiento de mezcla

El proceso de dosificación y preparación del suelo-cemento constituye una etapa crítica para garantizar el desarrollo adecuado de las propiedades mecánicas del material estabilizado. De acuerdo con la Portland Cement Association (PCA, 2002) y el American Concrete Institute

(ACI, 2009), la determinación del contenido de cemento debe basarse principalmente en la resistencia a la compresión no confinada, definida mediante el ensayo ASTM D1633, y en la evaluación de la trabajabilidad del material durante la compactación.

El cemento puede emplearse para estabilizar distintos tipos de suelos, especialmente los arenosos y arcillosos de baja plasticidad, ya que reduce el límite líquido y mejora la trabajabilidad. Esta técnica es más efectiva cuando el límite líquido es menor que 45–50 y el índice de plasticidad no supera 25, condiciones que favorecen una adecuada reacción entre el suelo y el cemento (Das, 2012, p. 765).

Según el American Concrete Institute (ACI 230.1R-09), la mayoría de los suelos pueden estabilizarse con cemento, excepto aquellos con alta plasticidad o elevado contenido de materia orgánica, ya que estos factores interfieren en las reacciones de hidratación. El contenido óptimo de cemento varía entre 3 % y 16 % del peso seco del suelo, dependiendo de su textura, plasticidad y condiciones del terreno. En suelos finos, como los clasificados A-4 y A-5, se recomiendan dosificaciones entre 7 % y 13 %, mientras que en suelos granulares los valores típicos oscilan entre 3 % y 8 %.

A continuación, en la Tabla 6, se presentan los requisitos típicos de contenido de cemento para distintos tipos de suelos, según lo establecido por el American Concrete Institute (ACI 230.1R-09). Estos valores constituyen referencias orientativas que facilitan la selección de la dosificación más adecuada en función de la textura, plasticidad y comportamiento mecánico del suelo.

Tabla 6
Requisitos típicos de cemento para varios tipos de suelo

Suelo AASHTO (clasificación)	Clasificación de suelos ASTM	Rango típico de requisitos de cemento (% en peso)	Contenido típico de cemento para la prueba de humedad-densidad (ASTM D558) (% en peso)
A-1-a	GW, GP, GM, SO, SP, SM	3 – 5	5
A-1-b	GM, mezcla de calcareas, SW, SP	5 – 8	6
A-2	GM, GC, SM, SC	5 – 9	7
A-3	SP	7 – 11	9
A-4	CL, ML	7 – 12	10
A-5	ML, MH, CH	8 – 13	11
A-6	CL, CH	9 – 15	12
A-7	CH	10 – 16	13

Nota. Adaptado del *Informe del Comité de ACI (230.1R-10): Guía para la construcción con suelo-cemento*, American Concrete Institute (2010).

a) Determinación del contenido óptimo de cemento.

Se define mediante ensayos de resistencia a la compresión (ASTM D1633), buscando resistencias mínimas de aproximadamente 1.5 MPa (15.3 kg/cm²) a los 7 días para capas de subrasante estabilizada, y valores entre 2.0 MPa (20.4 kg/cm²) y 2.5 MPa (25.5 kg/cm²) para capas de base o subbase (ACI, 1997).

b) Preparación y mezclado.

Se elimina el material vegetal y se homogeneiza el suelo. Luego, el cemento seco se distribuye de manera uniforme antes de agregar el agua hasta alcanzar la humedad óptima.

c) Compactación.

En laboratorio, la compactación del suelo-cemento se realiza conforme al ensayo Proctor estándar (ASTM D 558), el cual establece la relación entre la densidad seca y el contenido de humedad del material. Este procedimiento consiste en compactar la mezcla dentro de un

molde de volumen conocido mediante golpes de un martillo estandarizado, aplicados en capas sucesivas.

El objetivo es alcanzar la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación, condiciones que garantizan una estructura densa, con menor cantidad de vacíos y mayor resistencia a la compresión.

Durante la elaboración de las probetas, la mezcla debe prepararse y compactarse dentro de un periodo máximo de dos horas después del mezclado, para evitar la pérdida de trabajabilidad del material y asegurar una distribución uniforme del cemento hidratado (Montejo, 2011; ASTM D698).

d) Curado.

Tras la compactación, el material debe mantenerse húmedo durante un período mínimo de 7 a 28 días, de acuerdo con la norma ASTM D1633, permitiendo que las reacciones de hidratación del cemento se desarrollen completamente y la mezcla alcance la resistencia proyectada (Montejo, 2011).

La calidad del suelo-cemento depende no solo del contenido de cemento, sino también del control adecuado de la compactación y el curado, factores esenciales para lograr las resistencias requeridas. A continuación, se presentan en la Tabla 7 valores de resistencia a la compresión típicos para suelos y mezclas suelo-cemento, los cuales sirven como referencia en el diseño y evaluación de estabilizaciones con cemento.

Tabla 7
Resistencias a la compresión comunes de suelos y mezclas suelo-cemento

Material	Intervalo de la resistencia a la compresión simple (kN/m²)	Intervalo de la resistencia a la compresión simple (MPa)
Suelo sin tartar		
Arcilla, turba	Menos de 350	Menos de 0,35
Arcilla arenosa bien compactada	70 – 280	0,07 – 0,28
Grava, arena y mezclas arcillosas bien compactadas	280 – 700	0,28 – 0,70
Suelo-cemento (10 % de cemento en peso)		
Arcilla, suelos orgánicos	Menos de 350	Menos de 0,35
Limos, arcillas limosas, arenas muy mal graduadas, suelos ligeramente orgánicos	350 – 1050	0,35 – 1,05
Arcillas limosas, arcillas arenosas, arenas muy mal graduadas y gravas	700 – 1730	0,70 – 1,73
Arenas limosas, arcillas arenosas, arenas y gravas	1730 – 3460	1,73 – 3,46
Mezclas de arena-arcilla o grava-arena-arcilla bien graduadas y arenas y gravas	3460 – 10 350	3,46 – 10,35

Nota. Adaptado de Mitchell, J. K., & Freitag, D. R. (1959). *A Review and Evaluation of Soil-Cement Pavements. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 85, núm. SM6, pp. 49–73. Citado por Das (2012, p. 766).

En conjunto, el desempeño del suelo-cemento depende de diversos factores, entre los que destacan el tipo de suelo, la proporción de cemento, el contenido de agua, la compactación y el curado. Estos parámetros, tratados en los apartados anteriores, son determinantes para alcanzar la densidad, resistencia y durabilidad requeridas en las capas estructurales viales. Su control adecuado asegura el desarrollo óptimo de las propiedades mecánicas del material estabilizado (Montejo, 2011; ACI 230.1R-09).

2.1.9. Materiales cementantes suplementarios (puzolanas)

2.1.9.1. Definición de puzolana

De acuerdo con Mehta y Monteiro (2014), una puzolana es un material silíceo o silicoaluminoso que, por sí solo, posee poca o ninguna capacidad cementante, pero que, finamente dividido y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio $[Ca(OH)_2]$ liberado durante la hidratación del cemento Portland, formando compuestos con propiedades cementantes como el silicato de calcio hidratado (C–S–H) y el aluminato cálcico hidratado (C–A–H).

Massazza y Costa (1977) definen las puzolanas como materiales que contienen sílice reactiva en forma amorfa, capaz de combinarse con la cal para generar productos estables y resistentes, contribuyendo a la durabilidad de los conglomerados hidráulicos. En términos normativos, la ASTM C618-19 las clasifica como “materiales naturales o calcinados que, al reaccionar con el hidróxido de calcio, producen compuestos con propiedades cementantes” (ASTM International, 2019, p. 2).

2.1.9.2. Clasificación de puzolanas

Las puzolanas pueden clasificarse según su origen en naturales y artificiales (Luxán & Sánchez de Rojas, 1985):

- a) **Puzolanas naturales:** Se encuentran en la naturaleza, ya sea como rocas volcánicas (tobas, pumitas) o como residuos vegetales calcinados (como la ceniza de cáscara de arroz o la ceniza de hoja de bambú).
- b) **Puzolanas artificiales:** Proviene de procesos industriales, como la ceniza volante (fly ash), la escoria granulada de alto horno, o los humos de sílice generados en la producción de silicio metálico.

Esta clasificación permite identificar el tipo de activación térmica o química necesaria para que el material desarrolle su reactividad puzolánica. En el caso de las puzolanas vegetales, el proceso de calcinación es esencial para transformar la sílice orgánica en sílice amorfa reactiva (Mehta & Monteiro, 2014).

2.1.9.3. *Propiedades químicas y mineralógicas de las puzolanas*

La reactividad de una puzolana depende principalmente de su composición química y del grado de amorfismo de la sílice y la alúmina presentes.

Según la ASTM C618-19, un material puzolánico debe cumplir los siguientes requisitos químicos mínimos:

Tabla 8

Requisitos químicos mínimos para materiales puzolánicos según ASTM C618-19

Clase	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%) mín.	SO ₃ (%) máx.	Humedad (%) máx.	Pérdida por ignición (%) máx.
N (natural o calcinada)	70.0	4.0	3.0	10.0
F (ceniza volante de carbón bituminoso o antracita)	50.0	5.0	3.0	6.0
C (ceniza volante de lignito o sub-bituminosa)	50.0	5.0	3.0	6.0

Nota. Adaptado de ASTM C618-19: Especificación estándar para ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón (ASTM International, 2019).

El contenido combinado de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ debe superar el 70 % para las puzolanas naturales (Clase N). Además, una baja pérdida por ignición (≤ 10 %) indica un nivel adecuado de combustión y una menor presencia de materia orgánica.

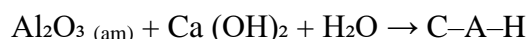
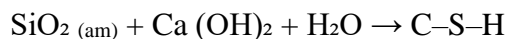
En términos mineralógicos, la presencia de sílice amorfa es esencial, ya que este tipo de sílice presenta una estructura atómica más desordenada, lo que facilita su reacción con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Massazza & Costa, 1977).

2.1.9.4. Reacciones puzolánicas en presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Las reacciones puzolánicas ocurren cuando los materiales ricos en sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3) reaccionan con el hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] liberado durante la hidratación del cemento Portland. Este proceso genera nuevos compuestos cementantes, como los silicatos de calcio hidratados (C–S–H) y los aluminatos cálcicos hidratados (C–A–H), responsables de mejorar la cohesión, densidad y resistencia del material estabilizado (Mehta & Monteiro, 2014, p. 115).

Durante estas reacciones, la sílice y la alúmina presentes en las cenizas o en otras fuentes puzolánicas se disuelven en el medio alcalino proporcionado por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Posteriormente, los iones de calcio (Ca^{2+}), silicio (Si^{4+}) y aluminio (Al^{3+}) se combinan para formar una matriz cementante secundaria que refuerza la estructura del suelo-cemento (Massazza & Costa, 1977; Luxán & Sánchez de Rojas, 1985).

Estas reacciones se conocen como reacciones puzolánicas, y pueden representarse de manera general así:



Es importante recalcar que la sílice amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot \text{am}$) y la alúmina amorfa ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{am}$) indicadas con el subíndice (am) que significa “amorfo”, son las formas más reactivas de estos compuestos. Su falta de estructura cristalina permite una mayor superficie de contacto y una disolución más rápida en medios alcalinos, lo que favorece la formación de los productos

cementantes. En cambio, las formas cristalinas de la sílice (como el cuarzo) presentan una reactividad muy baja debido a su estructura estable y ordenada.

De forma sencilla, las puzolanas reaccionan con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ liberado por el cemento, transformándolo en compuestos cementantes activos como el C-S-H y el C-A-H. De esta manera, actúan como un refuerzo químico que mejora la resistencia y durabilidad del material sin aumentar la cantidad de cemento. Con el tiempo de curado, estas reacciones densifican la mezcla, reducen la porosidad y fortalecen la estructura a largo plazo.

2.1.9.5. Factores que influyen en la reactividad puzolánica

La reactividad de una puzolana depende de diversos factores fisicoquímicos (Massazza & Costa, 1977; Luxán & Sánchez de Rojas, 1985):

- **Composición química:** alto contenido de sílice y alúmina favorece la reactividad
- **Estructura amorfa:** cuanto mayor es el grado de desorden estructural, mayor es la capacidad de reacción.
- **Finura:** las partículas finas presentan mayor superficie específica para reaccionar.
- **Temperatura de calcinación:** debe situarse entre 600 y 800 °C, rango en el que la sílice vegetal se vuelve amorfa y altamente reactiva.
- **Tiempo de curado:** aunque las reacciones puzolánicas tienden a desarrollarse de manera progresiva, los efectos más representativos pueden observarse desde las primeras edades de curado, dependiendo del tipo de material y su grado de finura.

2.1.9.7. Tratamientos térmicos en la obtención de cenizas puzolánicas

La efectividad de las puzolanas artificiales depende del tratamiento térmico aplicado durante su calcinación. Luxán y Sánchez de Rojas (1985) destacan que el proceso de calcinación debe eliminar la materia orgánica y transformar la sílice cristalina en sílice amorfa sin llegar a la sinterización. El rango óptimo de temperatura se encuentra entre 600 °C y 800 °C, donde la estructura se vuelve más reactiva.

En temperaturas mayores a 900 °C, la sílice tiende a recristalizarse, reduciendo su actividad puzolánica. Por ello, el control térmico es crucial para garantizar un material reactivo y estable.

Dentro de las puzolanas naturales derivadas de biomasa destaca la ceniza de hoja de bambú (CHB), la cual presenta una composición rica en sílice amorfa.

2.1.10. Ceniza de hoja de bambú (CHB)

2.1.10.1. El bambú: definición, especies y aprovechamiento en Bolivia y Latinoamérica

El bambú es una planta perenne perteneciente a la familia Poaceae, reconocida por sus tallos huecos y segmentados, su rápido crecimiento y su alta resistencia mecánica. Estas características lo convierten en un material versátil, renovable y de gran valor ecológico, empleado en sectores como la construcción, la artesanía, la elaboración de muebles, la producción de papel y la restauración ambiental (Tecnología del Bambú, 2023).

En el ámbito latinoamericano, los géneros *Bambusa* y *Guadua* son los más representativos, distribuyéndose ampliamente en regiones tropicales y subtropicales de Colombia, Ecuador, Perú, Brasil y Bolivia. Entre las especies más destacadas se encuentra *Guadua angustifolia* Kunth, reconocida por su excelente relación resistencia-peso, alcanzando hasta 30 m de altura

y 25 cm de diámetro. Su flexibilidad y capacidad de absorber energía la convierten en un material idóneo para construcciones sismorresistentes y proyectos de arquitectura sostenible.

En Bolivia, los bambudales se extienden desde la Reserva de Tahuamano (departamento de Pando) hasta los bosques yungueños y el Chapare, pasando por las serranías del Iñaño (Chuquisaca) y de Aguaragüe (Tarija), además de las llanuras chiquitanas y benianas. La Reserva de Tahuamano abarca cerca de cinco millones de hectáreas de bambudales, formando parte de un corredor ecológico binacional que se prolonga hacia Brasil y Perú (Tecnología del Bambú, 2023).

En cuanto a las especies presentes en el país, se han identificado principalmente *Bambusa vulgaris*, *Guadua paniculata* y *Guadua angustifolia*, siendo esta última de particular interés por su potencial en aplicaciones estructurales. En la Estación Experimental de Sapecho, ubicada en la provincia Sud Yungas del departamento de La Paz, Mamani Mollo (2018) evaluó la propagación de *Guadua angustifolia* Kunth y *Guadua angustifolia* Bicolor mediante distintos segmentos vegetativos, confirmando su adaptación y viabilidad en condiciones tropicales húmedas del país. Estos resultados confirman la presencia y posibilidad de aprovechamiento sostenible de esta especie en Bolivia.

Si bien los registros nacionales son aún limitados, estudios como el de Gómez Castro y Acha Daza (2010) y Mamani Mollo (2018) evidencian el potencial de las especies nativas y naturalizadas de bambú como recurso constructivo y materia prima renovable, particularmente en regiones como Pando, Beni y los Yungas, donde su crecimiento es abundante.

Más allá de su aprovechamiento industrial, el bambú cumple un rol ecológico fundamental: sus tejidos acumulan y reciclan nutrientes como nitrógeno, fósforo, calcio, potasio y sílice, los cuales retornan al suelo mediante la descomposición de su biomasa.

Asimismo, su crecimiento acelerado que puede superar un metro por día en condiciones favorables y su capacidad de regenerarse sin necesidad de replantación lo convierten en una alternativa eficaz para la restauración de ecosistemas degradados, la reducción de la deforestación y la mitigación del cambio climático (Tecnología del Bambú, 2023).

2.1.10.2. Obtención de la CHB: recolección, secado y calcinación

La ceniza de hoja de bambú (CHB) se obtiene mediante un proceso controlado que incluye las etapas de recolección, secado y calcinación de las hojas. La recolección se realiza preferentemente de hojas secas o recién caídas, evitando contaminación con tierra o materia orgánica. Posteriormente, las hojas se secan al aire o en horno a temperaturas moderadas (entre 100 °C y 105 °C) para eliminar la humedad antes de la calcinación (Cardona, 2015).

La calcinación es el proceso clave que define las propiedades puzolánicas de la CHB. Según Wijaya et al. (2020), las temperaturas entre 600 °C y 800 °C son las más adecuadas, ya que en este rango la sílice presente en la biomasa se transforma en sílice amorfa ($\text{SiO}_2(\text{am})$), una forma reactiva capaz de combinarse con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento. Temperaturas mayores a 900 °C provocan la cristalización de la sílice (cuarzo), reduciendo su reactividad.

La ceniza obtenida se muele y tamiza, normalmente pasando por el tamiz N.º 200 (0,075 mm), para garantizar una granulometría fina y homogénea que facilite la reacción puzolánica (ASTM C618-19).

2.1.10.4. Composición química de la CHB

La composición química de la CHB depende de la especie de bambú, las condiciones del suelo de cultivo y la temperatura de calcinación. Sin embargo, diferentes estudios coinciden en que la ceniza contiene elevados porcentajes de sílice (SiO_2), junto con óxidos de calcio

(CaO), alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), los cuales le confieren un carácter potencialmente puzolánico (Wijaya et al., 2020; Cardona, 2015).

De acuerdo con la norma ASTM C618-19, un material puede considerarse puzolánico si la suma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es mayor al 70 %. En estudios realizados sobre hojas de bambú calcinadas, se reportan valores dentro o superiores a este rango, evidenciando su viabilidad como material cementante suplementario.

Tabla 9

Comparación de la composición química de las CHB reportadas por diferentes autores

Componente químico	Símbolo	Asha et al. (2014)	Cardona (2015)	Utodio et al. (2015)	Ismanti & Yasufuku (2017)	Tineo (2023)	Rango típico ASTM C618-19 (% requerido)
Dióxido de silicio	SiO_2	59.20	75.85	51.99	78.29	63.83	—
Óxido de aluminio	Al_2O_3	61.40	3.95	10.10	1.21	9.08	—
Óxido férrico	Fe_2O_3	61.40	2.27	6.85	0.72	2.17	—
Óxido de calcio	CaO	—	5.18	12.51	6.00	7.42	—
Óxido de magnesio	MgO	0.54	2.38	1.21	1.21	7.30	—
Óxido de potasio	K_2O	—	1.64	3.39	5.03	8.54	—
Pentóxido de fósforo	P_2O_5	11.20	0.62	0.09	—	—	—
Σ ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	—	182.00	82.07	68.94	80.22	75.08	> 70 % (mínimo requerido)

Nota. Elaboracion propia.

Al comparar los resultados de la tabla, se observa que la mayoría de las investigaciones cumplen con este requisito, presentando valores que oscilan entre 75,08 % y 82,07 %, lo que indica que las cenizas de hoja de bambú poseen un contenido significativo de compuestos silíceos y aluminicos, características que favorecen su actividad puzolánica.

Sin embargo, el estudio de Utodio et al. (2015) muestra un valor ligeramente inferior (68,94 %), lo cual podría deberse a diferencias en las condiciones de calcinación, especie de bambú o pureza de la muestra. En general, los resultados evidencian que las cenizas de hoja de bambú tienen potencial para ser utilizadas como material cementante suplementario, en concordancia con los criterios de la norma ASTM C618-19.

2.1.10.5. Actividad puzolánica de la CHB

La actividad puzolánica de la CHB se debe principalmente a su alto contenido de sílice amorfa y al contacto con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ liberado por el cemento durante la hidratación. En este proceso, la sílice y la alúmina de la ceniza reaccionan con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formar silicatos (C-S-H) y aluminatos cálcicos hidratados (C-A-H), responsables del desarrollo de la resistencia y la durabilidad en las mezclas suelo-cemento (Wijaya et al., 2020).

La reactividad de la ceniza depende de su finura, pureza y temperatura de calcinación. Cenizas finas con sílice amorfa presentan una mayor superficie específica, lo que favorece las reacciones químicas y reduce la porosidad del material. Asimismo, al consumir parte del $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la CHB contribuye a disminuir la alcalinidad del sistema y la formación de eflorescencias, mejorando la durabilidad (ASTM C618-19).

2.1.10.6. Comparación química entre el cemento Portland y la CHB

Con el fin de comprender el papel de la CHB dentro de una mezcla suelo-cemento, resulta necesario comparar su composición con la del cemento Portland, identificando similitudes químicas que permitan explicar su capacidad de reemplazo parcial.

Mientras que el cemento es un material altamente cálcico (rico en CaO), la CHB es un material altamente silíceo, lo que hace que interactúen de manera complementaria:

- El cemento aporta cal (CaO) necesaria para la hidratación y formación de compuestos primarios;
- La CHB aporta sílice (SiO₂) reactiva para formar compuestos secundarios (C–S–H), responsables del incremento de resistencia.

Tabla 10

Comparación química entre el cemento Portland IP-30 y CHB

Componente químico	Símbolo	Cemento COBOCE IP-30 (%)	CHB – Cardona et al. (2015) (%)
Dióxido de silicio	SiO ₂	34.79	75.85
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	6.30	3.95
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	3.12	2.27
Óxido de calcio	CaO	52.49	5.18

Nota. Elaboración propia.

En esta tabla se evidencia que:

- El cemento contiene principalmente CaO, indispensable para la hidratación.
- La CHB contiene una cantidad excepcionalmente alta de SiO₂ (75.85 %), en forma amorfa, ideal para reaccionar con la cal liberada por el cemento.

Comprendida la interacción química entre el cemento y la CHB, el siguiente paso es evaluar cómo estas reacciones se traducen en resistencia mecánica; para ello se emplea el ensayo de compresión uniaxial.

2.1.11. Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial

El ensayo de resistencia a la compresión uniaxial (RCU) es un método fundamental para evaluar la capacidad mecánica de materiales estabilizados, usado ampliamente en mezcla

suelo-cemento. Consiste en someter una probeta cilíndrica, moldeada y compactada, a una carga axial creciente sin confinamiento lateral hasta la falla del material.

La RCU refleja parámetros fundamentales como el grado de compactación, la cohesión interna y la eficacia de las reacciones cementantes que ocurren durante el proceso de hidratación y curado. En el caso de los suelos estabilizados con adiciones puzolánicas, este ensayo permite cuantificar el aporte de dichas adiciones al desarrollo de la resistencia mecánica.

De acuerdo con la norma ASTM D1633, las probetas se preparan a partir de la mezcla homogénea de suelo - cemento, compactadas con el contenido óptimo de humedad determinado por el ensayo Proctor. Posteriormente, las muestras se curan bajo condiciones controladas de humedad y temperatura durante un periodo determinado (generalmente siete días) antes de ser sometidas a la carga axial.

Este ensayo constituye la base para verificar experimentalmente la influencia de la CHB en el desarrollo de la resistencia a compresión del suelo-cemento, siendo un parámetro clave para determinar su viabilidad técnica en la estabilización de suelos de baja capacidad portante.

2.2. Estado del Arte

Cardona (2015), en su tesis “Caracterización de la ceniza de hojas de bambú y su influencia como material puzolánico en el concreto”, estudió las propiedades químicas, físicas y mineralógicas de la ceniza de hoja de bambú (CHB) obtenida por calcinación. La calcinación se realizó en un horno con una serie de incrementos de temperatura: empezó a 150 °C por 15 minutos, luego subió a 350 °C durante 10 minutos, después a 550 °C por otros 10 minutos, y finalmente se mantuvo en 650 °C durante aproximadamente 2 horas y 30 minutos, sumando unas 2,5 horas en total. La ceniza obtuvo entre 65 % y 80 % de sílice, en su mayor

parte en fase amorfa, lo que indica un buen potencial reactivo. Cuando se reemplazó entre un 10 % y un 20 % del cemento por CHB en la mezcla, se notaron mejoras en la durabilidad y resistencia del concreto, además de reducir su permeabilidad; Pero al reemplazar un 20 % del cemento con CHB fue lo más efectivo, ya que mostró mejores propiedades en resistencia. Esto demuestra que la ceniza de hojas de bambú puede ser un buen material puzolánico y una opción más ecológica para el concreto.

De forma complementaria, Olutoge, Olaoye y Adetola (2012) desarrollaron el estudio “Bamboo Leaf Ash as a Supplementary Cementitious Material in Concrete”, demostrando que sustituciones entre 10 % y 15 % favorecen la formación adicional de C–S–H, mejorando la resistencia a largo plazo y reduciendo la porosidad del concreto. Los autores concluyen que la CHB puede emplearse de manera efectiva en la producción de concretos sostenibles, disminuyendo la huella de carbono asociada al uso del cemento.

Por otra parte, Utodio et al. (2015) *Investigación del efecto de la ceniza de hoja de bambú mezclada con cemento en las propiedades de ingeniería de bloques de laterita*, evaluaron la adición de ceniza de hoja de bambú (BLA) en reemplazos del cemento al 0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25 % en bloques lateritas. Las hojas fueron secadas, quemadas y calcinadas a 600 °C por 2 horas. El análisis químico confirmó que la BLA cumple los requisitos de contenido combinado de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ exigidos por la norma ASTM C618, lo que evidencia su carácter puzolánico. Los resultados mostraron que sustituciones del 5 % y 10 % son adecuadas para bloques portantes, mientras que 20–25 % fueron más aplicables para elementos no portantes; además, se observó reducción de la absorción de agua y mejor resistencia a la abrasión en las mezclas óptimas. Estos hallazgos respaldan el uso de la CHB como sustituto

parcial del cemento en aplicaciones constructivas y reafirman la necesidad de controlar la temperatura de calcinación para maximizar la reactividad puzolánica.

En el campo de la ingeniería geotécnica, Arriaga y Palomino (2021), en su tesis “Evaluación de cenizas agrícolas en la estabilización de suelos lateríticos”, compararon el desempeño de diferentes residuos agrícolas entre ellos la ceniza de hoja de bambú en la estabilización de suelos de baja capacidad portante. Las autoras evidenciaron que la incorporación de puzolanas naturales mejora la resistencia a la compresión y el índice CBR, permitiendo disminuir el uso de cemento sin comprometer el desempeño mecánico de las mezclas suelo-cemento.

En base a las investigaciones revisadas confirman que la ceniza de hoja de bambú es un material con alto potencial puzolánico, capaz de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de mezclas cementicias. La mayoría de los estudios se ha centrado en su aplicación en el concreto, evidenciando mejoras en resistencia, durabilidad y sostenibilidad ambiental.

Sin embargo, los trabajos enfocados en la estabilización de suelos, especialmente en mezclas suelo-cemento con sustitución parcial de cemento por CHB, son aún escasos. Esto evidencia una brecha importante en la investigación geotécnica, particularmente en regiones tropicales como Cobija (Pando), donde las plantas bambú son abundantes y podría representar una alternativa local viable para el mejoramiento de suelos de baja capacidad portante, como los clasificados A-4.

La presente investigación busca contribuir a ese vacío, evaluando experimentalmente el efecto de la sustitución parcial de cemento por CHB en la resistencia a compresión de suelos A-4, con el fin de establecer un uso técnico y sostenible de este recurso regional.

CAPÍTULO III

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación determina el propósito del estudio y la naturaleza de los resultados que se espera obtener. En este caso, la investigación es de tipo aplicada, ya que busca ofrecer una solución práctica a un problema real: mejorar las propiedades mecánicas de un suelo tipo A-4 de baja capacidad de soporte, común en la región de Cobija.

De acuerdo con Hernández, Fernández y Baptista (2014), la investigación aplicada se orienta a resolver necesidades concretas mediante la aplicación de principios científicos. En este trabajo, se propone el uso de cemento Portland parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú (CHB), con el objetivo de comprobar si esta sustitución puede incrementar la resistencia a la compresión uniaxial del suelo, promoviendo además el uso de materiales alternativos y sostenibles.

3.2 Diseño de investigación

El estudio adoptó un diseño experimental, ya que se realizaron pruebas en condiciones controladas de laboratorio con el propósito de evaluar el efecto en la resistencia a la compresión uniaxial de la sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB) en el comportamiento mecánico del suelo.

Este diseño permitió comparar los resultados de las distintas mezclas con los del suelo estabilizado únicamente con cemento, garantizando la validez de los resultados mediante un control sistemático de las condiciones de ensayo, como el tipo de suelo, la humedad óptima y la densidad seca máxima obtenidas en el ensayo Proctor modificado.

3.3 Enfoque de la investigación

El enfoque de la investigación se refiere al método empleado para abordar los datos y analizar la información obtenida. Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección, procesamiento y análisis de datos numéricos obtenidos mediante ensayos de laboratorio.

Según Creswell (2014), el enfoque cuantitativo permite medir fenómenos y establecer relaciones entre variables a través del uso de procedimientos estadísticos. En esta investigación, los resultados del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial, realizados de acuerdo con la norma ASTM D1633, fueron analizados numéricamente para evaluar cómo influye la sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú en la resistencia del suelo tipo A-4.

El uso de este enfoque facilita la interpretación objetiva de los resultados y permite establecer conclusiones basadas en evidencias experimentales verificables.

3.4. Variables de estudio

En una investigación experimental, la identificación y control de las variables permite establecer relaciones claras entre los factores que intervienen en el comportamiento del material estudiado. En este caso, las variables se clasifican en independientes, dependientes y de control, según su función dentro del experimento.

La variable independiente corresponde al porcentaje de sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB), aplicada en tres proporciones diferentes: 2 %, 4 % y 6 % del peso del cemento en la mezcla suelo-cemento.

La variable dependiente es la resistencia a la compresión uniaxial del suelo tipo A-4 estabilizado, expresada en Megapascales (MPa), determinada mediante el ensayo ASTM

D1633. Esta variable refleja la respuesta mecánica del material ante la carga aplicada y permite evaluar la eficacia de la sustitución.

Posteriormente, las variables de control comprenden los factores que permanecen constantes durante el proceso experimental, como el tipo de suelo, el tipo de cemento (IP-30, marca Viacha).

3.4.1. Operacionalización de las variables.

La operacionalización de variables sirve para definir cómo se van a medir y analizar los datos de la investigación, asegurando que exista una relación clara entre los objetivos, las variables y los procedimientos realizados en el laboratorio.

Tabla 11
Operacionalización de las variables

Variable	Tipo	Dimensión	Indicador	Instrumento / Norma	Unidad / Escala
ceniza de hoja de bambú (CHB)	Independiente / Cuantitativa	Porcentaje de reemplazo del cemento	Porcentaje de CHB respecto al peso del cemento	Registro de mezcla en laboratorio / balanza de precisión	Porcentaje (%)
Resistencia a la compresión uniaxial (q_u)	Dependiente / Cuantitativa	Desempeño mecánico del suelo-cemento	Resistencia a la compresión promedio (MPa)	Prensa hidráulica / ASTM D1633	Megapascal (MPa)
Técnica de recolección / Procedimiento			Frecuencia / N	Codificación	
Preparación de las mezclas manteniendo 4 % de cemento y reemplazando 0 %, 2 %, 4 % y 6 % con CHB. Se pesaron los materiales en balanza calibrada.			3 probetas por nivel de sustitución (n = 3)	M1 = 0 %; M2 = 2 %; M3 = 4 %; M4 = 6 %	

Ensayo de compresión uniaxial en probetas curadas 7 días. Se registró la carga máxima y se calculó $q_u = P/A$.	3 probetas por nivel de sustitución	Valor numérico en MPa
--	-------------------------------------	-----------------------

Nota. Elaboración propia.

3.5. Población y muestra

La población de estudio estuvo conformada por las mezclas de suelo-cemento elaboradas con diferentes porcentajes de sustitución parcial del cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB). Cada mezcla representó una combinación específica del suelo tipo A-4, cemento Portland IP-30 y CHB en proporciones variables.

La experimentación se desarrolló en laboratorio, donde se moldearon probetas cilíndricas a partir de cada mezcla para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial a los 7 días de curado, conforme a la norma ASTM D1633.

Con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados, se elaboraron tres probetas por cada dosificación (ver Tabla 12), incluyendo una mezcla de control con 4 % de cemento y tres mezclas con sustituciones de 2 %, 4 % y 6 % de CHB respecto al peso del cemento. En total se prepararon 12 probetas.

Tabla 12
Distribución de las muestras elaboradas

Tipo de mezcla	Contenido de cemento (%)	Sustitución de CHB (%)	Número de probetas	Tiempo de curado (días)
Control (suelo-cemento)1	4	0	3	7
Mezcla 2	4	2	3	7
Mezcla 3	4	4	3	7
Mezcla 4	4	6	3	7
Total	—	—	12	—

Nota. Elaboración propia.

3.6. Materiales empleados

En la presente investigación se utilizaron materiales representativos y accesibles, necesarios para la elaboración de las mezclas de suelo estabilizado con cemento y con sustitución parcial de este por ceniza de hoja de bambú.

3.6.1. Suelo A-4

Este tipo de suelo se seleccionó por ser representativo y frecuente en la ciudad de Cobija, Pando, especialmente en zonas de emplazamiento de vías, y por requerir estabilización para su aplicación en capas de subbase o base de pavimento.

3.6.2. Cemento Portland tipo IP 30

Se empleó cemento Portland tipo IP-30 de la marca Viacha, conforme a las normas NB 011 y ASTM C150.

3.6.3. Ceniza de hoja de bambú (CHB)

La ceniza se obtuvo a partir de hojas secas de bambú de la especie *Guadua angustifolia*, recolectadas en una zona periurbana de Cobija.

3.6.4. Agua

Se empleó agua limpia y potable, libre de impurezas y materiales orgánicos, de acuerdo con la norma ASTM C1602, utilizada para ajustar la humedad de las mezclas y favorecer las reacciones de hidratación del cemento.




3.7. Equipos y herramientas de laboratorio

Durante el desarrollo de la investigación se emplearon diversos equipos y herramientas de laboratorio que permitieron realizar los ensayos de caracterización física, compactación y resistencia a la compresión del suelo estabilizado.

En la tabla siguiente se detallan los principales equipos utilizados, su función y la norma técnica que respalda su uso:

Tabla 13

Equipos y herramientas utilizados en los ensayos de laboratorio

Equipo / Herramienta	Función principal	Norma de referencia
<p>Balanza de precisión (0.01 g)</p> 	<p>Permite pesar con exactitud las muestras de suelo, cemento, ceniza y agua. También para determinar el contenido de humedad y otras propiedades físicas.</p>	<p>ASTM D2216 / AASHTO T265</p>
<p>Tamices serie ASTM</p> 	<p>Utilizados para realizar el análisis granulométrico por tamizado, clasificando el suelo según el tamaño de las partículas y para el control de finura de la ceniza</p>	<p>ASTM D422 / ASTM D2487 / AASHTO T88</p>
<p>Equipo de límites de Atterberg (dispositivo de Casagrande, piseta, cápsulas y espátula)</p> 	<p>Permite determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad del suelo.</p>	<p>ASTM D4318 / AASHTO T89–T90</p>

Horno de secado



Empleado para eliminar la humedad de las muestras de suelo.

ASTM D2216

Molde Proctor modificado y martillo compactador



Utilizados para determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo.

ASTM D698 /
AASHTO T99

Prensa hidráulico universal



Se utiliza para realizar el ensayo de resistencia a la compresión uniaxial de las probetas.

ASTM D1633

Moldes cilíndricos metálicos



Sirven para moldear las probetas de suelo estabilizado antes del curado.

ASTM D1633

Espátulas, palas, bandejas y recipientes



Facilitan la manipulación, mezcla y preparación de los materiales en laboratorio.

Buenas prácticas de laboratorio

Nota. Elaboración propia.

3.8. Localización del estudio

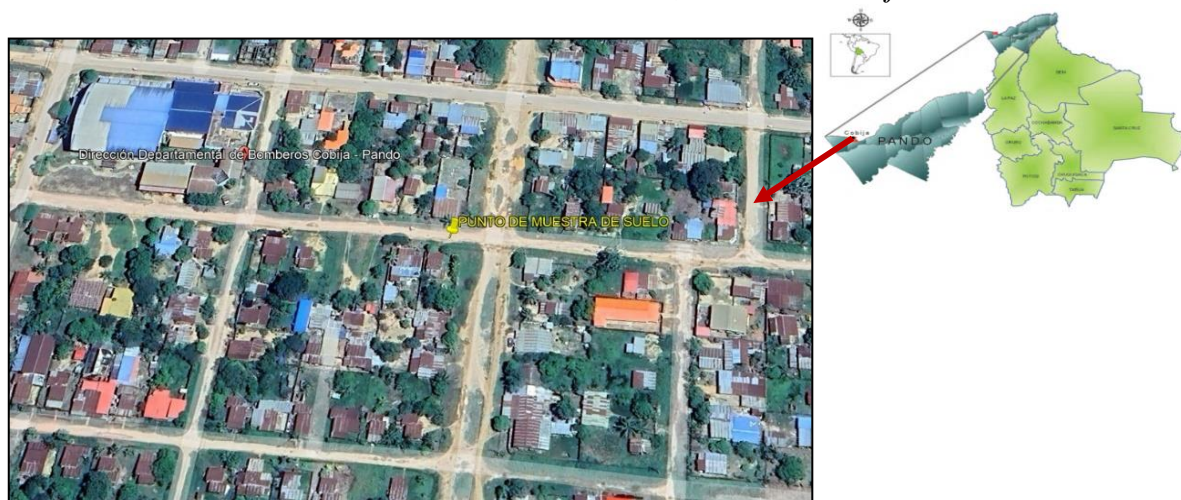
La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Cobija, capital del departamento de Pando, situada en la región amazónica de Bolivia.

El material de suelo empleado fue recolectado en un punto específico del Barrio 27 de Junio (ver figura 1), perteneciente al distrito VI del municipio de Cobija. Este sector fue seleccionado por encontrarse en una zona urbana en crecimiento poblacional y en proceso de desarrollo, lo que incrementa la demanda de infraestructura vial y de servicios básicos. En sus alrededores se ubican equipamientos de importancia local, como un centro de salud, la estación de bomberos y un mercado barrial, lo que evidencia su proyección como área estratégica dentro de la expansión urbana de la ciudad.

La selección del sitio tuvo como propósito analizar las características del suelo presente en esta zona donde se identificó la presencia de suelo tipo A-4 según la clasificación AASHTO, con el fin de evaluar su características físicas y mecánicas y determinar su potencial aplicación en futuros proyectos viales del Barrio 27 de Junio.

Figura 1

Punto de muestreo de suelo en el Barrio 27 de Junio, ciudad de Cobija – Pando.



Fuente: Imagen obtenida de Google Earth (2025), con elaboración propia.

3.9. Extracción y preparación de muestras de suelo

La extracción de las muestras de suelo se realizó en un punto previamente identificado en el Barrio 27 de Junio de la ciudad de Cobija – Pando. La ubicación exacta fue registrada mediante coordenadas referenciales obtenidas con GPS, según el sistema WGS 84, correspondientes a la siguiente posición:

Punto de muestreo	Latitud (S)	Longitud (O)	Altitud (m.s.n.m.)
Barrio 27 de Junio	11° 0'50.42"	68°46'40.17"	280

El proceso se efectuó de manera manual mediante la apertura de una calicata de aproximadamente 0.80m de profundidad, utilizando herramientas básicas como pala, pico y carretilla (ver anexo A), hasta alcanzar un estrato uniforme y representativo. Durante la excavación se descartaron los primeros centímetros del terreno superficial (aproximadamente 10–35 cm) para evitar contaminación con materia orgánica o materiales ajenos al suelo natural.

Posteriormente, se extrajeron muestras alteradas, las cuales fueron colocadas en bolsas plásticas debidamente identificadas con código y fecha de muestreo, asegurando su preservación hasta su traslado al laboratorio.

Figura 2

Recolección de muestras de suelo



Fuente: Elaboración propia.

El suelo recolectado en el Barrio 27 de Junio de la ciudad de Cobija fue trasladado al Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Universidad Amazónica de Pando para su análisis y preparación.

Al llegar al laboratorio, el primer paso fue determinar el contenido de humedad natural del suelo, ya que este dato permite conocer la cantidad de agua presente en el material y sirve como punto de referencia para otros ensayos. Para ello, se utilizó el método indicado en la norma ASTM D2216, que consiste en pesar una porción de suelo húmedo, secarla en horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas y volver a pesarla para calcular la diferencia de masa entre el suelo húmedo y seco.

Luego de obtener el contenido de humedad, las muestras se secaron al aire libre para eliminar el exceso de agua y facilitar su manipulación. Una vez secas, se procedió a disgregar los terrones o grumos sin alterar el tamaño natural de las partículas, con el fin de conseguir un material suelto y uniforme.

Figura 3

Secado de la muestra y disgregación de terrones de suelo



Fuente: Elaboración de propia.

Posteriormente, se aplicó el método de cuarteo manual, siguiendo lo establecido en la norma AASHTO T248, que tiene como objetivo reducir el volumen de suelo obtenido en campo hasta una cantidad representativa y manejable para los ensayos de laboratorio.

El procedimiento consistió en extender el suelo sobre una superficie limpia, plana y compacta, libre de impurezas que pudieran alterar sus propiedades. Luego, con ayuda de una pala, se mezcló completamente el material para asegurar una distribución uniforme de sus partículas. A continuación, se formó un montículo cónico, repitiendo este proceso al menos tres veces, con el fin de garantizar la homogeneidad de la muestra.

Una vez obtenida la mezcla uniforme, el montículo se aplanó hasta formar una superficie nivelada y se dividió en cuatro partes iguales. Posteriormente, se retiraron dos partes opuestas y las dos restantes se volvieron a mezclar, repitiendo el procedimiento hasta alcanzar la cantidad de muestra requerida para los distintos ensayos planificados.

Figura 4

Cuarteo de muestra de acuerdo con la norma ASTM D75



Fuente: Elaboración propia.

3.9.1. Ensayos de caracterización del suelo

Una vez preparada la muestra de suelo, se realizaron los ensayos de caracterización física y mecánica, con el fin de conocer sus principales propiedades y confirmar su clasificación como suelo tipo A-4, según el sistema AASHTO.

Estos ensayos se desarrollaron en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Universidad Amazónica de Pando, siguiendo las normas internacionales ASTM y AASHTO.

3.9.1.1. Contenido de humedad natural.

El contenido de humedad permite conocer la cantidad de agua que contiene el suelo al momento de su extracción.

Para determinarlo se utilizó la norma ASTM D2216, que consiste en pesar cuatro muestras húmedas de suelo, secarla en un horno a 110 ± 5 °C durante 24 horas y luego volver a pesarla.

La ecuación empleada es la siguiente:

$$w(\%) = \frac{w_1 - w_2}{w_2 - w_c} * 100$$

Donde:

- w = contenido de humedad, en %
- w_1 = masa del recipiente más muestra húmeda (g)
- w_2 = masa del recipiente más muestra seca (g)
- w_c = masa del recipiente vacío (g)

El valor de humedad es importante porque influye en la compactación y en la resistencia del suelo. Si el suelo tiene mucha agua, puede comportarse de forma plástica o blanda; en cambio, si está muy seco, pierde cohesión.

Figura 5

Determinación del contenido de humedad natural del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

3.9.1.2. Análisis granulométrico.

El análisis granulométrico permite conocer cómo se distribuyen los tamaños de las partículas que forman el suelo.

Este ensayo se realizó según la norma ASTM D422, usando un juego de tamices con aberturas de distintos diámetros como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14

Tamaños nominales de abertura según norma ASTM

Tamaño nominal de abertura (mm)	Designación ASTM
75	3"
63	2 ½"
50	2"
37,5	1 ½"
25	1"
19	¾"
12,5	½"
9,5	⅜"
6,3	¼"
4,75	N° 4
2	N° 10
1,18	N° 16
0,6	N° 30
0,3	N° 50
0,15	N° 100
0,075	N° 200

Nota. Adaptado de *Manual de ensayo de suelos y materiales de hormigón* (Administradora Boliviana de Carreteras [ABC]).

El procedimiento consistió en pesar la muestra seca, colocarla en la parte superior de la columna de tamices y agitarlos durante aproximadamente 10 minutos.

Luego, se registró el peso del material retenido en cada tamiz para calcular el porcentaje que pasa a través de cada uno, usando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \left(\frac{\text{peso retenido acumulado}}{\text{peso total de la muestra}} * 100 \right)$$

3.9.1.3. Límites de Atterberg.

Este ensayo permite identificar los rangos de humedad en los que un suelo cambia su consistencia, lo que ayuda a determinar su comportamiento frente a la variación del contenido de agua.

En este estudio, los ensayos de límite líquido (LL) y límite plástico (LP) se realizaron siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D4318.

3.9.1.3.1. Procedimiento para el límite líquido (LL).

- Se tomó una porción del suelo de aproximadamente 100 g previamente tamizado por el tamiz N.º 40 (0,425 mm) y se mezcló con agua hasta obtener una pasta homogénea.
- Posteriormente la pasta se colocó dentro de la copa de Casagrande, nivelando su superficie con una espátula para asegurar una distribución uniforme.
- Con el cortador estándar se trazó una ranura en el centro de la muestra, dividiéndola en dos mitades iguales.
- La copa se hizo caer desde una altura de 1 cm a una velocidad aproximada de dos golpes por segundo.
- Se registró el número de golpes requeridos para que las mitades de suelo se unieran.

- Se tomaron muestras del material que se cerró y se determinó su contenido de humedad mediante secado en horno.
- Este procedimiento se repitió con 4 veces con diferentes cantidades de agua para obtener una curva de fluidez y así determinar el límite líquido (LL) correspondiente a 25 golpes.

Figura 6
Ensayo de Limite Liquido



Fuente: Elaboración propia.

3.9.1.3.2. Procedimiento para el límite plástico (LP)

- De la muestra que sobro del ensayo del límite liquido se tomó una porción de este, para elaborar el presente ensayo.
- La muestra se amasó con las manos hasta formar rollitos o cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro sobre una superficie lisa y no porosa.
- Cuando los rollitos comenzaron a agrietarse o desmenuzarse, se registró el contenido de humedad correspondiente, considerado como el límite plástico (LP).

Figura 7*Ensayo de Limite plástico*

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del índice de plasticidad (IP):

El índice de plasticidad (IP) se determinó aplicando la siguiente ecuación:

$$IP = LL - LP$$

donde:

LL = Límite líquido (%)

LP = Límite plástico (%)

3.9.1.4. Ensayo Proctor Modificado.

El ensayo Proctor modificado se realizó conforme a la norma ASTM D1557, con el objetivo de determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación del suelo A-4.

Estos parámetros son esenciales para definir las condiciones adecuadas de compactación que se aplicaron posteriormente en la elaboración del ensayo CBR para determinar la capacidad portante del suelo natural sin adición de cemento.

3.9.1.4.1. Procedimiento del ensayo Proctor Modificado.

- El suelo natural recolectado fue secado al aire libre, desmenuzado manualmente y tamizado por el tamiz N.º 3/8 (9,5 mm), conforme a los requerimientos de la ASTM D1557, Método B.

- El material retenido se descartó, y el material pasante se empleó para el ensayo.
- Se prepararon cuatro porciones de suelo seco cada uno con porción con una masa de 2100 g, a las cuales se les añadió agua en diferentes proporciones (9 %, 11%, 13 % y 15 %) con el fin de obtener varios puntos para construir la curva humedad–densidad.
- Cada porción se colocó en un molde cilíndrico de 4 pulgadas ($1/30 \text{ pie}^3$ de volumen) en cinco capas de espesor uniforme. Cada capa fue compactada con 25 golpes aplicados con un martillo de 4,54 kg (10 lb), que cae desde una altura de 457 mm (18 pulgadas).
- Este procedimiento aplica una energía de compactación de $2.700 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, que es aproximadamente 4,5 veces mayor que la del Proctor estándar, y simula mejor las condiciones de compactación reales en campo para capas de subbase y base de pavimentos.
- Después de compactar las cinco capas, se eliminó el exceso de material, se niveló la superficie y se determinó el peso húmedo del suelo y el molde con una balanza de precisión.
- Se tomó una pequeña muestra del material compactado tanto de la parte superior como inferior y se secó en horno a $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 24 horas, siguiendo la norma ASTM D2216, para determinar el contenido de humedad (w).

Cálculos:

Con los valores obtenidos, se calcularon la densidad húmeda y la densidad seca mediante las ecuaciones:

$$\rho_h = \frac{M_h}{V} \quad \rho_d = \frac{p_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

M_h = masa húmeda del suelo compactado (g)

V = volumen del molde (cm^3)

w = contenido de humedad (%)

Los valores calculados se graficaron en una curva que relaciona la densidad seca (ρ_d) con el contenido de humedad (w).

El punto máximo de la curva representa la densidad seca máxima (ρ_{dmax}), y el valor de humedad correspondiente se define como la humedad óptima de compactación, esta parte lo veremos en capítulo de resultados.

3.9.1.5. Ensayo CBR (California Bearing Ratio).

Finalmente, este ensayo de CBR (California Bearing Ratio), de acuerdo a la norma ASTM D1883, tiene como objetivo determinar la capacidad de soporte del suelo tipo A-4 en su estado natural. Este parámetro es fundamental para el diseño de pavimentos, ya que permite estimar la resistencia que ofrece el suelo frente a cargas aplicadas, como las generadas por el tránsito vehicular.

El ensayo CBR tiene como propósito evaluar la resistencia del suelo a la penetración, comparando la carga necesaria para lograr una deformación determinada con la que requiere un material estándar (grava triturada bien graduada).

El resultado se expresa como un porcentaje denominado índice CBR, que representa la calidad del suelo en términos de su capacidad portante.

3.9.1.5.1. Preparación de la muestra

- El suelo natural fue secado al aire y posteriormente tamizado con el tamiz N°4 (4.75 mm), conforme a la ASTM D1883.
- Se preparó el material con el contenido de humedad óptimo, obtenido del ensayo Proctor modificado (ASTM D1557), asegurando así la compactación bajo condiciones representativas.
- Cada molde se llenó en cinco capas, compactando cada una con 56, 25 y 10 golpes con el martillo de 4.54 kg (10 lb), desde una altura de 457 mm (18 in), de acuerdo con el método de compactación correspondiente al Proctor modificado.
- Una vez compactada la última capa, se niveló la superficie y se colocó un disco de carga y pesas adicionales equivalentes a 4.5 kg, para simular las condiciones de confinamiento durante el período de remojo.

3.9.1.5.2. Procedimiento del ensayo.

- El molde con la muestra compactada se sumergió en agua durante 96 horas (4 días), tal como indica la norma ASTM D1883, para simular la saturación del suelo y su comportamiento en condiciones críticas de humedad.
- Durante este tiempo, se registró el hinchamiento de la muestra con un reloj comparador colocado sobre el pistón, cada 24 horas.
- Luego del remojo, el molde se retiró del agua y se colocó en la máquina de carga CBR.
- Se introdujo el pistón metálico a una velocidad constante de 1.27 mm/min (0.05 in/min), registrando la carga aplicada (P) para diferentes profundidades

de penetración (0.625 mm, 1.25 mm, 1.875 mm, 2.5 mm, 3.75 mm, 5.0 mm, 7.5 mm, y 10 mm).

- Los valores de carga y deformación se anotaron cuidadosamente, generando una curva carga-deformación que permitió determinar las cargas correspondientes a penetraciones de 2.5 mm (0.1 in) y 5.0 mm (0.2 in).

Cálculo del índice CBR:

El valor del CBR se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$CBR = \frac{P}{P_s} * 100$$

Donde:

P = carga aplicada al suelo (kg),

Ps = carga estándar (kg).

Los resultados de este ensayo se verán en el capítulo de resultados.

3.10. Recolección y proceso de obtención de la ceniza de hoja de bambú

Para esta investigación se recolectaron hojas de tres especies de bambú presentes en la ciudad de Cobija: *Guadua angustifolia*, *Guadua paniculata* y *Bambusa vulgaris*. El procedimiento seguido para la obtención de la ceniza de hoja de bambú (CHB) se realizó tomando como referencia la metodología propuesta por Cardona (2015), quien describe de manera detallada las etapas de secado, calcinación, tamizado y almacenamiento de las cenizas, garantizando así la obtención de un material homogéneo y libre de impurezas.

3.10.1. Procedimiento inicial:

- Se recolectaron hojas secas de las tres especies, asegurándose de que no tuvieran tierra, polvo, insectos o partes dañadas. Se recolecto aproximadamente 1 kg de hojas de cada especie para realizar los primeros ensayos preliminares.
- Las hojas se lavaron con agua limpia para eliminar cualquier residuo adherido.
- Luego se dejaron secar al sol durante 2 a 3 días, hasta obtener una muestra seca.
- Las hojas secas se trituraron utilizando un equipo mecánico de pequeñas dimensiones provisto de aspás metálicas rotatorias, hasta obtener fragmentos finos y homogéneos que facilitaron una calcinación uniforme.

Las muestras trituradas se enviaron a la ciudad de La Paz, al Laboratorio de Química de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), donde se realizó el proceso de calcinación para obtener la ceniza de hoja de bambú.

La calcinación se llevó a cabo en una mufla, que es un horno eléctrico de alta temperatura, cerrado herméticamente, que permite controlar de manera precisa las condiciones de temperatura y tiempo durante la calcinación, comúnmente utilizado para la descomposición térmica de materiales orgánicos o la obtención de cenizas en ensayos químicos.

En este caso, las hojas de bambú fueron sometidas a temperaturas aproximadas de 650°C – 700 °C durante 2-3 horas, logrando una calcinación completa y uniforme que dio como resultado una ceniza de color blanco grisáceo.

Figura 8

Ceniza de hoja de bambú obtenida y procesada en el laboratorio de investigaciones de química de la UMSA.



Fuente: Elaboración propia.

Durante el procedimiento, se registró una masa inicial de 16 g de hojas secas por muestra, obteniéndose al finalizar el proceso una masa promedio de 3 g de ceniza, lo que representa un rendimiento del 18.75 %. Este valor indica que alrededor del 81.25 % de la masa original se pierde durante la calcinación, principalmente por la eliminación de humedad y la descomposición térmica de compuestos orgánicos como la celulosa y la lignina, quedando únicamente la fracción inorgánica compuesta por óxidos minerales.

Este resultado es coherente con estudios similares sobre la calcinación de residuos vegetales ricos en sílice, en los cuales se observan reducciones significativas de masa debido a la eliminación de componentes volátiles y materia orgánica (Cardona, 2015).

Este análisis permitió identificar la cantidad de sílice (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), calcio (CaO) y otros óxidos presentes en las muestras, con el fin de determinar qué especie de bambú presentaba mayores propiedades puzolánicas según su composición química. Con base en los resultados, se identificó la especie con mayor contenido de sílice y mejor potencial como sustituto parcial del cemento. A partir de esta evaluación, se decidió enfocar la recolección de hojas y la obtención de ceniza en dicha especie específica.

3.10.2. Obtención de mayor cantidad de ceniza para la investigación

Debido a que enviar una considerable cantidad de hojas de bambú a ciudad de La Paz al laboratorio de química de la UMSA, para su calcinación en mufla resultaba costoso, se optó por un proceso de calcinación controlada local.

Se fabricó un horno artesanal utilizando un turril de acero, diseñado con adecuada ventilación y capacidad suficiente para calcinar la cantidad de muestra requerida. Este prototipo fue desarrollado con la colaboración de un técnico en ingeniería industrial, quien, con sus conocimientos en procesos industriales y tratamientos térmicos, aseguró que el diseño del horno permitiera obtener una ceniza rica en sílice amorfa, necesaria para su reactividad puzolánica.

La cantidad de hojas a calcinar se determinó en función del rendimiento obtenido en laboratorio, donde se registró que por cada 16 g de hojas secas se obtenían aproximadamente 3 g de ceniza, lo que representa un rendimiento del 18,75 %. En base a este valor, se estimó que para obtener 100 g de ceniza de hoja de bambú (CHB) se requerían aproximadamente 533 g de hojas secas, cantidad utilizada como base para el proceso experimental.

Durante la calcinación, se empleó un termómetro industrial para controlar la temperatura, manteniéndola entre 500 y 650 °C durante 2-3 horas, asegurando que las hojas se transformaran en una ceniza de color blanco grisáceo, sin presencia de carbón excesivo. La tonalidad y textura de la ceniza fueron comparadas con las obtenidas en laboratorio, para garantizar la presencia de sílice amorfa.

Las hojas secas se colocaron en capas delgadas dentro del horno para asegurar una calcinación uniforme. La temperatura se monitoreó constantemente; cuando descendía, se

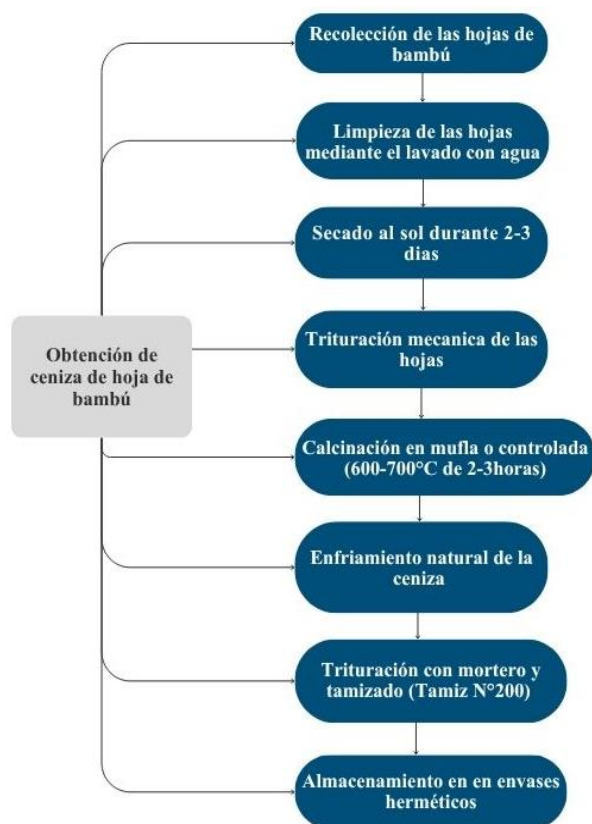
añadía leña para mantener el rango térmico establecido. Además, las hojas se removieron cuidadosamente durante el proceso para evitar una combustión irregular.

Al finalizar, las cenizas se dejaron enfriar de manera natural dentro del horno, para luego ser recogidas y trituradas con mortero hasta obtener un polvo fino. Posteriormente, el material se tamizó con un tamiz N.º 200 (75 µm), asegurando su homogeneidad y facilitando su mezcla con el cemento y el suelo.

Finalmente, la ceniza fina se almacenó en envases plásticos herméticos para protegerla de la humedad y conservar sus propiedades. A continuación, en la gráfica 9 se muestra un esquema de este proceso.

Figura 9

Esquema del proceso de obtención de la ceniza de hoja de bambú (CHB)



Fuente: Elaboración propia.

3.11. Diseño de mezclas de suelo-cemento con CHB

El diseño de las mezclas de suelo-cemento con sustitución parcial de cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB) se realizó considerando las propiedades físicas - mecánicas del suelo A-4 extraído del Barrio 27 de Junio.

Una investigación local previa sobre la estabilización de suelos tipo A-4 demostró que el contenido de cemento recomendado para alcanzar niveles adecuados de resistencia a la compresión es de aproximadamente 5 %. Dicho estudio, desarrollado por Puerta (2024), dicho estudio determinó que un contenido del 5 % de cemento permite obtener valores satisfactorios de resistencia a la compresión simple (2.45 MPa) y una adecuada compactación, con un óptimo contenido de humedad (OCH) de 10.04 % y un peso unitario máximo seco (PUMS) de 20.00 kN/m³, cumpliendo con los criterios técnicos establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) para materiales de subbase.

Respaldado con el estudio de Puerta, la presente investigación adopta por trabajar con un 4 % de cemento, con el propósito de poder evaluar si la incorporación y posterior sustitución parcial por CHB podría alcanzar resistencias equivalentes o superiores a las obtenidas con el 5 %, contribuyendo así a reducir el % de cemento sin comprometer el desempeño de la resistencia a la compresión uniaxial del suelo estabilizado.

Según las bibliografías revisadas, la CHB y otras cenizas vegetales se emplean generalmente en suelos de alta plasticidad, como arcillas, principalmente a nivel de subrasante. Dado que el suelo A-4 analizado no presenta alta plasticidad, se seleccionaron porcentajes de sustitución de 2 %, 4 % y 6 % de CHB en relación con el cemento, con el fin de evaluar la influencia de cantidades moderadas de ceniza sobre la resistencia a compresión del suelo estabilizado.

Asimismo, se realizó el ensayo de Proctor estándar para determinar el peso unitario seco máximo y el contenido óptimo de humedad de las mezclas suelo-cemento, con el fin de establecer la humedad óptima de compactación que garantizara una densificación adecuada. Estos valores fueron utilizados posteriormente en la preparación de las mezclas con sustitución parcial de CHB, asegurando condiciones homogéneas de compactación en todas las probetas.

Las mezclas fueron codificadas de la siguiente manera:

Tabla 15
Codificación de mezclas utilizadas en la estabilización del suelo con sustitución parcial de cemento por CHB.

Código	Descripción de la mezcla	Porcentaje de sustitución de cemento por CHB (%)
M1	Mezcla control: suelo + 4 % de cemento, sin CHB.	0
M2	Suelo + 4 % de cemento, con sustitución del 2 % por CHB.	2
M3	Suelo + 4 % de cemento, con sustitución del 4 % por CHB.	4
M4	Suelo + 4 % de cemento, con sustitución del 6 % por CHB.	6

Nota. Elaboración propia.

Este diseño experimental permite evaluar de manera controlada el efecto de la CHB sobre la RCU del suelo A-4, en comparación con la mezcla control, y determinar si la ceniza puede mejorar las propiedades mecánicas del suelo, reduciendo parcialmente la cantidad de cemento utilizada.

3.12. Procedimiento del ensayo Proctor para mezclas de suelo– cemento según norma ASTM D558

3.12.1. Preparación del material

El suelo natural se secó al aire con la finalidad de obtener un material completamente seco para la ejecución del ensayo. Posteriormente, se desmenuzó manualmente con la ayuda de un combo de cabeza de goma, separando cuidadosamente los terrones de suelo aglomerados.

El material se tamizó por el tamiz N.º 4 (4,75 mm), observándose que el 100 % del suelo pasó a través de dicho tamiz. Por esta razón, se empleó el Método A, de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D558–03 para mezclas de suelo–cemento.

Para conocer el contenido de humedad inicial del suelo antes de realizar el ensayo, se tomó una muestra representativa, la cual fue pesada y posteriormente secada en horno a 110 ± 5 °C durante una hora, determinándose el porcentaje de humedad natural del material.

Una vez conocido este valor, se procedió al pesado de los materiales secos (suelo y cemento) según la dosificación establecida: 4 % de cemento Portland tipo IP respecto al peso seco del suelo. Para este propósito se utilizaron 2100 g de suelo seco, calculándose la cantidad correspondiente de cemento según el porcentaje indicado.

Finalmente, el suelo y el cemento se mezclaron homogéneamente en estado seco, asegurando una distribución uniforme del aglutinante antes de la adición del agua.

2. Ensayo Proctor para mezclas de suelo–cemento (ASTM D558–03)

El ensayo Proctor permitió determinar el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima, parámetros fundamentales para garantizar una compactación adecuada en la elaboración de probetas suelo–cemento.

Equipos utilizados

- Molde cilíndrico metálico de 937 cm³, con collar de extensión.
- Pisón metálico de 4,5 kg, con caída libre de 45,7 cm.
- Balanza de precisión con lectura mínima de 0,01 g.
- Horno secador con temperatura controlada de 110 ± 5 °C.
- Recipientes metálicos para determinación del contenido de humedad.

3.12.2. Procedimiento

- Se prepararon cuatro 4 muestras de suelo con cemento, variando el contenido de agua en cada una para obtener diferentes niveles de humedad alrededor del valor óptimo estimado.
- Cada mezcla se colocó en el molde en cinco capas de igual espesor, aplicando 25 golpes por capa con el pisón estándar de 4,5 kg y caída de 45,7 cm.
- Finalizada la compactación, se retiró el collar, se enrasó la superficie del molde y se registró la masa del molde con muestra compactada.
- Se extrajeron pequeñas porciones de material de la parte superior e inferior del molde, las cuales se secaron en horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante para determinar el contenido real de humedad (w).

Figura 10

Proceso de elaboración de ensayo Proctor para suelo-cemento



Fuente: Elaboración propia.

Con los datos obtenidos, se calcularon la densidad húmeda (ρ_m) y la densidad seca (ρ_d) mediante las expresiones:

$$\rho_h = \frac{M_h}{V} \quad \rho_d = \frac{p_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

M_h = masa húmeda del suelo compactado (g)

V = volumen del molde (cm^3)

w = contenido de humedad (%)

Con los resultados obtenidos, se construyó la curva humedad–densidad, identificando el punto correspondiente al peso unitario seco máximo (PUSM) y su respectiva humedad óptima (H_{opt}).

Estos parámetros fueron empleados posteriormente para la fabricación de las probetas destinadas al ensayo de resistencia a la compresión uniaxial.

3.13. Elaboración de probetas de suelo–cemento y suelo–cemento con CHB

Una vez obtenidos los parámetros de compactación óptimos a partir del ensayo Proctor del suelo–cemento (contenido óptimo de humedad y densidad seca máxima), se procedió a la fabricación de las probetas cilíndricas para los ensayos de resistencia a la compresión simple.

3.13.1. Dosificación

La mezcla de control se elaboró con 4 % de cemento Portland IP respecto al peso seco del suelo. A partir de esta dosificación, se prepararon mezclas con sustitución parcial del cemento por CHB en proporciones del 2 %, 4 % y 6 %, manteniendo constante el contenido total de cemento.

Los valores de humedad óptima y peso unitario seco máximo obtenidos en el Proctor del suelo-cemento se utilizaron para todas las mezclas, asegurando una compactación uniforme y permitiendo la comparación directa entre las distintas dosificaciones.

Las características y proporciones empleadas en la elaboración de las probetas se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16

Características y dosificación de las probetas suelo–cemento y suelo–cemento con CHB

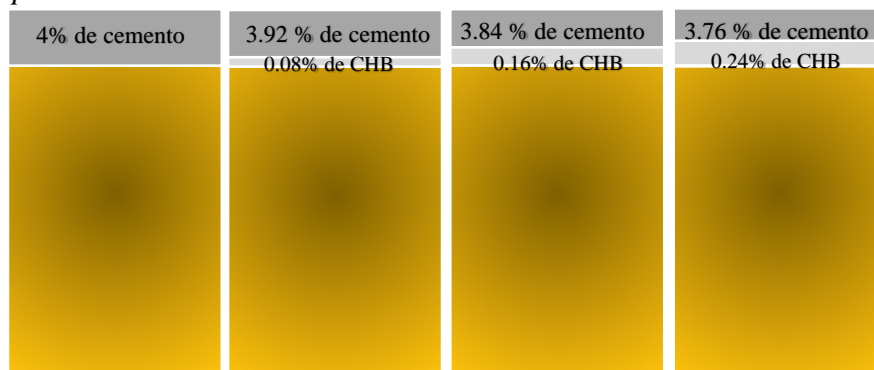
Mezcla	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Cantidad de probetas	Cemento (% respecto al suelo seco)	CHB (% de sustitución del cemento)
M1	100	204	3	4.00	0.00
M2	100	204	3	3.92	0.08
M3	100	204	3	3.84	0.16
M4	100	204	3	3.76	0.24

Nota. Elaboración propia.

Asimismo, en la Figura 11 se muestra la composición de suelo, cemento y CHB para cada dosificación, evidenciando la reducción progresiva del contenido de cemento a medida que aumenta el porcentaje de sustitución con CHB.

Figura 11

Distribución porcentual de los componentes en las mezclas suelo-cemento con sustitución parcial por CHB



Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento:

- Para cada mezcla de dosificación (M1, M2, M3 y M4) se utilizaron 10 kg de suelo seco, incorporando las proporciones de cemento y CHB definidas para cada caso.
- A cada mezcla se incorporó la cantidad de agua correspondiente al contenido óptimo de humedad (Hopt.) obtenido del ensayo Proctor.
- Los materiales se mezclaron manualmente hasta obtener una masa homogénea y libre de grumos.
- El material se colocó en moldes cilíndricos metálicos en nueve (9) capas de igual espesor, número determinado en función del volumen del molde (100 mm de diámetro y 204 mm de altura), del peso del pisón (4,5 kg) y de la energía de compactación requerida para garantizar una densificación uniforme.

- Cada capa fue compactada aplicando 25 golpes uniformemente distribuidos, utilizando el pisón de 4,5 kg, conforme a las especificaciones de la norma ASTM D1632, asegurando una adecuada consolidación del material en todo el volumen de la probeta. Durante el proceso de elaboración de las probetas, se tomaron pequeñas muestras de cada mezcla para verificar el contenido de humedad y controlar el grado de compactación, garantizando la uniformidad en todas las probetas.
- Una vez completada la compactación, se enrasó la superficie, se desmoldaron cuidadosamente las probetas y se identificaron según su respectiva dosificación (M1, M2, M3 o M4) y finalmente se registró su peso.

Figura 12

Probetas elaboradas



Fuente: Elaboración propia.

Las probetas se curaron durante 7 días en un ambiente controlado, cubiertas con plástico impermeable para evitar la pérdida de humedad y asegurar el correcto proceso de hidratación del cemento.

3.14. Ensayo de resistencia a la compresión del suelo-cemento con CHB

El ensayo de resistencia a la compresión uniaxial constituye la etapa final del proceso experimental, mediante la cual se cuantificó la capacidad resistente de las mezclas de suelo-cemento con sustitución parcial de cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB). Este ensayo permitió determinar la influencia de los diferentes porcentajes de sustitución en comparación con la mezcla control.

Las probetas cilíndricas elaboradas presentaron dimensiones de 100 mm de diámetro y 204 mm de altura, cumpliendo con las especificaciones establecidas por la norma ASTM D1633. Para cada dosificación (M1, M2, M3 Y M4) se elaboraron tres probetas, con el fin de obtener un valor promedio representativo de resistencia a la compresión uniaxial.

Transcurridos los 7 días de curado, cada probeta fue pesada individualmente y se registraron sus dimensiones (diámetro y altura) con el propósito de verificar su uniformidad y calcular con precisión el área transversal (A). Posteriormente, las probetas fueron sometidas a carga axial continua mediante una prensa hidráulica de compresión, aplicando la carga a una velocidad constante hasta alcanzar la falla total del material.

Durante el ensayo se registró la carga máxima soportada (P) por cada probeta, y con estos datos se calculó la resistencia a la compresión uniaxial (q_u) empleando la expresión:

$$q_u = \frac{P}{A}$$

Donde:

q_u = resistencia a la compresión uniaxial (MPa)

P = carga máxima aplicada (N)

A = área transversal de la probeta (mm²)

Los valores obtenidos se promediaron por dosificación para obtener una resistencia media representativa, calculando además la desviación estándar (σ) con el fin de evaluar la dispersión de los resultados y la repetitividad del ensayo.

La desviación estándar se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{u_i} - \bar{q}_u)^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = desviación estándar (MPa)

q_{u_i} = resistencia individual de cada probeta (MPa)

\bar{q}_u = resistencia promedio del conjunto (MPa)

n = número total de probetas ensayadas

Posteriormente, los valores promedio de resistencia y sus respectivas desviaciones estándar fueron analizados estadísticamente mediante un análisis de varianza (ANOVA de una vía), con el fin de determinar si existen diferencias significativas entre las mezclas según el porcentaje de sustitución de CHB.

Este análisis permite establecer, con base en criterios estadísticos, si la incorporación de CHB influye significativamente en la resistencia a la compresión del suelo – cemento.

CAPÍTULO IV

4. DESARROLLO DE RESULTADOS

4.1. Caracterización físico - mecánica del suelo tipo A-4

El estudio de las propiedades físico–mecánicas del suelo se realizó con el fin de identificar sus características principales y determinar su aptitud para ser utilizado en capas de subbase o base de pavimentos. Los ensayos de laboratorio ejecutados incluyeron: contenido de humedad natural, análisis granulométrico, límites de Atterberg, ensayo de compactación Proctor estándar y relación de soporte California (CBR). Los procedimientos se efectuaron de acuerdo con las normas ASTM y AASHTO correspondientes, bajo las especificaciones técnicas de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC).

4.1.1 Contenido de humedad natural

El contenido de humedad natural del suelo fue de 13,06 % a una profundidad de 0.80m, valor moderado que indica una condición relativamente seca al momento de la extracción. Este nivel de humedad sugiere que el suelo no se encontraba saturado y que posee una capacidad media de retención de agua, típica de suelos finos con presencia de limos y arcillas.

4.1.2. Análisis granulométrico

El ensayo granulométrico permitió determinar la distribución del tamaño de partículas del suelo mediante tamizado en seco (ver Anexo E). Los resultados muestran que el 54,37 % del material pasa por el tamiz N.º 200 (0,075 mm), evidenciando una alta proporción de partículas finas, mientras que el 45,63 % corresponde principalmente a fracciones arenosas y una mínima cantidad de grava (menor al 2 %). Desde el punto de vista ingenieril, esta distribución refleja una textura predominantemente fina con aporte arenoso, asociada a un comportamiento

El resultado del $LL = 22,93 \%$, indica que el material requiere una cantidad moderada de agua para pasar del estado plástico al semilíquido, lo cual es característico de suelos de baja plasticidad. Por su parte, el $LP = 17,58 \%$ sugiere que el rango de humedad en el cual el suelo mantiene su comportamiento plástico es reducido.

El $IP = 5,36 \%$ obtenido como la diferencia entre el LL y el LP confirma que el suelo presenta plasticidad baja, lo que implica una cohesión limitada entre sus partículas finas. En términos geotécnicos, esto significa que el material tiene poca expansividad y escasa compresibilidad, además de una baja capacidad para mantener su forma ante variaciones de humedad o cargas repetidas. Este comportamiento es típico de suelos con contenido moderado de limos y pequeña proporción de arcillas activas, los cuales tienden a perder resistencia al saturarse.

4.1.4 Clasificación del suelo

En base a los resultados obtenidos del análisis granulométrico y de los límites de Atterberg, el material se clasificó utilizando los sistemas AASHTO (M145-91) y SUCS (ASTM D2487), con el fin de identificar su comportamiento geotécnico y su potencial de aplicación en obras viales.

4.1.4.1. Sistema AASHTO.

De acuerdo con los resultados del análisis granulométrico, el suelo presenta un $54,31 \%$ de finos que pasan el tamiz N.º 200, un límite líquido (LL) de $22,93 \%$ y un índice de plasticidad (IP) de $5,36 \%$. Según el sistema de clasificación AASHTO M145-91 y los criterios de la Tabla 7 de Principios de Mecánica de Suelos (Das, 2012), el material se clasifica como A-4, característico de los limos arenosos de baja plasticidad, los cuales muestran un comportamiento regular a deficiente como subrasante (ver Figura 14).

Figura 14
Sistema de clasificación de la AASHTO

Clasificación general	Materiales de limo y arcilla (más de 35% de la muestra total pasa la malla núm. 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de grupo				A-7-5 ^a A-7-6 ^b
Análisis por mallas (% que pasa)				
Malla núm. 10				
Malla núm. 40				
Malla núm. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Para la fracción que pasa Malla núm. 40				
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (IP)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos	
Calificación subrasante	Regular a malo			

^aSi $IP \leq LL - 30$, la clasificación es A-7-5.
^bSi $IP > LL - 30$, la clasificación es A-7-6.

Fuente: Tabla 7 del libro: Principios de mecánica de suelos (7ª ed.) por B. M. Das, 2012, Cengage Learning.

Para complementar esta clasificación, se calculó el índice de grupo (IG), que permite evaluar la idoneidad del suelo como material de fundación. Aplicando la ecuación correspondiente

$$IG = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F_{200} - 15)(IP - 10)$$

Sustituyendo los valores obtenidos:

$$IG = (54.31 - 35)[0.2 + 0.005(22.93 - 40)] + 0.001(54.31 - 15)(5.36 - 10)$$

$$IG = 0.4$$

El resultado se redondea al número entero más cercano, obteniendo un índice de grupo igual a 0, por lo que el suelo se clasifica finalmente como A-4(0).

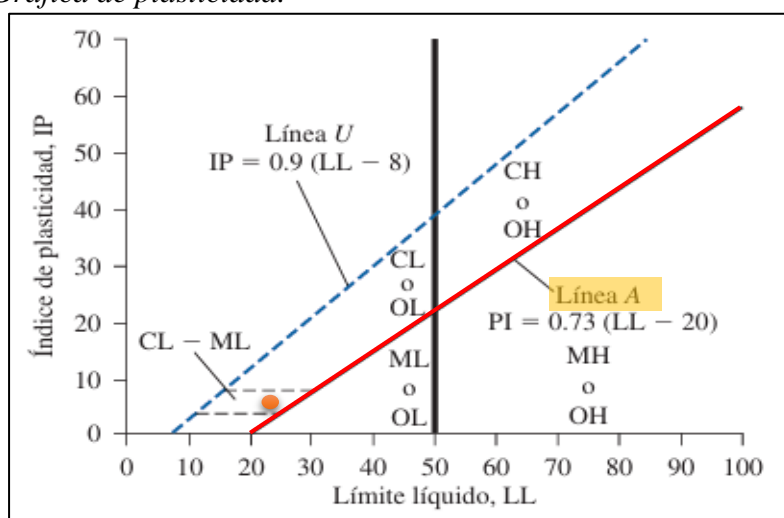
Se obtuvo un $IG = 0$, valor que indica un desempeño favorable dentro del grupo A-4. En consecuencia, el suelo presenta condiciones aceptables para su uso como subrasante, aunque requiere estabilización para mejorar su comportamiento en capas estructurales de pavimento.

4.1.4.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Con base en los resultados de granulometría y límites de Atterberg, y conforme a la norma ASTM D2487, el material se clasifica como suelo fino, ya que más del 50 % pasa el tamiz N.º 200. El punto representativo, con $LL = 22,93\%$ e $IP = 5,36\%$, se ubica ligeramente por encima de la Línea A en la Carta de Plasticidad de Casagrande, lo que indica una fracción arcillosa de baja plasticidad (ver Figura 15).

Figura 15

Grafica de plasticidad.



Fuente: Grafica del libro: Principios de mecánica de suelos (7ª ed.) por B. M. Das, 2012, Cengage Learning.

En consecuencia, el suelo se clasifica como CL-ML, es decir, una arcilla limosa de baja plasticidad, caracterizada por su baja cohesión, resistencia moderada y susceptibilidad a variaciones de humedad.

Tabla 17
Clasificación del suelo según los sistemas AASHTO y SUCS

Sistema de clasificación	Designación	Descripción del Suelo	Calidad como Subrasante	Observaciones Técnicas
AASHTO (M 145-91)	A-4 (0)	Limo o limo arenoso con baja plasticidad	Regular a mala	Material con alta proporción de finos; baja resistencia y susceptible a la humedad.
SUCS (ASTM D2487)	CL-ML	Arcilla limosa de baja plasticidad	Regular	Suelo fino con cohesión limitada; comportamiento intermedio entre limo y arcilla.

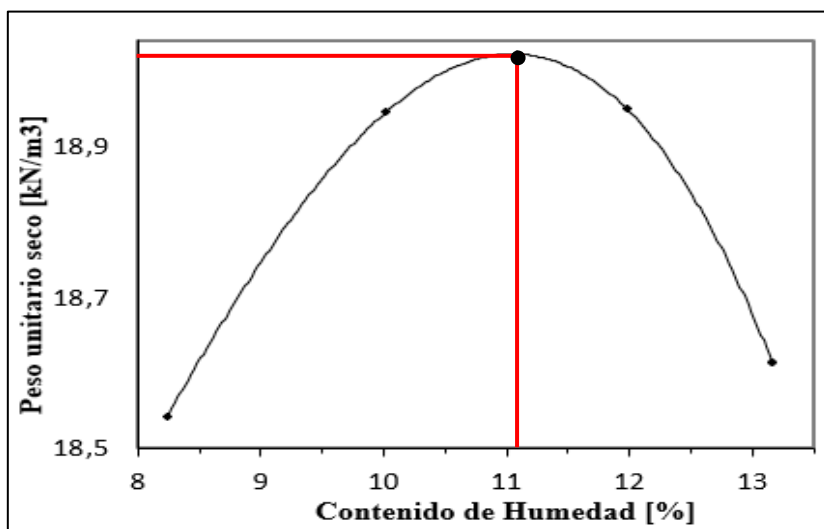
Nota: Elaboración propia en base a resultados de laboratorio y criterios de clasificación de AASHTO (M 145-91) y ASTM D2487 (2017).

4.1.4 Ensayo Proctor Modificado

Este ensayo permitió determinar las condiciones óptimas de compactación del suelo tipo A-4, obteniéndose un peso unitario seco máximo (PUSM) de 18,97 kN/m³ y una humedad óptima (Hopt) de 11,08 %. Estos valores reflejan un suelo de textura arcillosa limosa con fracción arenosa, capaz de alcanzar buena densificación bajo compactación intensa. La baja humedad óptima indica una moderada demanda de agua y baja plasticidad, coherente con los resultados de los ensayos de límites de Atterberg. En general, el suelo presenta cohesión moderada y puede experimentar cierta pérdida de capacidad portante cuando se satura o se somete a cargas repetidas, aspecto que debe considerarse en su uso dentro de estructuras de pavimento. En la Figura 16 se muestra la gráfica de la curva humedad–peso unitario seco obtenida en el ensayo.

Figura 16

Curva gráfica de humedad - peso unitario seco



Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Ensayo de CBR del suelo natural

El ensayo de CBR (California Bearing Ratio) se realizó con el objetivo de determinar la capacidad de soporte del suelo natural tipo A-4, mediante la aplicación de diferentes niveles de compactación correspondientes a 10, 25 y 56 golpes por capa, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D1883 - AASHTO T193.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- CBR a 10 golpes: 4,46 %
- CBR a 25 golpes: 9,18 %
- CBR a 56 golpes: 18,41 %

Estos valores evidencian que el aumento en el número de golpes por capa genera una mayor densificación del material, lo que se traduce en un incremento progresivo de la resistencia a la penetración. Es decir, el suelo presenta un comportamiento dependiente del grado de compactación: a mayor esfuerzo de compactación, mayor capacidad portante.

En la siguiente Tabla 18 presenta la comparación de los resultados obtenidos con los requerimientos establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC) para materiales de subrasante, subbase y base.

Tabla 18

Comparación de los resultados obtenidos con los requerimientos establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC)

Ensayo	Valor CBR (%)	Requisito ABC	Observaciones
CBR ₁₀ (10 golpes)	4,46	Subrasante $\geq 8 \%$	No
CBR ₂₅ (25 golpes)	9,18	Subrasante $\geq 8 \%$	Sí
CBR ₅₆ (56 golpes)	18,41	Subrasante $\geq 8 \%$	Sí
CBR ₅₆ (56 golpes)	18,41	Subbase $\geq 40 \%$	No
CBR ₅₆ (56 golpes)	18,41	Base $\geq 80 \%$	No

Nota. Elaboración propia.

A partir de los resultados se puede observar que el suelo solo cumple con los valores mínimos exigidos para una capa de subrasante ($\geq 8 \%$), siempre que se garantice una adecuada compactación en obra. Sin embargo, los valores obtenidos son insuficientes para emplearlo como material de subbase o base, ya que el CBR máximo alcanzado (18,41 %).

Por lo tanto, el suelo natural no posee la capacidad portante suficiente para ser utilizado directamente en capas estructurales de un pavimento. Esto justifica la necesidad de aplicar técnicas de estabilización, como la incorporación de cemento o de materiales suplementarios con propiedades cementantes, que permitan mejorar su resistencia de suelo.

Finalmente, en la siguiente tabla se presenta un resumen de los ensayos realizados al suelo natural, los cuales permitieron determinar sus propiedades físicas y mecánicas necesarias para su posterior análisis y clasificación.

Tabla 19*Resultados de los ensayos de caracterización del suelo natural*

N°	ENSAYO	UNID.	ESPECIFICACIÓN TECNICA	SUELO NATURAL
1	Contenido de humedad	%	-	13,06
2	Análisis Granulométrico	%	-	Grava = 1,55 Arena = 44,14 Finos = 54,31 LL = 22,93 LP = 17, 58
3	Límites de Atterberg	%		IP = 5,36
4	Proctor Modificado	KN/m ³		Peso unitario seco máx. = 18,97
		%		H opt. = 11,08
5	Relación Soporte California (CBR)	%	Subrasante ≥ 8 Subbase ≥ 40 Base ≥ 80	CBR ₁₀ = 4,46 CBR ₂₅ = 9,18 CBR ₅₆ = 18,41

Nota: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el material analizado corresponde a un suelo de baja plasticidad y composición arcilloso-limo-arenoso, clasificado como A-4 según el sistema AASHTO. Este tipo de suelo presenta buena compactabilidad, aunque limitada capacidad portante, cumpliendo únicamente con los valores mínimos requeridos para su uso como subrasante, sin alcanzar los valores requeridos para subbase ni base establecidos por la ABC

Por tanto, se considera necesario aplicar técnicas de estabilización que mejoren su comportamiento mecánico y su desempeño estructural en aplicaciones viales

4.2. Caracterización de la ceniza de hoja de bambú

4.2.1. Composición química de la ceniza

El análisis químico de las cenizas obtenidas de tres especies de bambú *Guadua paniculata*, *Bambusa vulgaris* y *Guadua angustifolia*, se realizó mediante técnicas de espectrofotometría

de absorción atómica, espectrofotometría visible y gravimetría clásica, conforme a los procedimientos normalizados del Instituto de Investigaciones Químicas de la UMSA.

Con el propósito de identificar la especie con mayor potencial puzolánico, se comparó principalmente el contenido de óxido de silicio (SiO_2), componente clave en la reactividad de las cenizas vegetales.

Tabla 20

Contenido de óxido de sílice (SiO_2) en hojas de distintas especies de bambú

Composición química	Símbolo	Guadua paniculata	Bambusa vulgaris	Guadua angustifolia	Método utilizado
Óxido de sílice	SiO_2	12,30	13,10	83,00	gravimetría clásica

Nota. Resultados emitidos por el Instituto de Investigaciones Químicas de la UMSA. Los resultados detallados de los análisis químicos realizados para cada especie de bambú, se presentan en el Anexo E.

Los resultados muestran diferencias significativas entre las especies analizadas. Guadua paniculata y Bambusa vulgaris presentan contenidos relativamente bajos de sílice (12,3 % y 13,1 %, respectivamente), mientras que Guadua angustifolia alcanza un valor de 83 %, demostrando un alto potencial puzolánico.

Dado que el contenido de sílice amorfa es un factor determinante en la capacidad de reacción con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, la especie Guadua angustifolia fue seleccionada para su uso en la presente investigación.

Es importante señalar que factores como la edad de la planta, el tipo de suelo donde crece, las condiciones climáticas y el proceso de calcinación influyen directamente en la concentración final de óxidos presentes en la ceniza. Por esta razón, los resultados obtenidos deben considerarse referenciales, útiles para orientar futuras investigaciones que busquen optimizar la producción y reactividad de las cenizas vegetales como materiales cementantes.

Tabla 21*Análisis de composición química de la especie de bambú: Guadua Angustifolia*

Composición Química	Simbolo	Resultados (%)	Requisito ASTM C618-19 (Clase N)	Observaciones
Oxido de silicio	SiO ₂	83		
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	1,71		
Oxido de hierro	Fe ₂ O ₃	0,35		
Oxido de calcio	CaO	1,58		
Oxido de azufre	SO ₃	0,4	≤ 4 %	Cumple
Humedad		3,92	≤ 3 %	Ligeramente superior
Perdida por ignición		9,85	≤ 10 %	Cumple
Σ (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃)		85,06	≥ 70 %	Cumple

Nota. Resultados emitidos por el Instituto de Investigaciones Químicas de la UMSA.

Al comparar estos valores con los requisitos mínimos establecidos por la norma ASTM C618-19 para materiales puzolánicos naturales o calcinados (Clase N) presentados en la Tabla 4 se observa que la ceniza de *Guadua angustifolia* cumple satisfactoriamente con los criterios químicos exigidos. Respecto al valor de humedad (3.92 %) supera levemente el límite especificado por la norma; sin embargo, este parámetro puede controlarse fácilmente mediante un secado previo de la ceniza antes de su uso como material puzolánico.

Estos resultados confirman que la ceniza de hoja de bambú de la especie *Guadua angustifolia* clasifica como una puzolana natural tipo N, según ASTM C618-19, evidenciando su potencial como material cementante suplementario apto para aplicaciones en estabilización de suelos.

4.2.2. Actividad puzolánica de la ceniza de hoja de bambú

Con el propósito de verificar el potencial de la ceniza de hoja de bambú (CHB) como material cementante suplementario, se evaluó su actividad puzolánica, entendida como la

capacidad del material para reaccionar con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) liberado durante la hidratación del cemento y formar compuestos con propiedades cementantes.

La CHB utilizada se obtuvo a partir de hojas secas de bambú de la especie *Guadua angustifolia*. El análisis químico reveló un alto contenido de sílice (SiO_2), acompañado de alúmina (Al_2O_3) y óxidos de hierro (Fe_2O_3), cuya suma supera el 70 %, cumpliendo con los criterios de la norma ASTM C618-19 para materiales puzolánicos.

Asimismo, se identificó la presencia de trióxido de azufre (SO_3) en proporciones moderadas, lo que favorece la formación de compuestos estables durante el proceso de hidratación, sin generar efectos expansivos.

Estos resultados indican que la CHB de la especie *Guadua angustifolia* presenta una actividad puzolánica significativa, lo que respalda su utilización como sustituto parcial del cemento en la estabilización de suelos tipo A-4.

4.3. Elaboración y compactación de mezclas suelo–cemento con diferentes porcentajes de sustitución de CHB

4.3.1. Ensayo de compactación del suelo-cemento

A continuación, se presentan los resultados del ensayo Proctor para la elaboración de mezclas de suelo-cemento, donde se observa el incremento del peso unitario seco máximo y del contenido de humedad óptimo del suelo natural al incorporar cemento, evidenciando la mejora en sus propiedades de compactación.

Tabla 22*Resultados del ensayo Proctor modificado para el suelo natural y el suelo-cemento*

Material	Unidades	suelo natural	suelo - cemento
Peso unitario seco máximo	KN/m ³	18,97	19,05
Contenido de humedad óptimo	%	11,08	12,00

Nota. Elaboración propia.

El incremento del peso unitario seco máximo y del contenido de humedad óptimo se atribuye a la reacción del cemento con las partículas del suelo, la cual produce una mayor cohesión y densificación del material. Asimismo, el aumento en la demanda de agua durante el proceso de hidratación contribuye a una mezcla más trabajable y compacta, generando una estructura más densa y resistente, adecuada para su aplicación en capas de subbase o base de pavimento.

4.3.2. Grado de compactación de las mezclas suelo-cemento con CHB

Este parámetro permite evaluar el nivel de densificación alcanzado y verificar el cumplimiento de los requisitos de compactación establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2007), que exige un grado de compactación mínimo del 95 % para capas tratadas con cemento.

La Tabla 23 muestra los resultados del peso unitario seco promedio, el peso unitario seco máximo y el grado de compactación promedio de las mezclas con diferentes porcentajes de sustitución de CHB.

Tabla 23

Resultados del de compactación promedio en probetas con diferentes porcentajes de sustitución de CHB

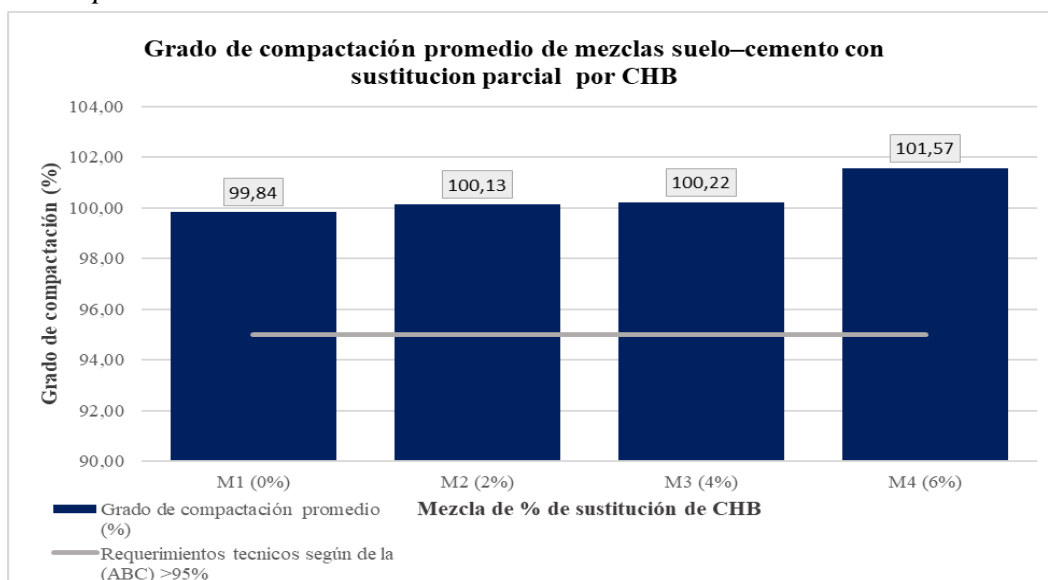
Mezcla	Porcentaje de cemento	porcentaje de sustitución de CHB	Peso unitario seco promedio (γ_d) (KN/m ³)	Peso unitario seco máximo ($\gamma_{d_{max}}$) (KN/m ³)	Grado de compactación promedio (%)	$\geq 95\%$
M1	4	0	19,02	19,05	99,84	Cumple
M2	4	2	19,08	19,05	100,13	Cumple
M3	4	4	19,09	19,05	100,22	Cumple
M4	4	6	19,35	19,05	101,57	Cumple

Nota. Todos los valores obtenidos cumplen con los requerimientos técnicos establecidos por la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC, 2007) para bases tratadas con cemento.

La Figura 17 muestra el incremento progresivo del grado de compactación conforme aumenta el porcentaje de sustitución con CHB, alcanzando su valor máximo (101,57 %) en la mezcla con 6 % de sustitución.

Figura 17

Grado de compactación promedio de probetas de mezclas suelo–cemento con sustitución parcial por CHB.



Fuente. Elaboración propia.

4.3.3. Análisis estadístico de la compactación

En la Tabla 24 se presentan los resultados del análisis estadístico de compactación. Los valores de desviación estándar (σ) y coeficiente de variación (CV) se expresan en porcentaje (%), ya que las mediciones corresponden al grado de compactación.

Tabla 24

Resultados de compactación y confiabilidad estadística

Mezcla	Cemento	Sustitución de CHB	Grado de compactación promedio	Desviación estándar (σ)	Coefficiente de variación (CV)	Observaciones
	%	%	%	%	%	
M1	4	0	99,84	0,776	0,782	Cumple
M2	4	2	100,13	1,139	1,138	Cumple
M3	4	4	100,22	0,369	0,369	Cumple
M4	4	6	101,57	0,778	0,766	Cumple

Nota. Los valores de CV son considerablemente menores al 30 %, por lo que se consideran estadísticamente consistentes y confiables (Gutiérrez & De la Vara, 2012).

Los valores de desviación estándar oscilaron entre 0,369 % y 1,139 %, y los coeficientes de variación entre 0,369 % y 1,138 %, lo que indica una dispersión mínima de los resultados. Según Gutiérrez y De la Vara (2012), un CV menor al 30 % refleja resultados consistentes y confiables, confirmando la uniformidad en la preparación y compactación de las probetas.

El incremento del grado de compactación promedio en la mezcla con 6 % de CHB sugiere una mejor distribución de partículas finas y una ligera actividad puzolánica, que mejora la cohesión interna y densificación del material, favoreciendo su comportamiento mecánico posterior.

4.4. Resultados de la resistencia a la compresión uniaxial

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de RCU para las mezclas elaboradas con suelo A-4, con diferentes porcentajes de sustitución de cemento por CHB. La Tabla 25 muestra los valores promedio de resistencia a la compresión obtenidos a los 7 días de curado.

Tabla 25

Valores promedio de RCU obtenidos a los 7 días de curado.

Descripción de la muestra de ensayo	Porcentaje de cemento	porcentaje de sustitución de CHB	Cantidad de muestra	Resistencia a la rotura por compresión uniaxial promediada	Observación
				[MPa]	
Probetas cilíndricas de suelo - cemento (100mm x 204 mm)	4	-	3	2,64 > 2,5	Buena
	4	2	3	2,62 > 2,5	Buena
	4	4	3	2,32 < 2,5	Malo
	4	6	3	2,27 < 2,5	Malo

Nota. Los valores corresponden a la segunda serie de ensayos realizados para las mezclas con 0%, 4% y 6% de CHB.

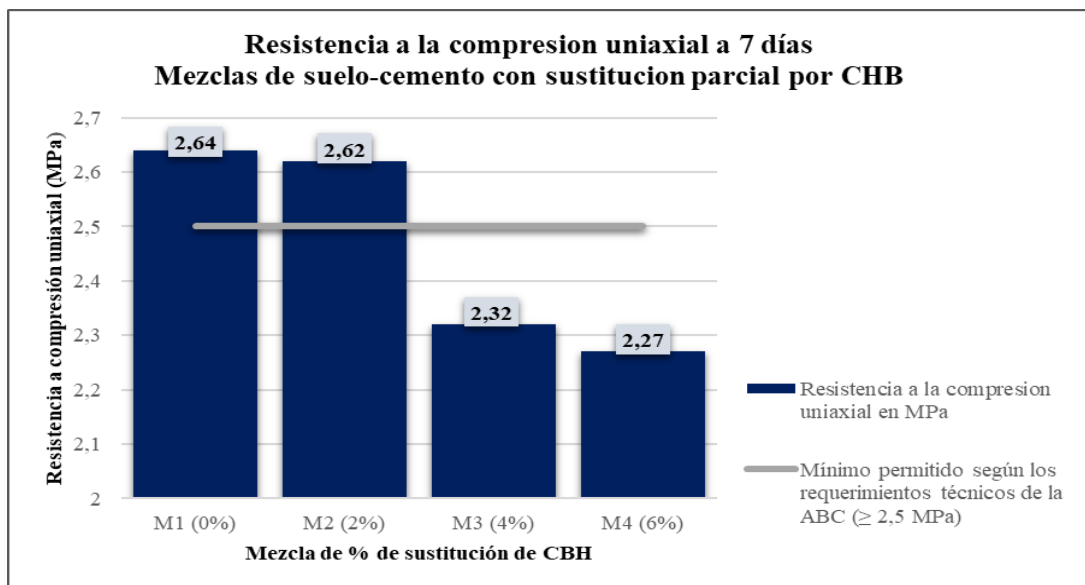
Como se puede observar en la Tabla 25, las mezclas con 4% y 6% de sustitución de cemento por CHB presentaron valores de resistencia a la compresión inferiores al mínimo requerido por la ABC (2,5 MPa) y menores al del material de control.

Durante el proceso de compactación se observó que sobraba una cantidad considerable de material, lo que sugiere una posible variación en la densificación y homogeneidad de las probetas, influyendo en los resultados iniciales de resistencia.

En la Figura 18 se presenta un gráfico de barras que permite visualizar con mayor claridad esta variación en los valores de resistencia entre las mezclas analizadas. Se aprecia que las muestras con 4% y 6% de CHB presentan una disminución notable respecto al material de control y a la mezcla con 2% de sustitución.

Figura 18

Resultados del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial para las mezclas de suelo-cemento con diferentes porcentajes de CHB.



Nota. Los valores corresponden a la primera serie de ensayos, antes de la repetición de las mezclas con 4% y 6% de CHB.

Con el propósito de garantizar la confiabilidad y representatividad de los resultados, se decidió repetir la elaboración de las probetas correspondientes a los porcentajes del 4% y 6% de CHB, aplicando rigurosamente el mismo procedimiento de mezclado, pesaje y compactación descrito en la metodología. Los nuevos valores obtenidos se presentan en la Tabla 26, donde se aprecia un comportamiento más coherente con la tendencia esperada, reflejando la correcta ejecución del proceso de compactación y la adecuada homogeneidad de las mezclas.

Tabla 26

Resultados corregidos del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial para las mezclas de suelo-cemento con diferentes porcentajes de CHB

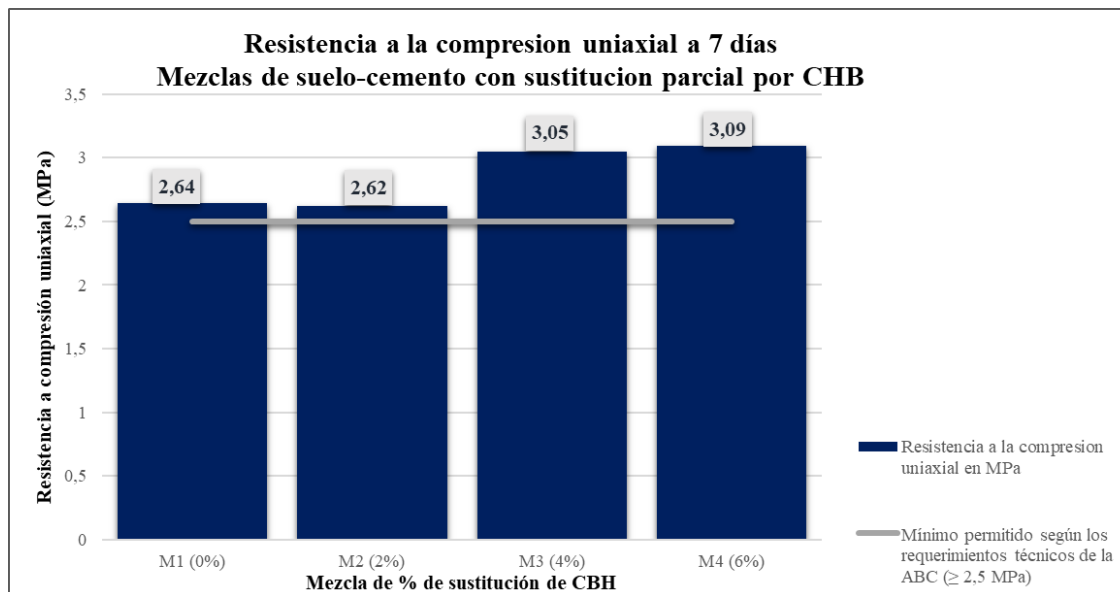
Descripción de la muestra de ensayo	Porcentaje de cemento	porcentaje de sustitución de CHB	Cantidad de muestra	Resistencia a la rotura por compresión uniaxial promediada	Observación
	[%]	[%]	[U]	[MPa]	
Probetas cilíndricas de suelo - cemento (100mm x 204 mm)	4	-	3	2,64 > 2,5	Buena
	4	2	3	2,62 > 2,5	Buena
	4	4	3	3,05 > 2,5	Buena
	4	6	3	3,09 > 2,5	Buena

Nota. Los valores obtenidos en la segunda serie de ensayos muestran que todas las mezclas cumplen con el requisito mínimo de resistencia a la compresión de 2.5 MPa establecido por los requerimientos técnicos de la Administradora Boliviana de Carreteras (ABC). Elaboración propia.

En la Figura 19 se presentan los valores promedio de RCU obtenidos para cada dosificación de mezcla suelo-cemento con sustitución parcial de CHB.

Figura 19

Valores promedio de RCU de las mezclas suelo-cemento con diferentes porcentajes de CHB, comparados con el mín. permitido por la ABC ($\geq 2,5$ MPa).



Nota. Elaboración propia.

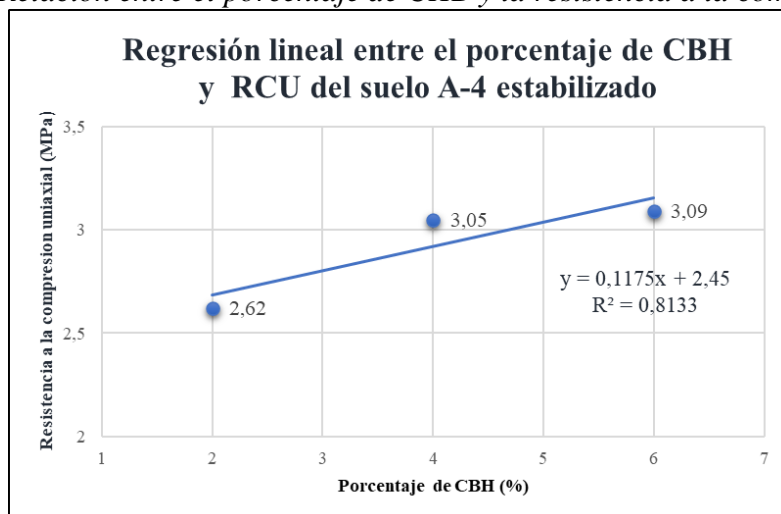
Mediante este gráfico permite apreciar visualmente el incremento de la resistencia con la sustitución parcial de cemento por CHB, destacando que los porcentajes de 4% y 6% presentan los mayores valores de resistencia, sin diferencias significativas entre ambos, y que todas las mezclas evaluadas superan el valor mínimo requerido de 2,5 MPa según los requerimientos técnicos de la ABC para capas estabilizadas.

4.5. Comportamiento de la resistencia con respecto al porcentaje de sustitución de CHB

La Figura 20 presenta la relación entre el porcentaje de ceniza de hoja de bambú (CHB) y los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos en las mezclas con sustitución parcial de cemento. La gráfica incluye únicamente las dosificaciones con CHB (2 %, 4 % y 6 %), dado que el propósito es analizar el comportamiento específico del material estabilizado con ceniza.

Figura 20

Relación entre el porcentaje de CHB y la resistencia a la compresión simple.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran una tendencia lineal ascendente, lo que indica que, dentro del rango evaluado, el incremento del porcentaje de CHB se asocia con un aumento progresivo de

la resistencia. La pendiente positiva de la recta refleja que la ceniza participa activamente en el desarrollo de la resistencia, evidenciando la presencia de reacciones puzolánicas que complementan el proceso de hidratación del cemento.

Sin embargo, es importante considerar que esta tendencia creciente se mantiene solo mientras exista suficiente hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) proveniente del cemento para que la CHB pueda reaccionar completamente. En dosificaciones superiores a las ensayadas, podría ocurrir que la cantidad de cemento ya no provea el Ca(OH)_2 necesario para activar toda la ceniza presente. En ese caso, la resistencia podría estabilizarse, es decir, permanecer prácticamente en un mismo nivel sin seguir aumentando, o incluso disminuir si una fracción importante de ceniza queda sin reaccionar.

Este análisis permite comprender que el comportamiento mecánico de las mezclas con CHB depende del equilibrio entre el contenido de ceniza y el cemento disponible para las reacciones. La regresión lineal presentada en la figura resume visualmente esta tendencia, proporcionando una base clara para interpretar cómo influye la sustitución en el desempeño del material antes de proceder al análisis estadístico mediante ANOVA.

4.7. Análisis estadístico de varianza (ANOVA) aplicado a los resultados de resistencia a la compresión

Con el propósito de evaluar si las diferencias observadas en la resistencia a la compresión uniaxial entre las distintas mezclas de suelo-cemento (0 %, 2 %, 4 % y 6 %) de sustitución de CHB son estadísticamente significativas, se aplicó el análisis de varianza de un factor (ANOVA de una vía). Este método estadístico permite comparar los promedios de varios grupos experimentales y determinar si las diferencias entre ellos son producto de una causa real o simplemente del azar.

El ANOVA se basa en la comparación de dos tipos de variabilidad:

- **Variabilidad entre grupos (SC_{TRAT}):** mide cuánto difieren las medias de los tratamientos (porcentajes de sustitución de CHB) respecto a la media general.
- **Variabilidad dentro de los grupos (SC_{Error}):** refleja la dispersión de los valores dentro de cada grupo de probetas, atribuible a errores experimentales o variaciones aleatorias.

El estadístico principal del ANOVA es el valor F, definido como la razón entre la varianza entre tratamientos y la varianza dentro de los tratamientos (ver figura 20).

Figura 21

Tabla de ANOVA Formulas

<i>FV</i>	<i>SC</i>	<i>GL</i>	<i>CM</i>	F_0	Valor-p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y_{..}^2}{N}$	$k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$	$\frac{CM_{TRAT}}{CM_E}$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	$N - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$	$N - 1$			

Fuente: Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (2ª ed., tabla 3.4, p. 69). McGraw-Hill.

Donde:

k = Número de tratamientos o grupos

n_i = Número de observaciones del tratamiento (i)

N = Total de observaciones

Y_{ij} = Valor individual observado

Y_i = Suma de las observaciones del tratamiento (i)

$Y_{..}$ = Suma total de todas las observaciones

Media Y_i = Media del tratamiento (i)

$SC_{\text{Trat}} =$ Suma de cuadrados entre tratamientos

$SC_{\text{Error}} =$ Suma de cuadrados del error

$SC_{\text{Total}} =$ Suma de cuadrados total

$CM_{\text{Trat}} =$ Cuadrado medio de tratamientos

$CM_{\text{Error}} =$ Cuadrado medio del error

$F_0 =$ Estadístico F calculado

Si el valor F calculado es mayor que el valor F crítico (determinado según el nivel de significancia, generalmente $\alpha = 0.05$), se rechaza la hipótesis nula (H_0), la cual plantea que todas las medias son iguales. En consecuencia, se acepta la hipótesis alternativa (H_1), indicando que al menos una de las mezclas presenta un comportamiento significativamente diferente.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4$$

H_1 : al menos una μ_i es diferente.

A continuación, en la Tabla 27, se presentan los valores experimentales obtenidos para las cuatro mezclas de suelo–cemento con diferentes porcentajes de sustitución por CHB:

Tabla 27

Resultados experimentales de resistencia a la compresión (MPa)

N°PROBETAS	GRUPOS			
	M1 (0%)	M2 (2%)	M3 (4%)	M4 (6%)
1	2,7475	2,4999	3,0761	3,0947
2	2,6734	2,6086	3,0993	3,0345
3	2,4976	2,7660	2,9859	3,1318
Suma (Y_i) =	7,9185	7,8745	9,1613	9,2610
Media (Y_i)=	2,6395	2,6248	3,0538	3,0870
Suma total ($Y_{..}$)=	34,2154			

Nota. Elaboración propia.

Cálculos previos:

$n_i =$	3	$SC_{\text{trat}} =$	0,5781
$N =$	12	$SC_{\text{total}} =$	0,6589
$k =$	4	$SC_{\text{Error}} =$	0,0808

Tabla 28*Análisis de varianza de una vía (ANOVA)*

Origenes de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F_0	Valor - P Probabilidad	Valor crítico para-F
Entre las muestras	0,5781	3	0,1927	19,0876	0,0005	4,0662
Dentro de las muestras	0,0808	8	0,0101			
Total	0,6589	11				

Nota. Elaboración propia.**Interpretación de resultados**

El valor de F calculado (19.09) es mayor que el F crítico (4.0662) y el valor p (0.0005) es menor que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$). Por tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternativa (H_1). Esto confirma que existen diferencias estadísticamente significativas entre las resistencias medias obtenidas con los distintos porcentajes de CHB.

Desde la perspectiva ingenieril, este resultado demuestra que la sustitución parcial del cemento por CHB sí modifica de manera real el comportamiento mecánico del suelo–cemento, es decir, la ceniza no se comporta como un material de relleno, sino como un agente cementante suplementario capaz de generar compuestos puzolánicos que incrementan la resistencia.

Conclusión del análisis ANOVA

- El valor $p < 0.05$ confirma que la sustitución de cemento por CHB tiene un efecto significativo sobre la resistencia a la compresión.
- La hipótesis del investigador (H_1) se acepta, mientras que la hipótesis nula (H_0) se rechaza.
- Las mezclas con 4 % y 6 % de sustitución mostraron los mayores incrementos de resistencia, evidenciando el potencial del material como aditivo puzolánico local para la estabilización de suelos A-4.

Para complementar los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA), se evaluó el incremento porcentual de la resistencia a la compresión de cada mezcla respecto a la muestra control, el cual representa el porcentaje de cambio de la resistencia a la compresión respecto al valor del control, permitiendo cuantificar el efecto de la sustitución parcial de cemento por CHB.

El cálculo del incremento porcentual se realizó mediante la ecuación:

$$\% \Delta R_C = \left(\frac{R_C \text{ MEZCLA} - R_C \text{ CONTROL}}{R_C \text{ CONTROL}} \right) * 100$$

Tabla 29

Incremento porcentual de la resistencia con respecto a la mezcla de control

Mezcla	RCU [MPa]	Comparación con Control (2.64 MPa)	Conclusión del Efecto
M1 Control (0% CHB)	2.64	Base (0.00%)	-
M2 (2% CHB)	2.62	-0.76%	Mínima reducción de resistencia (no se desarrolló las reacciones puzolánicas, en ese %).

M3 (4% CHB)	3.05	15.63%	Aumento significativo de resistencia.
M4 (6% CHB)	3.09	17.05%	Máximo aumento de resistencia.

Nota. Elaboración propia.

La sustitución de cemento por ceniza de bambú aumenta la resistencia a la compresión del suelo-cemento, la misma es significativa a partir del 4% de sustitución.

La dosificación con mayor efecto es la Mezcla M4 con un 6% de sustitución de cemento por Ceniza de Hoja de Bambú (CHB). cómo se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 30

Porcentaje de sustitución de CHB con mayor incremento respecto a la mezcla de control.

Mezcla	% Cemento (Base)	% Sustitución CHB	RCU (Mpa)	Observación
M1 (mezcla de control)	4	0	2.64	-
M4	4	6	3.09	+17.05% de aumento

Nota. Elaboración propia.

Esto evidencia que el 6 % es el porcentaje óptimo dentro del rango estudiado, ya que genera la mayor cantidad de productos de reacción puzolánica y contribuye a densificar la matriz suelo-cemento.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusión General

La investigación permitió evaluar el efecto de la sustitución parcial de cemento por ceniza de hoja de bambú (CHB) en la resistencia a la compresión del suelo A-4. Los resultados confirmaron la compatibilidad química de la CHB con el cemento IP30 y su contribución a la formación de compuestos cementantes secundarios.

En el rango evaluado (2 %–6 %), el 2 % de CHB mantuvo un desempeño similar al de la mezcla control, mientras que las dosificaciones de 4 % y 6 % mostraron incrementos claros de resistencia, superando los requisitos técnicos exigidos por las especificaciones de la ABC. La regresión lineal aplicada a las mezclas con CHB evidenció una tendencia creciente de resistencia asociada al aumento del porcentaje de sustitución.

En conjunto, los resultados demuestran que la CHB es un material técnicamente viable para la estabilización del suelo A-4 con cemento, mejorando la resistencia sin afectar la compactación ni el comportamiento estructural del material.

5.2. Conclusiones específicas

- La caracterización físico-mecánica del suelo A-4(0) confirmó que presenta una alta proporción de finos y baja plasticidad, lo que limita su capacidad portante en estado natural. tal como se muestra en la Tabla 19. Estos resultados justifican la aplicación de un proceso de estabilización en esta investigación mediante cemento y CHB.

- La ceniza de hoja de bambú (CHB) proveniente de *Guadua angustifolia* presentó un 83 % de sílice amorfa, cumpliendo los requisitos de la ASTM C618. Los resultados de la Tabla 21 confirman su elevada actividad puzolánica, permitiendo reaccionar con el hidróxido de calcio liberado por el cemento y formando compuestos cementantes secundarios que contribuyen al desarrollo de resistencia.
- Se elaboraron las mezclas de suelo–cemento y las mezclas con sustitución parcial de 2 %, 4 % y 6 % de CHB que fueron preparadas según normas ASTM D1632. Los resultados de compactación se presentan en la Tabla 23, donde todas las muestras superaron el 95 % de la compactación requerida por la ABC, garantizando la confiabilidad de los valores obtenidos en los ensayos de resistencia.
- La comparación de la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) entre las diferentes dosificaciones, presentada en la Tabla 29, permitió evaluar el incremento relativo respecto a la mezcla control. Se observó que las mezclas con 4 % y 6 % de CHB superaron la resistencia mínima de 2,5 MPa exigida por la ABC, siendo la dosificación del 6 % la que alcanzó el mayor aumento respecto al control.”
- El análisis ANOVA (Tabla 28) confirmó la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las dosificaciones ($p < 0,05$). Esto respalda parcialmente la hipótesis planteada y confirma que la sustitución parcial de cemento por CHB influye de manera positiva en la resistencia a la compresión del suelo A-4, especialmente en los porcentajes del 4 % y 6 %.

5.3 Recomendaciones

Se recomienda desarrollar inventarios forestales y cartografía actualizada de las especies de bambú presentes en el departamento de Pando, priorizando *Guadua angustifolia*. Esto permitirá identificar zonas de disponibilidad sostenible y asegurar el abastecimiento continuo de materia prima para futuras investigaciones y aplicaciones ingenieriles.

Se sugiere fortalecer el uso integral del bambú *Guadua angustifolia*, destinando sus tallos a la construcción de estructuras semi ecológicas, debido a las buenas propiedades mecánicas demostradas en estudios previos, y empleando sus hojas como fuente de ceniza puzolánica. Este enfoque contribuye a la reducción de residuos forestales y promueve cadenas productivas sostenibles en la región.

Se recomienda ampliar la investigación incorporando dosificaciones mayores de CHB (8 % y 10 %), con el propósito de identificar el límite a partir del cual la reactividad puzolánica deja de producir incrementos en la resistencia y, por tanto, establecer con mayor precisión el porcentaje óptimo de sustitución.

Para ampliar la aplicabilidad del material, se propone estudiar el desempeño de la CHB en suelos de mayor plasticidad, como A-6 y A-7, en combinación con cal hidratada. Esto permitiría analizar parámetros complementarios como el CBR y valorar su uso en capas de subrasante.

Para futuros ensayos, es fundamental mantener condiciones estrictamente controladas de curado y compactación, garantizando uniformidad en la humedad y en la energía aplicada. Esto mejorará la repetibilidad de los resultados y aumentará la confiabilidad de las conclusiones experimentales.

CAPÍTULO VI

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

ABC. (2011). Manual de construcción de bases de suelo-cemento por el proceso de mezcla en sitio. La Paz: Administradora Boliviana de Carreteras.

Acuña Vera, M.S. (2022). Resistencia a compresión y flexión de un ladrillo suelo-cemento usando suelos tipo SC y CL [Tesis]. Universidad Privada del Norte.

Administración Boliviana de Carreteras (ABC). (2007). Manual de ensayos de suelos y materiales: Suelos Vol 4.

American Cement Association. (2020). *Soil-Cement: Engineered Mixture for Durable and Sustainable Infrastructure*. Washington, D.C.: American Cement Association.

American Concrete Institute (ACI). (1997). State of the art report on soil cement (ACI 230.1R-90). Farmington Hills, MI: ACI Committee 230.

Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C., & Amadi, C. (2020). A review of the principles and methods of soil stabilization. *International Journal of Advanced Academic Research | Sciences, Technology and Engineering*, 6(3), 89-98.

<https://www.researchgate.net/publication/342448451>

Arriaga, M., & Palomino, L. (2020). Evaluación del mejoramiento de suelos lateríticos con cenizas de productos orgánicos y cenizas volantes [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional UPEU.

ASTM International. (2012). ASTM D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM International. (2017). ASTM D1632-17: Standard practice for making and curing soil–cement compression and flexure test specimens in the laboratory. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1632-17>

ASTM International. (2019). ASTM C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>

ASTM International. (2023). ASTM D1633-23: Standard test methods for compressive strength of molded soil–cement cylinders. West Conshohocken, PA: ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1633-23>

Bheel, A. et al. (2020). Uso de finos de piedra caliza y cenizas agroindustriales como sustitutos parciales del cemento en hormigones. *Journal of Construction Materials*.

Cardona Castro, D. F. (2015). Caracterización de la ceniza de hojas de bambú y su influencia como material puzolánico en el concreto [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. Repositorio Institucional EAFIT.

Condori Cuentas, B. M. (2024). Estabilización de suelo arcilloso con ceniza de carbón vegetal, para su aplicación en el Campus Universitario de Cota Cota. Repositorio UMSA, La Paz, Bolivia.

Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.). Sage Publications.

Cuévara Ricardo & Howland Albear (2018). Influencia de la sustitución parcial del cemento por puzolanas naturales y cenizas volantes en propiedades mecánicas y durabilidad. *Revista Ingeniería y Arquitectura*.

- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7.^a ed.). Cengage Learning Editores.
- FICEM: Quintanilla, R. (2007). Construcción de bases de suelo-cemento por el proceso de mezcla en sitio. Federación Interamericana del Cemento
- Firoozi, A. A., Olgun, G., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *Geo-Engineering*, 8(26). <https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9>
- Gómez Castro, J., & Acha Daza, E. (2010). Estudio de las propiedades físico-mecánicas del bambú *Guadua angustifolia* y su aplicación en la construcción de viviendas ecológicas (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Gómez Castro, R. C., & Acha Daza, N. V. (2010). *Tecnología del bambú*. ECORFAN-Bolivia. Recuperado de <https://www.ecorfan.org/bolivia/libros/Tecnologiadelbambu.pdf>
- Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (2^a ed.). McGraw-Hill.
- Huang, J. et al. (2017). Efecto de sustitución parcial de cemento por piedra caliza en concreto de ultra alto desempeño. *Cement and Concrete Research*.
- Ismanti, S., & Yasufuku, N. (2017). Effect of bamboo leaf ash addition in cemented bamboo chips-sand soil mixture. *Lowland Technology International*, 19(1), 13–26.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Design and control of concrete mixtures* (14th ed.). Portland Cement Association.
- Mamani Mollo, J. R. (2018). Evaluación de la propagación de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth y *Guadua angustifolia* bicolor) con diferentes segmentos vegetativos, en la Estación Experimental de Sapecho, provincia Sud Yungas, departamento de La Paz (Tesis de licenciatura). Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

Mas, J.M. & Kirschbaum, C.F. (2012). Estudios de resistencia a la compresión en bloques de suelo-cemento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16.

Norma ASTM D2216-19: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

Pennsylvania State University, College of Engineering. (n.d.). *Composition of cement*. Recuperado el 16 de noviembre de 2025, de <https://www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/composition%20of%20cement.htm>

Pitta, M. R. (2002). *Dosificación de mezclas de suelo-cemento: Normas de dosificación* (Traducción autorizada por Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón). La Paz, Bolivia: Instituto Boliviano del Cemento y el Hormigón.

Sandoval Mayta, H.J. (2024). Influencia de la sustitución parcial de cemento en propiedades del concreto. Repositorio Universidad Católica.

Tecnología del Bambú. (2023). *El bambú en Latinoamérica: propiedades, usos y sostenibilidad*. Lima, Perú: Editorial EcoHabitat.

Whitlow, R. (1990). *Fundamentos de la mecánica de suelos [Apuntes]*. uDocz. Recuperado de <https://www.udocz.com/apuntes/100234/fundamentos-de-la-mecanica-de-suelos-roy-whitlow>.

Wijaya, W., Ismanti, S., & Rifa'i, A. (2020). Soft clay improvement using bamboo leaf ash on CBR values. *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(012007). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012007>.

ANEXOS

**Anexo A. Recolección y caracterización de las propiedades físico –
mecánico del suelo A-4**

Figura A22. Recolección de muestras de suelo mediante calicatas.



Figura A23. Ensayo de límites de Atterberg y granulometría por tamizado

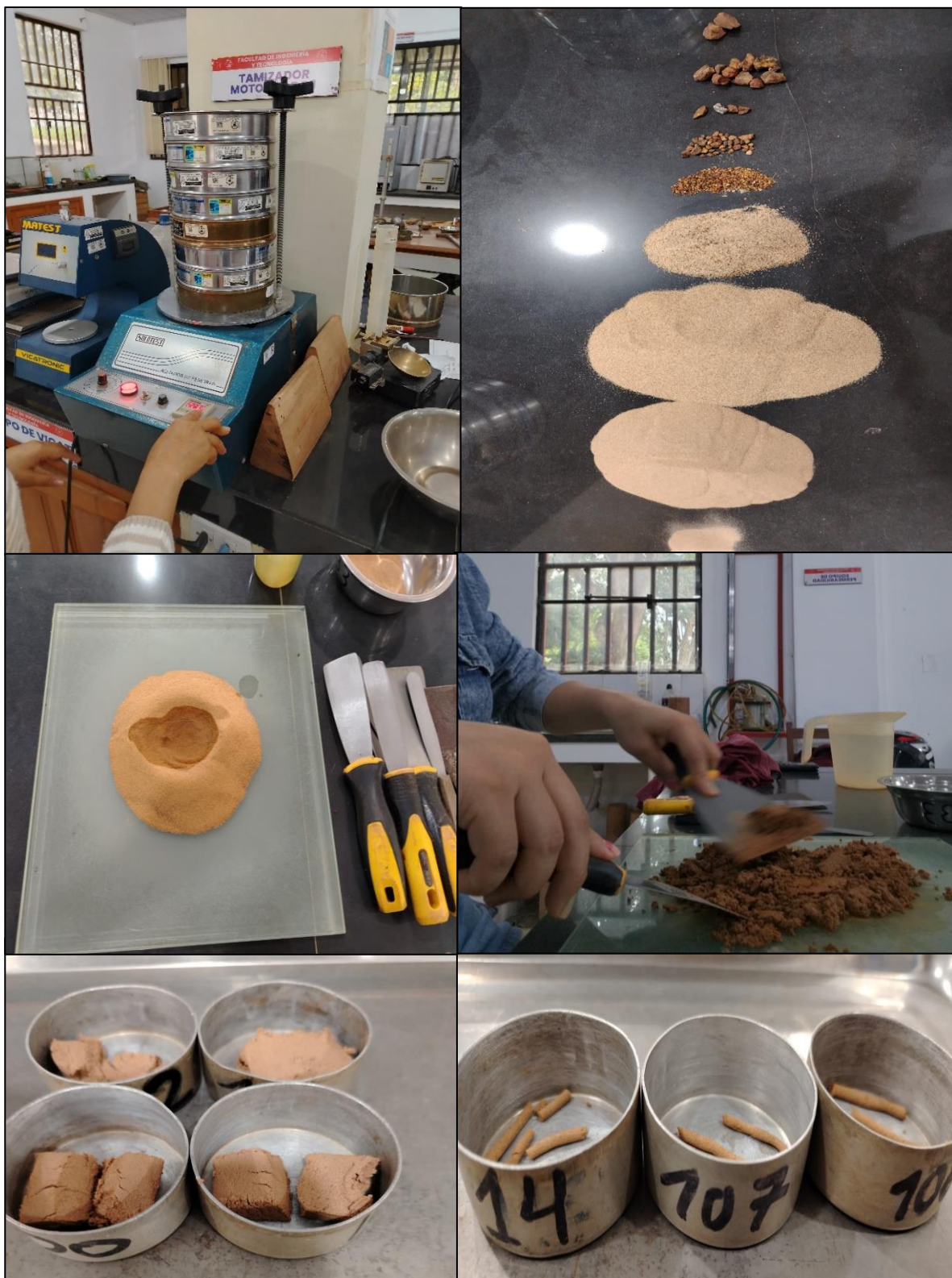


Figura A24. Ensayo Proctor Modificado y CBR



Anexo B. Proceso de Obtención de la ceniza de hoja de bambú

Figura B25. Recolección de hojas de bambú *Guadua angustifolia*



Figura B26. Recolección de hojas de *Bambusa Vulgaris*

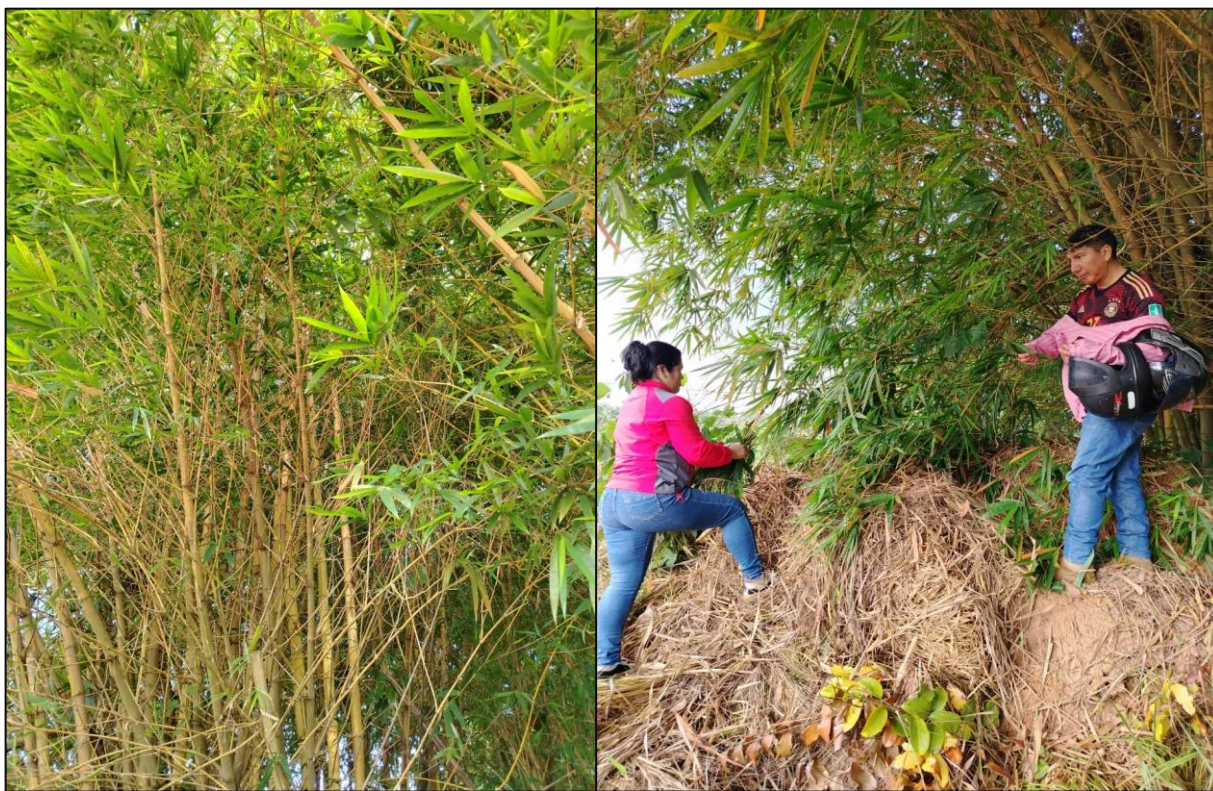


Figura B27. Recolección de hojas de *Guadua Paniculata*



Figura B28. Limpieza, secado y trituración de las hojas de bambú recolectadas



Figura B29. Proceso de calcinación controlada de hojas de bambú



Figura B30. Ceniza de hoja de bambú obtenida y tamizada para uso en mezclas



Anexo C. Preparación de las mezclas suelo–cemento–CHB

Figura C31. Porcentaje de sustitución al 2% de sustitución.



Figura C32. Porcentaje de sustitución al 4% de sustitución.



Figura C33. Porcentaje de sustitución al 6% de sustitución



Anexo D. Ensayo de resistencia a la compresión

Figura D34. Medición de las probetas y pesado antes de la rotura

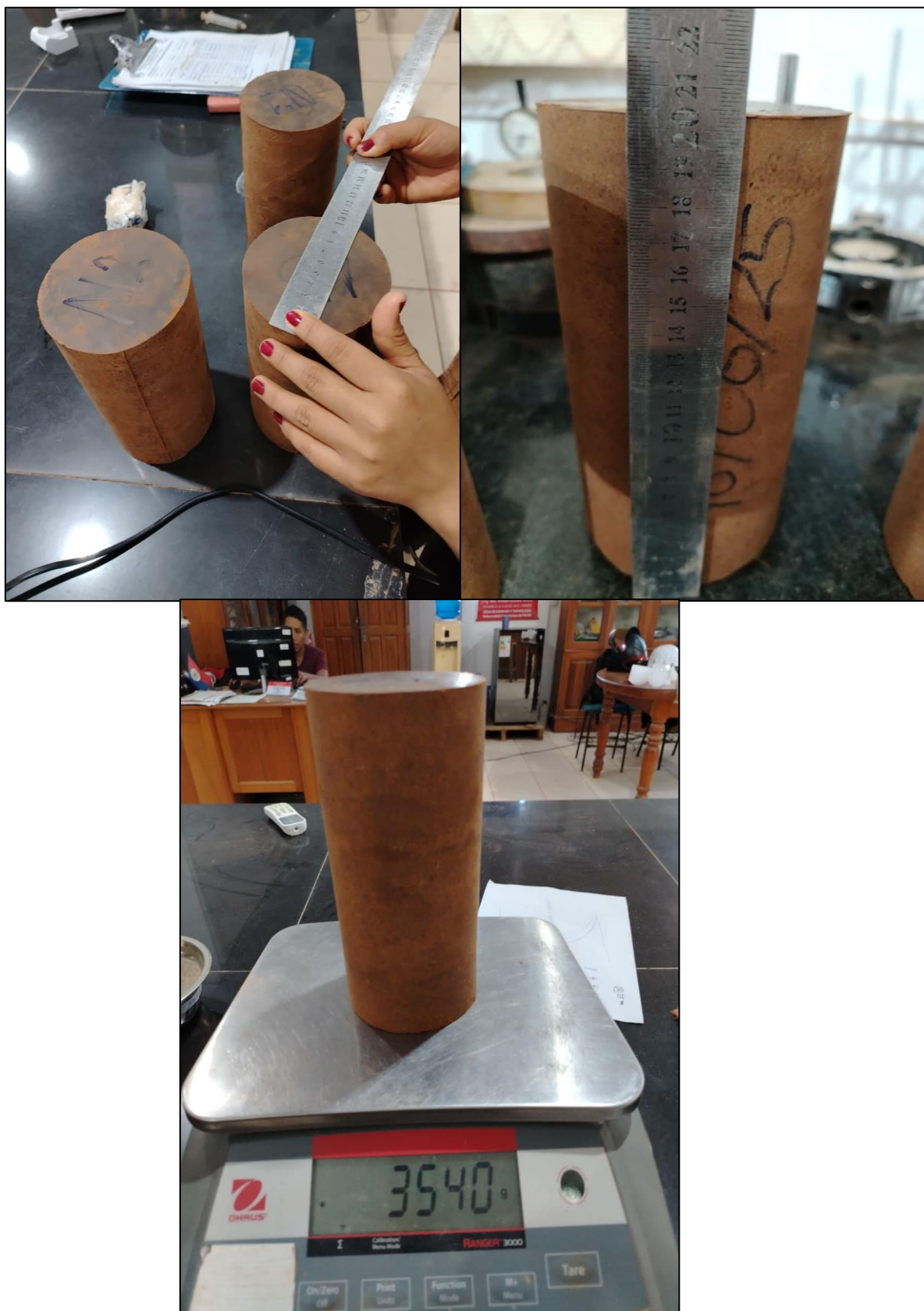


Figura D35. Probeta fallada tras el ensayo de compresión a 7 días – 2% CHB



Figura D36. Probeta fallada tras el ensayo de compresión a 7 días – 4% CHB



fallada tras el ensayo de compresión a 7 días – 6% CHB

Figura D37. Probeta



Anexo E. Planillas de ensayos de laboratorio

Figura E39 Planilla de análisis granulométrico (ASTM D422-ASTM T889)



UNIVERSIDAD AMAZÓNICA DE PANDO
 Área de Ciencias y Tecnología
 Laboratorio de Suelos y Hormigones
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM D422 - ASTM T88)

**1. DATOS GENERALES**

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú
Ubicación: B/ 27 de Junio
Fecha: 28/5/2025
Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

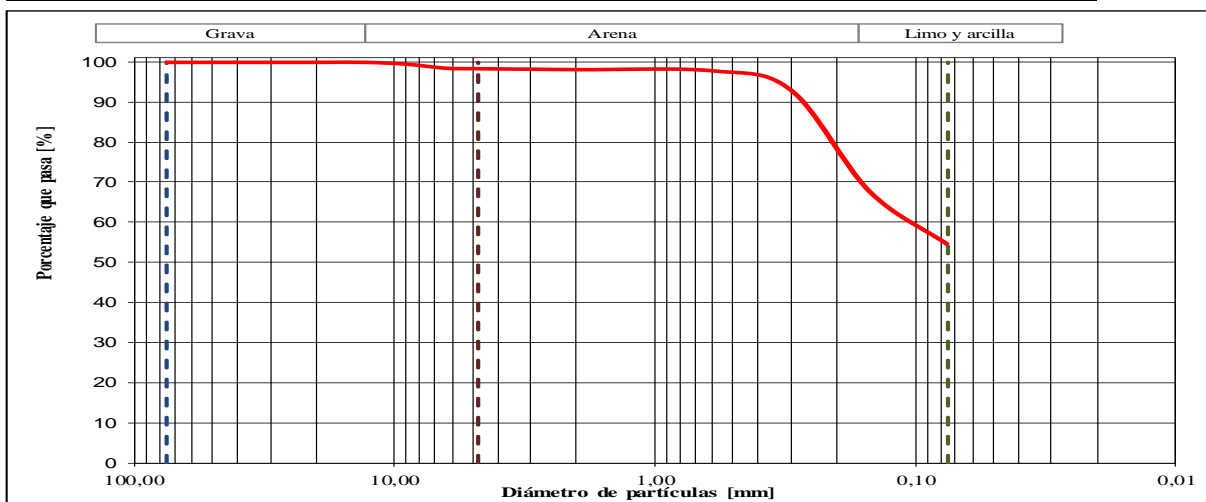
2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m
Descripción del suelo: AASTHO A-4 (0)
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)

3. DATOS TÉCNICOS

Masa Recipiente, g: 61,65
Masa Muestra seca + Recipiente, g: 720,55
Masa Muestra seca W_s : 658,90
M. Muestra seca reten. en el No 200 después del lavado, g: 263,35

Tamiz No.	Diámetro (mm)	Masa ret.(g)	Masa ret acum (g)	% retenido	% que pasa
3"	76,2	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,8	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,0	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	13,0	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,0	3,40	3,40	0,46	99,54
1/4"	6,3	7,50	10,90	1,49	98,51
4	4,750	0,80	11,70	1,60	98,40
10	2,000	1,65	13,35	1,83	98,17
30	0,600	2,20	15,55	2,13	97,87
50	0,300	35,60	51,15	6,99	93,01
100	0,150	185,15	236,30	32,30	67,70
200	0,075	97,45	333,75	45,63	54,37
Bandeja	0,000	2,20	731,50	100,00	0,00

**4. RESULTADOS****Distribución granulométrica**

% de grava: 1,55
 % de arena: 44,14
 % de finos: 54,31

Diámetros correspondiente al porcentaje de finos que pasa el 10, 30, y 60%

D_{60} , mm: 0,10
 D_{30} , mm: Suelo muy fino
 D_{10} , mm: Suelo muy fino

Coefficiente de uniformidad y de curva

Cc: No necesario
 Cu: No necesario

Figura E40 Planilla de Límites de Consistencia (ASTM D4318 – ASTM T89)

UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Area de Ciencia y Tecnologia
Laboratorio de Suelos y Hormigones
LÍMITES DE CONSISTENCIA (ASTMD4318 - ASTM T89)

**1. DATOS GENERALES**

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú

Ubicación: B/ 27 de Junio

Fecha: 28/5/2025

Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

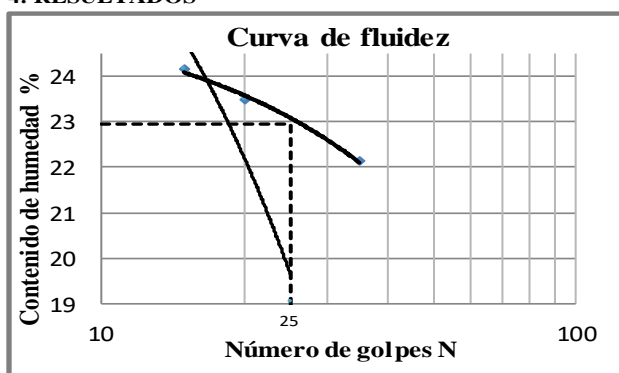
Identificación muestra: M A-4

Profundidad: 0,80 m

3. DATOS TÉCNICOS

Descripción	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO			
	Datos			
Número de contenedor	11	12	100	104
Masa de contenedor [g]	12,20	12,30	12,30	12,25
Número de golpes	15	20	25	35
Masa del suelo húmedo + contenedor [g]	28,65	25,45	29,80	26,60
Masa de suelo seco + contenedor [g]	25,45	22,95	27,00	24,00
Masa de suelo seco [g]	13,25	10,65	14,70	11,75
Masa de agua [g]	3,20	2,50	2,80	2,60
Contenido de humedad [%]	24,15	23,47	19,05	22,13

Descripción	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO		
	Datos		
Número de contenedor	106	107	14
Masa de contenedor [g]	12,25	10,50	12,30
Masa de suelo húmedo + contenedor [g]	13,65	12,05	13,25
Masa de suelo seco + contenedor [g]	13,40	11,80	13,15
Masa de suelo seco [g]	1,15	1,30	0,85
Masa de agua [g]	0,25	0,25	0,10
Contenido de humedad [%]	21,74	19,23	11,76

4. RESULTADOS

Límite Líquido (LL) =	22,93 %
Límite Plástico (LP) =	17,58 %
Índice plasticidad (IP) =	5,36 %

Figura E41 Planilla de ensayo Proctor modificado (ASTM D1557)



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos y Hormigones
PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557)

**1. DATOS GENERALES**

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú
Ubicación: B/ 27 de Junio
Fecha: 29/5/2025
Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m
Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada Recompactada
Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: 0
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)

3. DATOS TECNICOS

Método utilizado: B **Diametro del molde [mm]** 101,26
Gravedad específica: --- **Altura del molde [mm]** 116,38
Volumen [cm³]: 937,2 **Porcentaje de cemento** 0,00%

3.1. PESO UNITARIO

Descripción	Datos				
	1	2	3	4	5
N° de medición					
Masa molde + suelo [g]	6160,0	6234,0	6270,0	6255,0	6255,0
Masa molde [g]	4242	4242	4242	4242	4242
Masa húmeda del suelo [g]	1918	1992	2028	2013	2013
Peso unitario humedo [kN/m ³]	20,01	20,79	21,16	21,01	21,01

3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

Descripción	Datos									
	106	21	22	14	4	2	29	16	29	16
Número de contenedor										
Masa del contenedor [g]	12,30	19,00	22,15	12,30	12,30	22,15	17,45	18,75	17,45	18,75
Masa suelo húmedo + cont. [g]	26,80	33,80	37,70	32,40	31,75	40,95	38,46	37,86	38,46	37,86
Masa suelo seco + cont. [g]	25,70	32,67	36,30	30,55	29,69	38,92	35,79	35,85	35,79	35,85
Contenido de humedad [%]	8,21	8,27	9,89	10,14	11,85	12,10	14,56	11,75	14,56	11,75
HUMEDAD PROMEDIO [%]	8,24		10,02		11,98		13,16		13,16	
PESO UNITARIO SECO [kN/m³]	18,49		18,89		18,90		18,56		18,56	

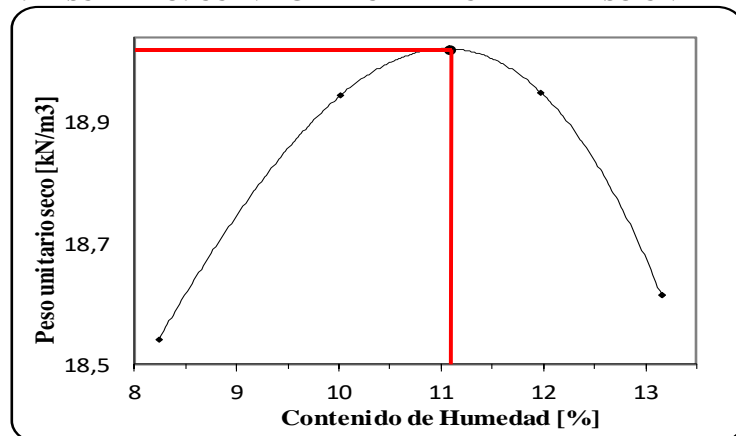
4. RESULTADO: CURVA GRÁFICA DE HUMEDA - PESO UNITARIO

Figura E42 Planilla de ensayo de Relacion de Soporte de California CBR (ASTM 1883 -ASTM T193)



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos y Hormigones



ENSAYO DE RELACION DE SOPORTE DE CALIFORNIA DEL SUELO EN LABORATORIO (CBR)
(ASTM D1883 - AASHTO T193)

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú
Ubicación: B/ 27 de Junio
Fecha: 5/6/2025
Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

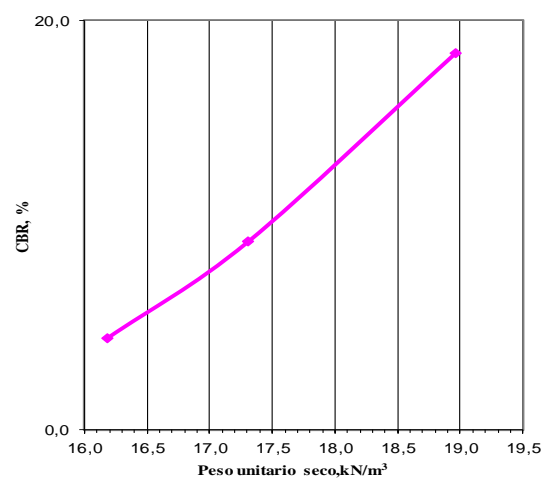
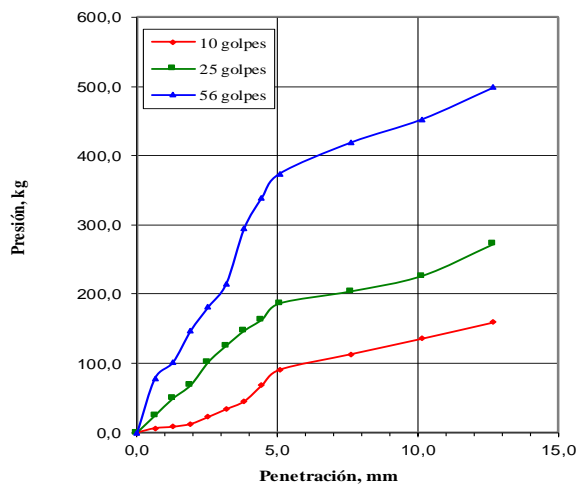
2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m
Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada Recompactada

Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: (0)
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)
Descripción de la muestra: Muestra sumergida Muestra no sumergida

3. RESUMEN DE RESULTADOS

Lectura de penetración, in	Penetración mm	Carga kg (10 golpes)	Carga, kg (25 golpes)	Carga, kg (56 golpes)
0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,025	0,64	6,12	24,47	78,52
0,050	1,27	8,16	48,95	100,95
0,075	1,91	12,24	68,32	146,84
0,100	2,54	22,43	101,97	181,51
0,125	3,18	33,65	125,42	215,16
0,150	3,81	44,87	146,84	294,69
0,175	4,45	68,32	163,15	339,56
0,200	5,08	90,75	186,61	374,23
0,300	7,62	113,19	203,94	419,10
0,400	10,16	135,62	226,37	452,75
0,500	12,70	159,07	272,26	498,63



Número de golpes	Penetración mm	Presión alcanzada kg	Presión estándar, MPa	CBR %	Peso unitario seco, kN/m3
10	5,00	90,75	10,30	4,46	16,18
25	5,00	186,61	10,30	9,18	17,31
56	5,00	374,23	10,30	18,41	18,97

Figura E43 Informe de análisis químico de especies de bambú: Bambusa Vulgaris y Guadua Paniculata



Servicio de Análisis INFORME - LABORATORIO



INFORME DE ANALISIS

IIQ/LSA/10/08/2024

1. Solicitante: Nicole Gonzales
2. Análisis: Minerales en Cenizas de Bambú
3. Muestra: Hojas de Bambú secas verde y amarilla
4. Procedencia: Ciudad de Cobija, Pando
5. Fecha de Recepción: 22 de julio de 2024
6. Fecha de Análisis: 7 al 15 de agosto de 2024
7. Resultados:

Parámetro	Unidad	B.H.V.	B.H.A.
Cenizas	%	16,2	13,1
Oxido de Silicio (Si O ₂)	%	12,3	9,7
Oxido de Calcio (Ca O)	%	0,36	0,32
Oxido de potasio (K ₂ O)	%	3,3	2,8
Oxido de manganeso (MnO ₂)	%	0,06	0,05
Oxido de Magnesio (Mg O)	%	0,08	0,1
Óxido de Azufre(SO ₂)	%	0,14	0,1

Ref. B.H.V.: Bambú hojas verde, B.H.A.: Bambú hojas amarillas

8. Metodología empleada:

- Calcio, Potasio, Manganeso, Magnesio: Método Llama de Absorción atómica.
- Azufre: Método Espectrofotometría Visible.
- Cenizas, Silice: Método Gravimetría clásica.



Figura E44 Informe de análisis químico de especie de bambú *Guadua Angustifolia*



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS

Servicio de Análisis INFORME - LABORATORIO



INFORME DE ANALISIS IIQ/LSA/19/10/2024

1. **Solicitante:** Nicole Mishell Gonzales Chao
 2. **Análisis:** Análisis de Minerales en Cenizas
 3. **Muestra:** Hoja de Bambú triturada y seca
 4. **Procedencia:** Ciudad de Cobija, Pando
 5. **Fecha de Recepción:** 07 de octubre de 2024
 6. **Fecha de Análisis:** 18 al 31 de octubre de 2024
 7. **Resultados**

Parámetro	Unidad	H.B.S.
Dióxido de Silicio (Si O ₂)	%	83,00
Oxido de Calcio (Ca O)	%	1,58
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	%	1,71
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	%	0,35
Trióxido de azufre (SO ₃)	%	040
Humedad	%	3,92
Perdidas por Ignición	%	9,85

Ref. H.B.S: Hojas de bambú seca.

8. Metodología empleada:

- Calcio, Aluminio, Hierro: Método Llama de Absorción atómica.
- Azufre: Método Espectrofotometría Visible.
- Humedad, Sílice: Método Gravimetría clásica.



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS

Servicio de Análisis INFORME - LABORATORIO



9. Observaciones:

- La muestra fue recibida y analizada en laboratorios del Servicio de Análisis, dependiente del Instituto de Investigaciones Químicas de la Universidad Mayor de San Andrés.

Es cuanto tenemos a bien informar, para fines consiguientes de la interesada.

La Paz, 31 de octubre de 2024


Lic. Hernán B. Valdivia Zambrana
Laboratorio Servicio de Análisis


V°B° Giovanna Almanza Vega Ph.D.
Directora Instituto Investigaciones Químicas



Figura E45 Planilla de ensayo Proctor para mezclas de suelo-cemento (ASTM D558)



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos



ENSAYO PROCTOR PARA MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO (ASTM D558)

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú
Ubicación: B/ 27 de Junio
Fecha: 10/6/2025
Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m
Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada Recompactada
Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: 0
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)

3. DATOS TECNICOS

Método utilizado: A **Diametro del molde [mm]** 101,26
Gravedad específica: --- **Altura del molde [mm]** 116,38
Volumen [cm³]: 937,2 **Porcentaje de cemento** 4,00%

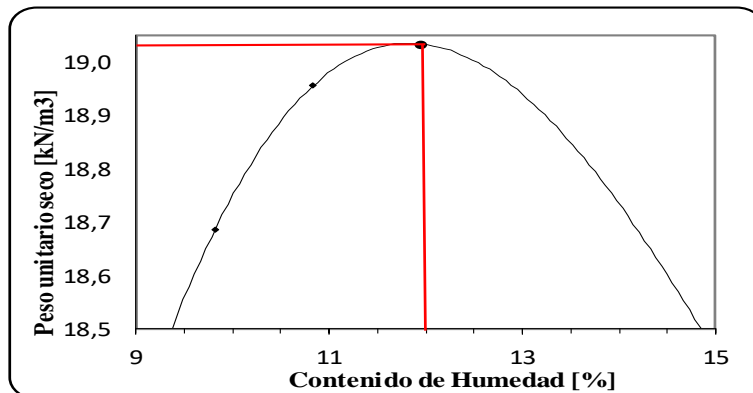
3.1. PESO UNITARIO

Descripción	Datos			
N° de medición	1	2	3	4
Masa molde + suelo [g]	6206	6253	6270	6247
Masa molde [g]	4245	4245	4245	4245
Masa húmeda del suelo [g]	1961	2008	2025	2002
Peso unitario humedo [kN/m ³]	20,46	20,95	21,13	20,89

3.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

Descripción	Datos							
Número de contenedor	P-73	A-9	A-2	A-7	26	34	X-1	X-3
Masa del contenedor [g]	17,65	19,70	18,75	19,70	17,90	18,60	18,75	22,20
Masa suelo húmedo + cont. [g]	50,65	50,45	53,90	61,40	49,40	61,75	65,90	67,30
Masa suelo seco + cont. [g]	47,65	47,75	50,40	57,40	45,15	56,20	59,05	61,15
Contenido de humedad [%]	10,00	9,63	11,06	10,61	15,60	14,76	17,00	15,79
HUMEDAD PROMEDIO [%]	9,81		10,83		15,18		16,39	
PESO UNITARIO SECO [kN/m³]	18,63		18,91		18,35		17,95	

4. RESULTADO: CURVA GRÁFICA DE HUMEDA - PESO SECO UNITARIO



PESO UNITARIO SECO
MÁXIMO [kN/m³] **19,05**
CONTENIDO DE HUMEDAD
ÓPTIMO [%] **12,00**

Figura E47 Planilla de grado de compactación de mezclas de suelo-cemento



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos y Hormigones
GRADO DE COMPACTACION DE MEZCLA DE SUELO-CEMENTO

**1. DATOS GENERALES**

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú

Ubicación: B/ 27 de Junio

Fecha: 14/7/2025

Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m

Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada

Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: (0)
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)

Tipo de cemento: Viacha IP30 **Suelo- Cemento** 4%

3. DATOS TECNICOS

Método utilizado: A **Diametro del molde [mm]** 100,00

Gravedad específica: --- **Altura del molde [mm]** 204,00

Volumen [cm³]: 1602,21 **Peso unitario seco max. [KN/m³]** 19,05

Contenido de humedad óptimo [%] 12,00

Probeta de ensayo	Masa humed de la mezcla de suelo-cemento	Contenido de humedad final	Peso unitario humedo	Peso unitario seco	Grado de compactación
N°	g	g	KN/m ³	KN/m ³	%
1	3540,00	14,18	21,68	18,99	99,66
2	3550,00	13,34	21,74	19,18	100,68
3	3520,00	14,10	21,56	18,89	99,16



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos y Hormigones
GRADO DE COMPACTACION DE MEZCLA DE SUELO-CEMENTO

**1. DATOS GENERALES**

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú

Ubicación: B/ 27 de Junio

Fecha: 14/7/2025

Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m

Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada

Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: (0)
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)

Tipo de cemento: Viacha IP30 **Suelo- Cemento** 4% **Sustitucion por CHB** 2%

3. DATOS TECNICOS

Método utilizado: A **Diametro del molde [mm]** 100,00

Gravedad específica: --- **Altura del molde [mm]** 204,00

Volumen [cm³]: 1602,21 **Peso unitario seco max. [KN/m³]** 19,05

Contenido de humedad 12,00

Probeta de ensayo	Masa humed de la mezcla de suelo-cemento	Contenido de humedad final	Peso unitario humedo	Peso unitario seco	Grado de compactación
N°	g	g	KN/m ³	KN/m ³	%
1	3520,00	11,84	21,56	19,27	101,17
2	3500,00	13,74	21,43	18,84	98,92
3	3560,00	14,08	21,80	19,11	100,31



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos y Hormigones



GRADO DE COMPACTACION DE MEZCLA DE SUELO-CEMENTO

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú
Ubicación: B/ 27 de Junio
Fecha: 14/7/2025
Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,80 m
Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada
Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: (0)
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)
Tipo de cemento: Viacha IP30 **Sustitución por CHB** 4% 4%

3. DATOS TECNICOS

Método utilizado: A **Diametro del molde [mm]** 100,00
Gravedad específica: --- **Altura del molde [mm]** 204,00
Volumen [cm³]: 1602,21 **Peso unitario seco max. [KN/m³]** 19,05
Contenido de humedad 12,00

Probeta de ensayo	Masa humid de la mezcla de suelo-cemento	Contenido de humedad final	Peso unitario humedo	Peso unitario seco	Grado de compactación
Nº	g	g	KN/m ³	KN/m ³	%
1	3540,00	13,75	21,68	19,06	100,04
2	3580,00	14,34	21,92	19,17	100,65
3	3550,00	14,13	21,74	19,05	99,99



UNIVERSIDAD AMAZONICA DE PANDO
Facultad de Ingeniería y Tecnología
Laboratorio de Suelos y Hormigones



GRADO DE COMPACTACION DE MEZCLA DE SUELO-CEMENTO

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de la resistencia a compresión del suelo A-4 estabilizado con cemento y parcialmente sustituido por ceniza de hoja de bambú
Ubicación: B/ 27 de Junio
Fecha: 14/7/2025
Operador y procesador: Univ. Nicole Mishell Gonzales Chao

2. DATOS DE LA MUESTRA

Identificación muestra: M A-4 **Profundidad:** 0,85 m
Extracción de la muestra: No disturbada Disturbada
Descripción del suelo: AASTHO A-4 IG: (0)
 SUCS CL-ML (Arcilla limosa de baja plasticidad)
Tipo de cemento: Viacha IP30 **Sustitución por CHB** 4% 6%

3. DATOS TECNICOS

Método utilizado: A **Diametro del molde [mm]** 100,00
Gravedad específica: --- **Altura del molde [mm]** 204,00
Volumen [cm³]: 1602,21 **Peso unitario seco max. [KN/m³]** 19,05
Contenido de humedad 12,00

Probeta de ensayo	Masa humid de la mezcla de suelo-cemento	Contenido de humedad final	Peso unitario humedo	Peso unitario seco	Grado de compactación
Nº	g	g	KN/m ³	KN/m ³	%
1	3560,00	13,67	21,80	19,18	100,67
2	3600,00	13,46	22,04	19,43	101,99
3	3580,00	12,77	21,92	19,44	102,05

Anexo F. Elaboración de presupuesto comparativo

COSTO DE PROCESAMIENTO DE LA CENIZA DE HOJA DE BAMBU

Ubicación: Cobija – Pando, Bolivia

Uso: Investigación académica y evaluación de viabilidad económica

Rendimiento experimental: Por cada 16 g de hojas secas se obtienen 3 g de ceniza (dato de laboratorio), equivalente a un rendimiento del 18,75 %. Para obtener 1 kg de ceniza se requieren 5,33 kg de hojas secas.

Actividad	Descripción técnica	Estimado de recursos	Costo (Bs.)
Recolección y transporte	Recojo manual de hojas secas. Transporte local.	1 h de trabajo + transporte	13,75
Limpieza y secado al sol	Eliminación de impurezas y secado natural 24 h.	0,5 h trabajo	4,38
Trituración previa	Reducción de tamaño de hoja seca con aspas metálicas rotatorias.	0,2 kWh energía + 0,5 h trabajo	5,38
Calcinación en horno artesanal	Combustible: leña; control térmico con termómetro industrial (600–700 °C, 2,5 h).	2,5 h trabajo + leña	22,375
Trituración y tamizado final	Molienda de ceniza + tamizado (malla #200).	0,3 kWh + 0,5 h trabajo	4,38
Empaque y materiales auxiliares	Bolsa, etiquetado	—	0,5
TOTAL ESTIMADO			50,75

Costo referencial total: 50,75 Bs/kg

Nota:

- La CHB aún está en etapa inicial de investigación y no cuenta con procesos estandarizados, lo que eleva su costo unitario.
- Su producción es artesanal y manual, requiriendo más tiempo y cuidado en recolección, calcinación, molienda y tamizado.
- La demanda actual es baja o prácticamente nula, ya que su uso técnico aún no está difundido ni validado en nuestro medio (Cobija - Pando), a gran escala. En estas condiciones de baja demanda, no se generan economías de escala, lo que mantiene elevados los costos por unidad producida.
- Sin embargo, si la CHB empieza a aplicarse progresivamente en obras de infraestructura, por ejemplo, en capas de subbase o base para vías de bajo tránsito, podría aumentar el volumen de producción. Esto permitiría procesar mayores volúmenes y justificar la incorporación de equipos mecanizados o semi-industriales y bajar su precio.

ELABORACIÓN DE PRESUPUESTO COMPARATIVO

Suelo Base: Suelo A-4 (costo de extracción y transporte, que es constante para ambas mezclas).

Dosificación estándar: 4% de cemento (Control).

Dosificación alternativa: 6% de sustitución del cemento por CHB (de acuerdo a los resultados de la investigación que dio mayor resistencia a la compresión)

Densidad Seca Máxima: 194 2,56 kg/m³ (Valor del ensayo Proctor D558).

1. Cálculo de la cantidad de cemento para estabilizar un m³

Mezcla	Agente Estabilizador (Base)	% Estabilizador (en peso del suelo seco)	Peso de Estabilizador por kg/m ³
A. Convencional (Control)	Cemento	4%	77,70

2. Definición de Costos Unitarios (Valores de Referencia)

Material	Costo Unitario Referencial	Costo de Producción/Adquisición
Cemento	110 BOB por bolsa de 50 kg	2,20 Bs/kg
Ceniza de Hoja de Bambú (CHB)	Costo de procesamiento de la CHB para 1kg	50,75 Bs/kg

3. Presupuesto Comparativo por Metro Cúbico (m³)

A. Mezcla convencional

Material	Cálculo	Peso por m ³	
Cemento	77,70 kg *100%	7 7,70 kg	
CHB	0	0.00 kg	
			Costo Control = 17 0,95 Bs/m³

B. Mezcla alternativa 4% cemento y sustitución de 6% por CHB

Material	Cálculo	Peso por m ³	
CHB Sustituida	77,70 kg *6%	4,66 kg	
Cemento Remanente	77,70 kg - 4.66 kg	7 3,04 kg	
			Costo Alternativo = 39 7,29 Bs/m³

Diferencia= 22 6,35 Bs/m³

Nota:

La mezcla con CHB resulta más costosa por m³ que la mezcla convencional, no por baja eficiencia técnica, sino por su proceso de producción aún artesanal y sin mecanización.

A diferencia del cemento industrializado y producido a gran escala, la CHB requiere más tiempo y trabajo manual, lo que incrementa su costo unitario.

Técnicamente, la CHB, sí, presenta comportamiento puzolánico y mejora la resistencia del suelo-cemento; su limitación principal es económica, no de desempeño.

La CHB es una puzolana renovable con potencial sostenible; su viabilidad futura depende de lograr su industrialización para reducir costos y volverla competitiva