



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estabilización de suelos granulares con fines de
pavimentación empleando extracto de cabuya**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

**Michael Junior Mejía Herrera
Steven Jesús Eduardo Rivera Alfaro**

**Asesora:
Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi**

Piura, noviembre de 2023

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Michael Junior Mejía Herrera, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 73429952.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"Estabilización de suelos granulares con fines de pavimentación empleando extracto de cabuya"
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero Civil.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Steven Jesús Eduardo Rivera Alfaro, identificado con DNI N° 72753706
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI N° 02810251
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 25/08/2023.


Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Steven Jesús Eduardo Rivera Alfaro, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 72753706.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy autor del trabajo final titulado:
"Estabilización de suelos granulares con fines de pavimentación empleando extracto de cabuya"
El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero Civil.
2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Michael Junior Mejía Herrera, identificado con DNI N° 73429952
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI N° 02810251
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 25/08/2023.



Firma del putbr optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor.

³ Idéntica al DNI; no se admite digital, salvo certificado.

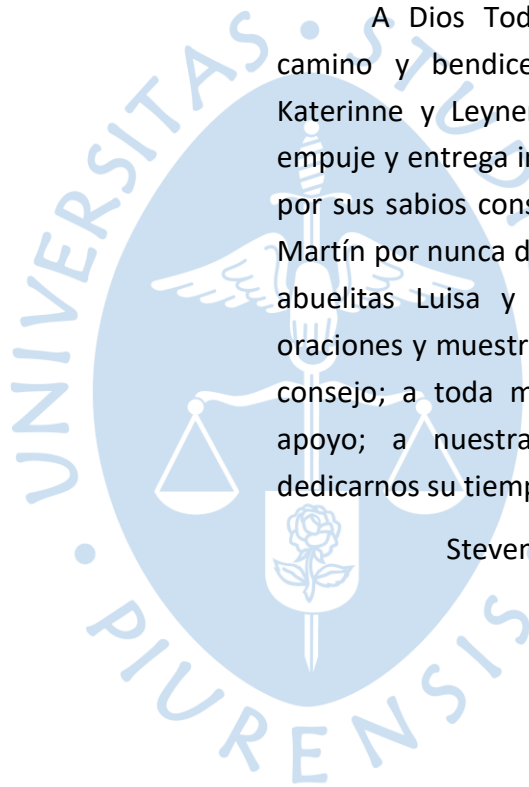
Dedicatoria

Al Ser Supremo, por guiarme siempre por los senderos correctos, a mis padres Dilma y Marco por ser mi inspiración y ejemplo de determinación, a mi tío Luzmilo y abuelita Deidamia por los valores inculcados y a toda mi familia por el incondicional apoyo, a mi asesora Gaby Ruiz por el tiempo dedicado.

Michael Junior Mejía Herrera

A Dios Todopoderoso que guarda mi camino y bendice mis días; a mis padres Katerinne y Leyner por su enorme fortaleza, empuje y entrega incondicional a mí como hijo, por sus sabios consejos y enseñanzas; a mi tío Martín por nunca dejar de confiar en mí y a mis abuelitas Luisa y Otilia por sus incansables oraciones y muestras de amor en cada acción y consejo; a toda mi familia por su soporte y apoyo; a nuestra asesora Gaby Ruiz por dedicarnos su tiempo y asesoramiento.

Steven Jesús Eduardo Rivera Alfaro



Agradecimientos

A la ingeniera Gaby Patricia Ruiz Petrozzi por su continua asesoría, apoyo y tiempo brindado para la elaboración de la presente tesis.

A la Universidad de Piura y a todos los docentes que contribuyeron con nuestra educación personal y profesional, así como por enseñarnos a navegar en el océano del conocimiento.

Al jefe del laboratorio de ensayos de materiales de construcción LEMC – UDEP Paul Ochoa por permitirnos usar las instalaciones y equipos para la realización de los ensayos.

A los técnicos Wigberto Lazo, Francisco Castro, Wilfredo Lazo y Estiwar Campos por el excelente trato, apoyo y asesoría en todo momento.

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo (PRONABEC) por permitirnos estudiar con una beca completamente subvencionada durante los 5 años de nuestra carrera.

A todos aquellos que de una u otra manera nos ayudaron a cumplir nuestros objetivos propuestos.



Resumen

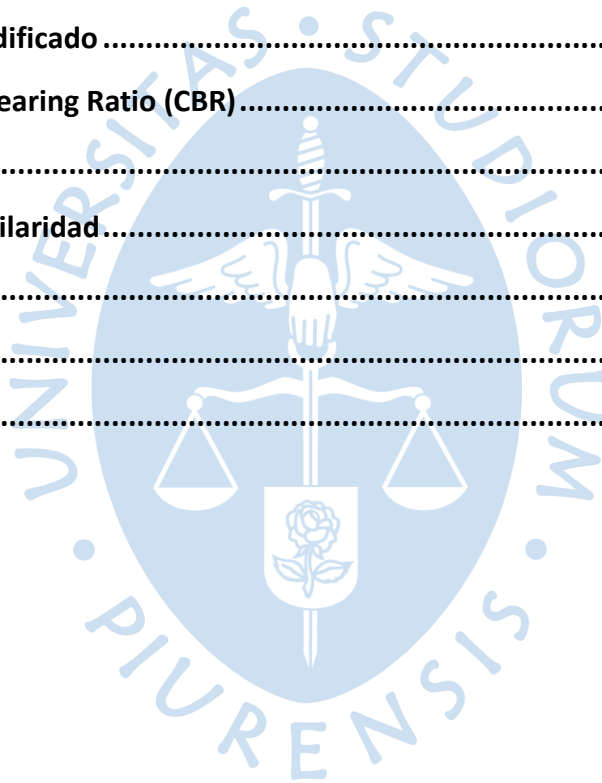
La tesis tiene como objetivo evaluar el efecto estabilizador del polímero natural obtenido de la planta de cabuya en un suelo areno-limoso para ser utilizado con fines de pavimentación. Para ello, se prepararon soluciones de polímero con concentraciones en volumen de 35%, 50% y 65%. El efecto del polímero fue evaluado sobre los límites de Atterberg, el Proctor modificado, el CBR, el corte directo, absorción por capilaridad y ángulo de contacto. Los resultados indican que hay un porcentaje óptimo de cabuya del 50% que mejora los principales parámetros del suelo. La capacidad de soporte del suelo (CBR) aumenta en un 42% respecto al suelo patrón y la absorción capilar disminuye en un 32%. Aunque el CBR mejora, el valor final sigue siendo bajo para fines de pavimentación. Se puede concluir que el polímero de cabuya mejora la susceptibilidad del suelo arenoso-limoso al agua, al reducir la absorción capilar y haciéndolo más impermeable a la acción del agua.



Tabla de contenido

Introducción.....	11
Capítulo 1.....	12
Marco teórico y conceptual.....	12
1.1 Estabilización de suelos.....	12
1.2 Agentes químicos tradicionales.....	13
1.3 Agentes químicos no tradicionales.....	13
1.3.1 Estabilización con biopolímeros.....	15
1.3.2 Membrana polimérica.....	16
1.3.3 Enlace polimérico.....	16
Capítulo 2.....	18
Metodología.....	18
2.1 Plan experimental.....	18
2.2 Caracterización de materiales.....	19
2.2.1 Análisis granulométrico.....	19
2.2.2 Límites de Atterberg.....	20
2.2.3 Gravedad específica.....	20
2.2.4 Contenido de humedad.....	20
2.3 Caracterización y preparación de la solución de cabuya.....	20
2.4 Preparación del suelo y conformación de especímenes.....	21
2.5 Ensayos en suelo estabilizado.....	23
2.5.1 Límites de Atterberg.....	23
2.5.2 Proctor modificado.....	23
2.5.3 CBR (California Bearing Ratio).....	23
2.5.4 Corte directo.....	23
2.5.5 Absorción por capilaridad.....	24
2.5.6 Ángulo de contacto.....	24
Capítulo 3.....	26
Caracterización de los materiales.....	26
3.1 Lugar de procedencia y origen geológico.....	26

3.2 Suelo a estabilizar.....	27
3.3 Descripción de la planta de cabuya.....	28
3.3.1 Descripción del biopolímero	29
3.3.2 Proceso de extracción del polímero	30
3.3.3 Proceso de almacenaje y maceración.....	31
Capítulo 4.....	33
Resultados y discusión	33
4.1 Consistencia	33
4.2 Capacidad de soporte del suelo – CBR	33
4.2.1 Proctor modificado	33
4.2.2 California Bearing Ratio (CBR).....	34
4.3 Corte directo	35
4.4 Absorción por capilaridad.....	36
Conclusiones.....	40
Recomendaciones	41
Referencias	42



Lista de tablas

Tabla 1	Clasificación de la subrasante según el CBR.....	12
Tabla 2	Tipos de agentes químicos no tradicionales y propiedades de suelos que mejoran	14
Tabla 3	Matriz de ensayos a realizar	19
Tabla 4	Cantidad de especímenes para cada ensayo	21
Tabla 5	Parámetros del suelo usado en la presente investigación.....	28
Tabla 6	Características del polímero de cabuya usado en la presente investigación	30
Tabla 7	Resultados de los ensayos Proctor en suelo patrón y suelo estabilizado con cabuya	34
Tabla 8	Resultados del ensayo de corte directo del suelo patrón y estabilizado con cabuya	36
Tabla 9	Absorción final y coeficientes de absorción	37



Lista de figuras

Figura 1 Mecanismo de interacción de los polímeros con arcillas-Intercambio iónico	15
Figura 2 Membrana polimérica envolviendo una matriz de arena y llenando los vacíos....	16
Figura 3 Lazos poliméricos entre partículas de suelo de grano grueso	17
Figura 4 Esquema del plan experimental desarrollado en la presente investigación	18
Figura 5 Elaboración de especímenes con las condiciones del Proctor. (a) Probeta conformada dentro del molde estandarizado. (b) Tallado de probetas con caja de corte para corte directo.	22
Figura 6 Especímenes para ángulo de contacto para las diferentes concentraciones	22
Figura 7 Representación de la medición del ángulo de contacto. (a) esquematización de la gota y ángulo de contacto sobre la superficie de suelo. (b) esquema del montaje para capturar las fotografías digitales.	25
Figura 8 Ubicación de la zona de extracción del suelo a nivel nacional, regional y local	26
Figura 9 Recolección y preparación de muestras de suelos para su caracterización. (a) recolección del suelo. (b) suelo recolectado secado al aire. (c) preparación de suelo para elaboración de especímenes.	27
Figura 10 Curva granulometría de la muestra de suelo usado en la presente investigación	28
Figura 11 Planta de cabuya.....	29
Figura 12 Polímero natural de cabuya	30
Figura 13 Proceso de extracción del aguamiel. (a) identificación de la planta de cabuya. (b) perforación del orificio en el tallo. (c) extracción del aguamiel (savia).	31
Figura 14 Almacenamiento y maceración del polímero natural. (a) almacenamiento en envase comercial. (b) almacenamiento en envases descartables.	32
Figura 15 Variación de la consistencia del suelo con el polímero de la cabuya	33
Figura 16 Resultados del ensayo CBR compactados al Proctor modificado del suelo estabilizado con cabuya	35
Figura 17 Resultados del ensayo de absorción por capilaridad del suelo estabilizado con cabuya	37
Figura 18 Tasa de absorción del suelo estabilizado con cabuya.....	38
Figura 19 Resultados del ensayo de ángulo de contacto del suelo estabilizado con solución de cabuya a mayor grado de saturación (37.5%).....	39

Introducción

El Perú se caracteriza por presentar variados territorios conformados por diversos tipos de suelos, de los cuales algunos no son aptos para realizar la ejecución de obras de ingeniería especialmente obras lineales como carreteras. Ante ello surge la necesidad de usar algún método de estabilización de suelos para mejorar determinadas características y conformar un material acorde a la solicitud del proyecto.

Para la estabilización de suelos tradicionalmente se ha usado cemento portland, cal, asfalto y cenizas volantes, algunos de los cuales pueden aumentar el pH del suelo, llegando a contaminar las aguas subterráneas (Chang & Cho 2012). Otros emiten gases contaminantes durante su fabricación, aportando gases de efecto invernadero, tal es el caso del cemento. La fabricación de una tonelada de cemento produce casi una tonelada de CO₂, lo que representa históricamente entre el 5% y 9% de gases de efecto invernadero que se emiten anualmente (Martínez, et al., 2021). La necesidad del cuidado del medio ambiente exige la apuesta por el desarrollo de métodos como parte de la ingeniería sostenible. Actualmente está tomando mayor importancia la estabilización de suelos con agentes no tradicionales, bajo enfoques biológicos y eco amigables, tal es el caso de los biopolímeros los cuales mediante distintos mecanismos de estabilización pueden mejorar las propiedades de los suelos, comparables en algunos casos con los agentes estabilizadores tradicionales (Huang, et al., 2021).

El biopolímero utilizado en la presente investigación se obtiene de la planta de cabuya, la cual actualmente crece en diversos pisos ecológicos del Perú. Algunos estudios previos han evaluado su uso en la estabilización de adobes y suelos para pavimentación tal es el caso de Benites (2017) y Rojas & García (2023), respectivamente. El presente trabajo busca evaluar el efecto estabilizador de la cabuya en suelos granulares, específicamente en un suelo arenoso – limoso. A la luz de los resultados de los trabajos previos, se ha incluido la evaluación de la impermeabilización a través de la absorción capilar y el ángulo de contacto.

La tesis está organizada en 4 capítulos. En el capítulo 1 se aborda el marco teórico y conceptual que incluye los conceptos de estabilización con agentes tradicionales y no tradicionales, así como sus mecanismos de estabilización. En el capítulo 2 se describe la metodología que incluye el plan experimental y la descripción de los ensayos realizados. En el capítulo 3 se reportan los resultados de la caracterización del suelo y polímero. En el capítulo 4 se reportan y discuten los resultados del efecto del polímero en el suelo estabilizado.

Finalmente, se han incluido las conclusiones y se realizan recomendaciones para posteriores estudios que complementen el presente trabajo.

Capítulo 1

Marco teórico y conceptual

1.1 Estabilización de suelos

Existe una amplia variedad de suelos y muchos de ellos no son aptos para la ejecución de proyectos de ingeniería. Los suelos más problemáticos en el ámbito de la ingeniería vial son los suelos finos (limos y arcillas), debido principalmente a su inestabilidad volumétrica. También se puede considerar que necesitan estabilización las arenas limosas o arcillosas, pues a pesar de poseer buenas características mecánicas, carecen de cohesión y no tienen suficiente adherencia entre sus partículas, haciendo que el suelo falle por corte o por desplazamiento lateral (MTC, 2014). Asimismo, las arenas suelen ser problemáticas en muchos tipos de aplicaciones de ingeniería geotécnica, en cimentaciones y estabilización de taludes debido a su resistencia relativamente baja, estructura suelta y/o potencial de licuefacción cuando se encuentran saturadas (Liu, et al., 2018).

Al estabilizar un suelo con fines de pavimentación generalmente se busca aumentar la capacidad de soporte. El principal parámetro de un suelo que sirve para identificar si es necesario realizar una estabilización es el valor CBR (California Bearing Ratio). Cuando este es menor a 6% se considera la subrasante como pobre o inadecuada y se debe realizar algún mecanismo de estabilización (MTC, 2014). En la Tabla 1 se muestra la clasificación de subrasantes.

Tabla 1

Clasificación de la subrasante según el CBR

CBR	CATEGORÍA DE SUBRASANTE
[0% - 3%>	Subrasante Inadecuada
[3% - 6%>	Subrasante Pobre
[6% - 10%>	Subrasante Regular
[10% - 20%>	Subrasante Buena
[20% - 30%>	Subrasante Muy Buena
>=30%	Subrasante Excelente

Nota. Adaptado del manual de carreteras, sección suelos y pavimentos MTC 2014.

Otros parámetros importantes que se pueden mejorar en un suelo para fines de pavimentación son la susceptibilidad al agua, impermeabilidad y control de polvo. Existen manuales y normas donde se han establecido el uso de diferentes métodos de estabilización como son los siguientes:

La estabilización mecánica, se realiza mediante la compactación de suelos para disminuir la cantidad de vacíos y aumentar la densidad del suelo mediante el uso de un

compactador adecuado para fortalecer el empaquetamiento de las partículas y a su vez mejorar la resistencia (Taha & Raihan, 2023). La estabilización por combinación de suelos consiste en agregar otro tipo de suelo para mejorar el existente y poder cumplir con las exigencias de granulometría, densidad y espesores recomendados. También se tiene a la estabilización por sustitución, reemplazando el suelo deleznable por uno nuevo que cumpla con los estándares de calidad establecidos por el proyecto. Esta técnica es la más simple y confiable, si se emplea adecuadamente, y para producir los efectos deseados necesita siempre la compactación como complemento (Llano, 2021). Sin embargo, es una de las técnicas más costosas y poco sustentable pues en algunos casos se necesita la remoción total del suelo inadecuado.

Por otro lado, se tiene a los tratamientos químicos con la aplicación de aditivos estabilizadores como cal, cenizas volantes, cemento, polímeros, sales y compuestos orgánicos. El propósito de estos tratamientos químicos es mejorar una o más propiedades del suelo, ya sea por una reacción fisicoquímica, o mediante la creación de una matriz que aglomere las partículas del suelo con el fin de producir un incremento en su resistencia (Bahar, et al., 2004; Billong, et al., 2009). Los tratamientos químicos se pueden subdividir en estabilizadores tradicionales y no tradicionales (Taher, et al., 2020).

1.2 Agentes químicos tradicionales

Los agentes químicos tradicionales más utilizados son el cemento portland y la cal (Huang, et al., 2021), los cuales presentan mecanismos basados en reacciones puzolánicas (Llano, 2021) que consisten en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfas o débilmente cristalizadas en un medio altamente alcalino con la consecuente formación de aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos hidratados (Corzo, 2013). El cemento se puede aplicar tanto en polvo o como lechada a cualquier tipo de suelo, siendo el suelo – cemento más estable y resistente ante los agentes atmosféricos. El cemento mejora la resistencia, trabajabilidad y durabilidad, además actúa reduciendo en gran medida la compresibilidad y el potencial de hinchamiento del suelo. (Taha & Raihan, 2023; Umesha, et al., 2009; Hassan, 2009). La cal es otro agente tradicional cuyo impacto ambiental es significativamente inferior al del cemento. La cal modifica las características fisicoquímicas del suelo, mejorando las propiedades mecánicas, durabilidad de subrasantes, control del cambio volumétrico y desprendimiento de polvo, además de reducir los espesores de las capas del pavimento (Odar, et al., 2019). Usualmente la cal se aplica en arcillas y limos con índices de plasticidad entre 10% y 50% para reducir el índice plástico, incrementar la capacidad portante del suelo y reducir el ascenso por capilaridad de aguas subterráneas (Elizondo, et al., 2010).

1.3 Agentes químicos no tradicionales

Los agentes químicos no tradicionales constituyen un amplio conjunto de materiales cuyo impacto ambiental es mínimo, entre los cuales destacan polímeros, aceites sulfonados, emulsiones asfálticas y sales. El uso de estos materiales alternativos ha permitido el

aprovechamiento de una gran variedad de suelos que en su estado natural no cumplen con las especificaciones necesarias y son inadecuados para su uso en la construcción de infraestructura vial (Llano, 2021). El mejoramiento de los suelos con estos productos tiene el mismo fin que las otras técnicas de estabilización que es mejorar la resistencia e impermeabilizar el suelo para que sean apto en el uso vial (Ravines, 2010). Cuando estos agentes químicos se aplican al suelo generalmente se hace en dilución y en determinadas proporciones ya sea con relación al peso seco o volumen del suelo. En la Tabla 2 se ha realizado una recopilación de los tipos de agentes químicos no tradicionales, los mecanismos de estabilización con el que actúan en el suelo y las propiedades que mejoran.

Tabla 2

Tipos de agentes químicos no tradicionales y propiedades de suelos que mejoran

Agente químico	Mecanismo de estabilización	Suelo en el que actúa	Principales propiedades que mejora
Polímeros	Lazos poliméricos/fuerzas electrostáticas/entropía/geopolimerización/capa impermeable (Huang, et al., 2021).	Finos y gruesos	Impermeabilidad, cohesión, Estabilidad volumétrica, CBR (Huang, et al., 2021).
Aceites sulfonados	Intercambio iónico (Camacho, et al., 2008).	Finos (arcillas)	Impermeabilidad, densidad (Camacho, et al., 2008).
Resinas	Intercambio iónico/enlaces covalentes (Llano, 2021).	Gruesos	Impermeabilidad, cohesión (Llano, 2021; Tingle, et al., 2007).
Lignina	Intercambio iónico (Retuerto & Gonzales, 2022).	Finos	CBR, expansividad de suelos (Retuerto & Gonzales, 2022).
Enzimas	Catalización/ intercambio iónico (Cruz, 2021; Ravines, 2010).	Fino (arcillas plásticas)	CBR, humedad/porosidad (Ravines, 2010).
Emulsiones asfálticas	Unión física/ cementación (Llano, 2021).	Gruesos	Impermeabilización, cohesión (Llano, 2021).
Sales	Intercambio catiónico/cristalización (Tingle, et al., 2007).	Finos y grueso	Control de polvo, humedad (PITRA, 2017).

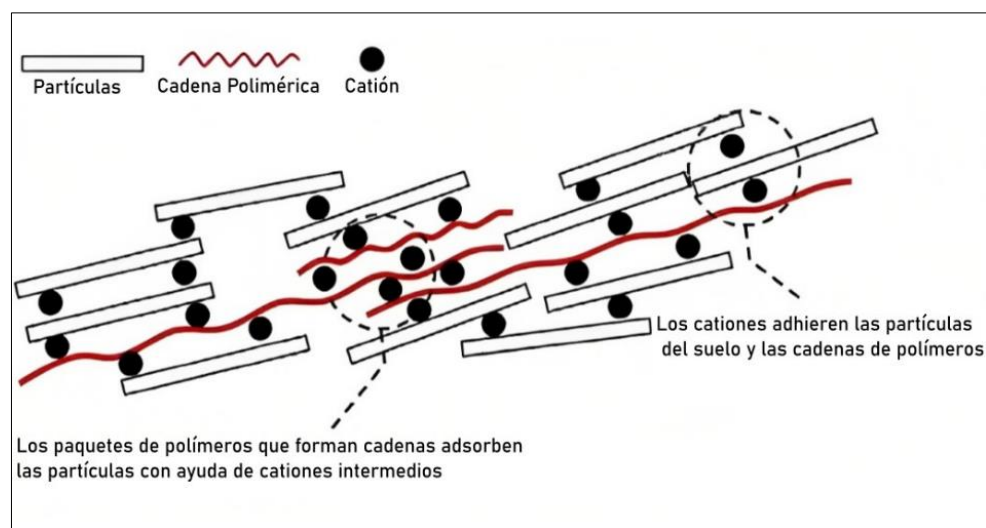
En el mejoramiento de los suelos, los polímeros han sido introducidos como agentes estabilizadores cuyo mecanismo de acción es el intercambio iónico y/o recubrimiento de partículas según el tipo de suelo sobre el que se aplica. Estas interacciones contribuyen con el mejoramiento del comportamiento mecánico frente a esfuerzos y mejora de la durabilidad frente al intemperismo.

En el caso de suelos finos (arcillas) los polímeros operan como un agente catalítico de intercambio iónico sobre la fracción activa de las partículas de arcillas (Figura 1) reduciendo el potencial electrostático de las partículas y consecuentemente quitándoles la capacidad para absorber agua (Llano, 2021). Asimismo, como resultado de la carga negativa neta de las

partículas de mineral arcilloso, una parte del agua en los vacíos es atraída y se adhiere fuertemente a la superficie de las partículas, de esta manera se estabiliza el suelo mediante las fuerzas electrostáticas uniendo las partículas del suelo circundante la cuales se endurecen en una matriz más densa y fuerte (Huang, et al., 2021; Aguilar & Borda, 2015).

Figura 1

Mecanismo de interacción de los polímeros con arcillas-Intercambio iónico



Nota. Adaptado de Chang & Cho 2012.

1.3.1 Estabilización con biopolímeros

Los biopolímeros o polímeros naturales son compuestos sintetizados por los seres vivos a partir de biomasa de gran abundancia en la naturaleza siendo producidos por los grupos biológicos como algas, plantas, animales, bacterias y hongos. Existen diversos biopolímeros como agentes no tradicionales en estabilización de suelos destacando la lignina, quitina y polisacáridos, que actúan mejorando varias características ya que las moléculas del biopolímero mezclados con el suelo actúan como aglutinantes y promueven el fortalecimiento, generan una mayor cohesión, aumentan la capacidad de soporte, mejoran la resistencia a la erosión y reducen la permeabilidad (Chang, et al., 2016b).

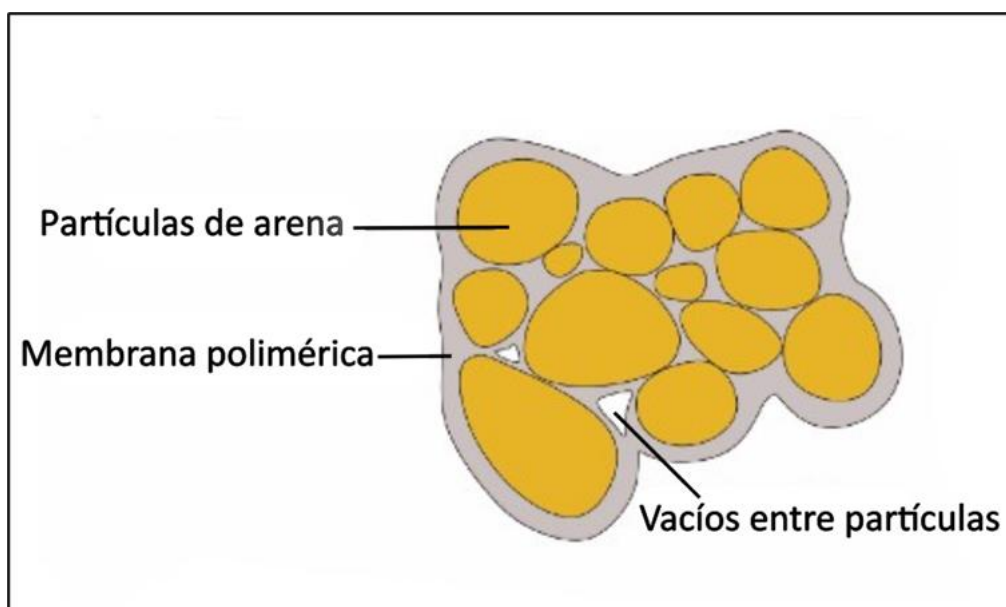
Los biopolímeros como conjunto presentan mecanismos de acción que responden a patrones similares influenciados por su composición interna y la respuesta ante los minerales presentes en el suelo aplicado. Según Mohamed (2004) los mecanismos de interacción son análogos a los de la emulsión asfáltica, menciona que la interacción entre polímeros y suelos de grano grueso se pueden llevar a cabo mediante dos cambios estructurales: formación de una membrana delgada que cubre las partículas de arena y la formación de lazos poliméricos que conectan partículas contiguas.

1.3.2 Membrana polimérica

Los biopolímeros al mezclarse con un suelo granular crean una matriz denominada suelo-biopolímero, en la que el biopolímero recubre las partículas e ingresa en el suelo depositándose entre los vacíos para formar hidrogel viscosos que inducen la obstrucción de los poros ya que se genera una envoltura que encapsula a los granos de arena dando lugar a una estructura más estable que mejora la cohesión y resistencia mecánica (Chang, et al., 2016a; Liu et al., 2018). Taher, et al. (2020) menciona que esta envoltura impermeable es muy similar a una geomembrana delgada pero mucho más adherida a las partículas del suelo lo que contribuye a la mejora en las características de durabilidad principalmente frente a la acción del agua ya que reduce significativamente la conductividad hidráulica y la permeabilidad. En la Figura 2 se muestra la membrana polimérica que recubre tanto las partículas de arena como los espacios entre ellos generando un encapsulamiento global del conjunto. La eficacia de la membrana depende de la capacidad que tiene el agente estabilizador para recubrir las partículas (IMT, 2021) siendo más efectivo en las partículas que tienen menores áreas superficiales.

Figura 2

Membrana polimérica envolviendo una matriz de arena y llenando los vacíos



Nota. Adaptado de Liu, et al., 2018.

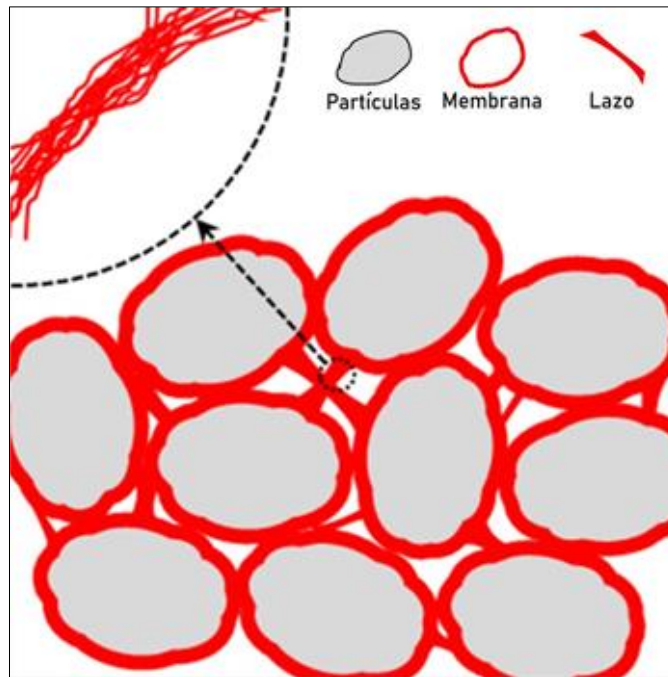
1.3.3 Enlace polimérico

Los enlaces o lazos poliméricos son aquellos que se forman por la deshidratación de los hidrogel viscosos del biopolímero posicionados en los vacíos entre partículas (Tingle, et al., 2007), es decir, se generan a medida que el agua presente en la solución empieza a evaporarse, generando conexiones entre partículas contiguas que no tienen contacto directo (Huang, et al., 2021), dando lugar a una alineación y reordenamiento de las partículas (Chang,

et al., 2016b). La Figura 3 esquematiza este mecanismo de interacción del biopolímero con el suelo, se observa que se generan los lazos poliméricos después que las partículas han sido encapsuladas con la membrana incrementado así la adhesión entre dichas partículas.

Figura 3

Lazos poliméricos entre partículas de suelo de grano grueso



Nota. Adaptado de Chang, et al., 2016b.

La eficacia de estos dos mecanismos de estabilización depende de la densidad del suelo (Liu, et al., 2018). Si la densidad es alta significa que las partículas de arena están dispuestas muy juntas por lo que el polímero va a tener dificultad para a llenar los vacíos y envolver las partículas de arena. Por el contrario, si el suelo presenta una densidad baja el biopolímero sí penetra entre los vacíos recubriendo los granos, pero las fuerzas de unión entre los lazos poliméricos son muy débiles porque las partículas están muy separadas. Por lo tanto, puede existir una densidad óptima que garantiza que las fuerzas de unión y de enclavamiento entre partículas sean las ideales.

Capítulo 2

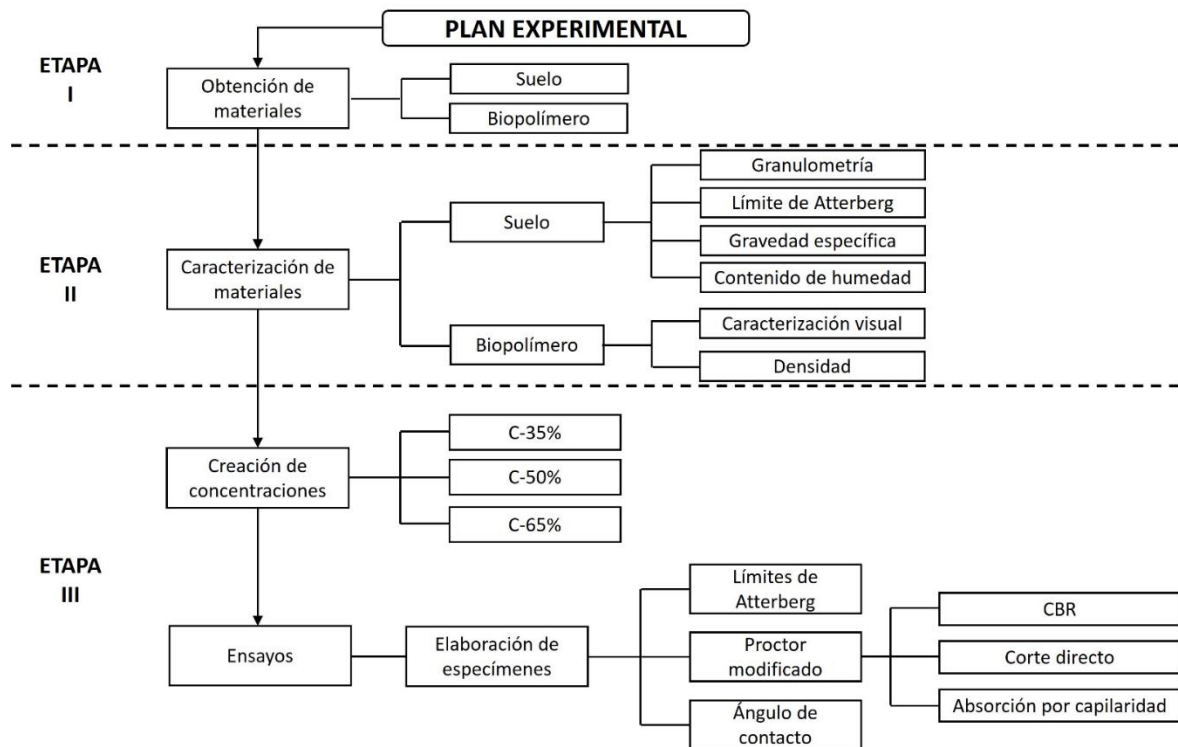
Metodología

2.1 Plan experimental

Para evaluar el efecto estabilizador del polímero natural de cabuya en un suelo granular (arena limosa, SM) se diseñó un plan de trabajo de 3 etapas: i) Obtención del suelo y polímero, ii) Caracterización de los materiales y iii) Fabricación de soluciones de cabuya en concentraciones de 35%, 50% y 65%, preparados en volumen, y medición de las propiedades con los respectivos ensayos. La Figura 4 muestra el desarrollo del plan experimental.

Figura 4

Esquema del plan experimental desarrollado en la presente investigación



A continuación, en la Tabla 3 se muestra la matriz de ensayos a realizar tanto en el suelo patrón, como en los especímenes conformados con solución al 35%, 50% y 65% de concentración de cabuya.

Tabla 3*Matriz de ensayos a realizar*

Ensayos	Suelo Patrón	C-35%	C-50%	C-65%
Caracterización del suelo				
Granulometría	X			
Gravedad específica	X			
Contenido de humedad	X			
Estabilización con polímero				
Límites de Atterberg	X	X	X	X
Corte directo	X	X	X	X
Proctor modificado	X	X	X	X
CBR	X	X	X	X
Absorción por capilaridad	X	X	X	X
Ángulo de contacto	X	X	X	X

2.2 Caracterización de materiales

Para identificar, clasificar y conocer las características del suelo con el que se está trabajando se realizaron los siguientes ensayos: análisis granulométrico, límites de Atterberg y gravedad específica.

La caracterización del polímero consistió en determinar su densidad, percibir su color, olor y textura. Para la medición de la densidad se colocó el polímero en una fiola con volumen conocido, se tomó el peso del conjunto y se encontró la relación de masa respecto al volumen. Para identificar los otros parámetros se colocó una determinada cantidad de polímero en un recipiente transparente abierto facilitando dichas observaciones.

2.2.1 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico permite determinar las características de un suelo a partir del tamaño de sus partículas. Se procedió conforme a la NTP 339.128.1999. Para el análisis granulométrico completo del suelo se realizaron dos procedimientos, la granulometría por tamizado para evaluar las partículas de tamaños mayores a 0.075 mm y el análisis con hidrómetro para evaluar la distribución de las partículas menores a 0.075 mm.

Para el tamizado se trabajó con 500 g de suelo, lavado por el tamiz #200 para luego colocar al horno la cantidad remanente, el material seco de esta muestra es la que finalmente se pasó a través de las mallas 4, 10, 20, 40, 60, 140 y 200.

El análisis por hidrómetro se trabajó con una muestra de suelo de 100 g tamizada por la malla #10. En un vaso de precipitado de 250ml se hizo una mezcla homogénea del suelo, agua y defloculante (hexametáfosfato de sodio), para luego pasarla a una probeta milimetrada. Se completó con agua destilada hasta llegar a un litro de capacidad y se tomó lecturas con el hidrómetro a los 2, 5, 15, 30 minutos, 1, 2, 4, 8 y 24 horas, después se calculó

el diámetro de las partículas y porcentaje que pasa según las correlaciones que indica la NTP 339.128.1999.

2.2.2 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son los contenidos de humedad con los cuales un suelo cambia de comportamiento, esto permite conocer el estado en el que se encuentra un suelo ya sea sólido, semisólido, plástico o líquido. Se procedió de acuerdo con la NTP 339.129.1999, se preparó el suelo extraído tamizándolo por la malla #40 para luego mezclar 200 g de suelo con una cantidad de agua que genere una consistencia pastosa para dejarlo saturar durante 24 horas en una cápsula.

El límite líquido (LL) es el contenido de humedad que marca el punto donde se pierde la resistencia al corte y el suelo empieza a comportarse como un fluido viscoso. Para el límite líquido se hizo uso de la cuchara de Casagrande para encontrar la cantidad de golpes con las que se cierra la abertura generada en la masa de suelo. Para generar la curva característica se necesitaron 3 puntos. El primero es el contenido de humedad que permite cerrar la abertura hecha con el acanalador entre un rango de 25-35 golpes, el segundo entre 20-30 golpes y el tercero entre 15-25 golpes.

El límite plástico (LP) es el contenido de humedad crítico por encima del cual un suelo se comporta plásticamente marcando el límite en el que el suelo puede deformarse sin romperse ni agrietarse. Para determinar dicho valor se enrolla el suelo formando hilos de 3.2 mm de diámetro tal como indica la norma NTP 339.129.1999.

2.2.3 Gravedad específica

Se procedió conforme a la NTP 339.131.1999. Se colocó la muestra de suelo dentro de 2 fiolas estandarizadas de 500 ml, se registró el peso de fiola más suelo, luego se agregó agua gradualmente y con el uso de una bomba de vacío se extrajo el aire del conjunto. Al agregar agua hasta los 500 ml se procede a medir el peso de cada fiola con el suelo y el agua para finalmente realizar la operación de cálculo propuesta por la norma.

2.2.4 Contenido de humedad

El contenido de humedad permitió determinar la cantidad de agua presente en el suelo con relación a su masa. Se procedió conforme a la NTP 339.127.1998. Se trabajó con una muestra de suelo en estado natural tomándose alrededor de 400 g y se pesó en un recipiente; este valor fue el peso húmedo. Luego se colocó la muestra al horno a 110°C durante 24 horas para medir su peso seco. El cálculo del contenido de humedad se expresa en porcentaje.

2.3 Caracterización y preparación de la solución de cabuya

Para la preparación de las soluciones se diluyó el polímero con una cantidad de agua necesaria para conformar concentraciones en volumen de 35%, 50% y 65%. Tomando como referencia un volumen total de 1 litro, se midieron 350 ml, 500 ml y 650 ml de polímero

respectivamente, luego se completó con agua el volumen restante. Las preparaciones se realizaron en probetas estandarizadas de 1 litro agregando las cantidades correspondientes de polímero y agua.

2.4 Preparación del suelo y conformación de especímenes

Para elaborar los especímenes, el suelo inicialmente se secó al aire y se tamizó por la malla #4 con el fin de homogenizarlo. Previamente a cada ensayo el suelo se combina con el agua y/o solución de polímero hasta lograr una mezcla homogénea, la cual se deja con la humedad óptima del ensayo Proctor de forma hermética por lo menos 24 horas para conseguir que todas las partículas del suelo sean alcanzadas por las moléculas del agua y/o solución, para luego conformar los respectivos especímenes antes de cada ensayo. A continuación, en la Tabla 4 se muestra la cantidad de especímenes usados para cada ensayo.

Tabla 4

Cantidad de especímenes para cada ensayo

Muestra	Límites de Atterberg	Corte Directo	Proctor Modificado	CBR	Absorción por capilaridad	Ángulo de contacto
PATRÓN	3	3	5	3	2	3
C-35%	3	3	5	3	2	3
C-50%	3	3	5	3	2	3
C-65%	3	3	5	3	2	3

Para el ensayo de absorción por capilaridad se utilizaron probetas de suelo conformadas con la densidad del Proctor modificado, es decir, con el óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca, haciéndose uso de un molde estandarizado de 10.16 cm de diámetro interno y 26 cm de alto. Este molde posee un disco espaciador de 7 cm en su interior el cual garantiza que la probeta tenga la misma esbeltez que la del Proctor (Figura 5a). Se planificó 3 especímenes, pero se midieron solo con 2 porque los resultados no mostraron variación significativa. Los especímenes para el ensayo de corte directo fueron tallados de las probetas conformadas en el molde estandarizado con ayuda de una caja de corte tal como se muestra en la Figura 5b.

Figura 5

Elaboración de especímenes con las condiciones del Proctor. (a) Probeta conformada dentro del molde estandarizado. (b) Tallado de probetas con caja de corte para corte directo.



(a)

(b)

Para el ensayo de ángulo de contacto se utilizaron especímenes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 2 cm de altura (Figura 6). El grado de saturación fue mayor al utilizado en los otros especímenes, en este caso el agua y/o solución polimérica adicionada al suelo previamente tamizado por la malla #10 fue de 37.5% respecto al peso seco del material.

Figura 6

Especímenes para ángulo de contacto para las diferentes concentraciones



2.5 Ensayos en suelo estabilizado

Los ensayos en suelo estabilizado tienen como finalidad medir el efecto de la solución de cabuya al ser agregada en diferentes concentraciones al suelo y formar una mezcla suelo biopolímero. Tanto en muestras de suelo natural como estabilizadas se realizó lo siguiente: Determinación de los límites de Atterberg para medir la variación en la consistencia. Para conocer la cohesión y el ángulo de fricción interno se realizó el ensayo de corte directo. El ensayo de CBR se realizó con la finalidad de conocer la variación de la capacidad de soporte del suelo; previamente se realizó el ensayo Proctor modificado para determinar el contenido óptimo de humedad. Las propiedades de impermeabilidad se midieron mediante la absorción por capilaridad y el ángulo de contacto.

2.5.1 Límites de Atterberg

Este ensayo se realizó de acuerdo con la NTP 339.129.1999 reemplazando el agua por solución de cabuya en las 3 concentraciones conformadas para medir la variación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

2.5.2 Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado se realizó con la finalidad de encontrar la curva de compactación al aplicar cierta cantidad de energía. Esto permite conocer la humedad óptima con la que se obtiene la máxima densidad seca de un suelo. Se procedió conforme a la NTP 339.141.1999. El suelo que pasa por el tamiz #4 se compactó dentro de un molde de 4 pulgadas de diámetro y 11.6 cm de altura, en 5 capas aplicando 25 golpes en cada una con ayuda del pisón de 10 lbf, el cual se deja caer una altura de 18 pulgadas (procedimiento A).

2.5.3 CBR (California Bearing Ratio)

El ensayo para medir la "Relación de Soporte de California" (CBR por sus siglas en inglés) determina la máxima resistencia de un suelo ante esfuerzos de compresión y corte perimetral y permite evaluar la calidad de este. Esta capacidad de soporte por lo general corresponde con la carga que logre penetrar 0.1 pulgadas de profundidad del pistón estandarizado en un suelo compactado a la densidad seca máxima y un óptimo contenido de humedad. Se procedió conforme a la NTP 339.145.199. Con el contenido de humedad obtenido del Proctor modificado se conforman 3 especímenes, a los que se les aplicó 10, 25, 56 golpes respectivamente por cada una de las 5 capas de suelo. Luego de ser sumergidos durante 96 horas en una posa con agua, se retiraron del agua y después de 15 minutos se ensayaron con una carga a velocidad constante. Se registraron las mediciones al 0.1, 0.2 y 0.3 pulgadas.

2.5.4 Corte directo

El ensayo de corte directo se realizó para determinar la resistencia al corte y conocer los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interno de un suelo. Se procedió conforme a

la NTP 339.171.2002. Se tallaron especímenes de 3.33 cm de alto y 5.01 cm de lado con ayuda de la caja de corte. Para cada ensayo se usaron 3 especímenes saturados y consolidados aplicando cargas de 8kg, 16kg y 32kg que se llevaron a la falla durante la etapa de corte aplicando fuerza horizontal a velocidad constante de 0.2mm/min.

2.5.5 Absorción por capilaridad

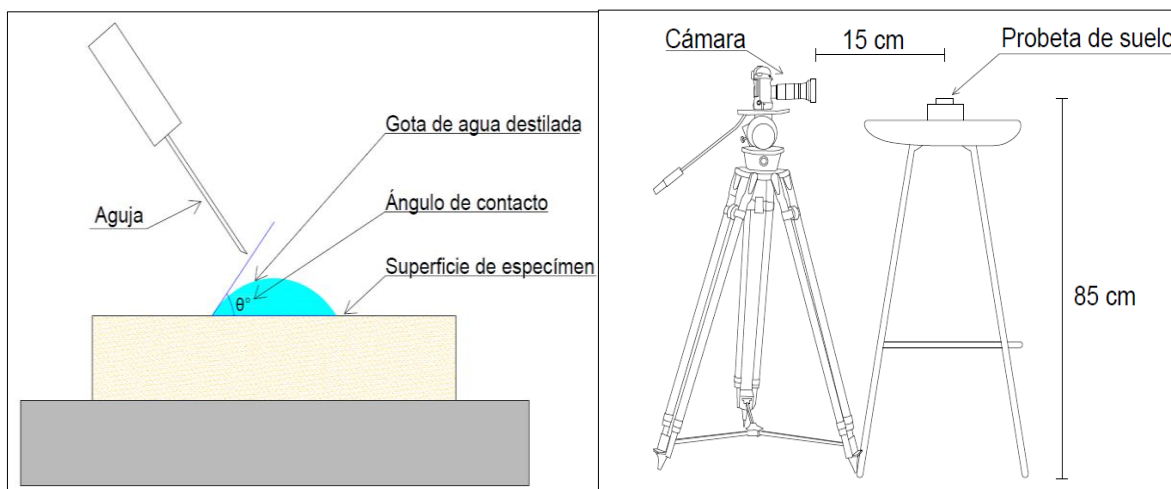
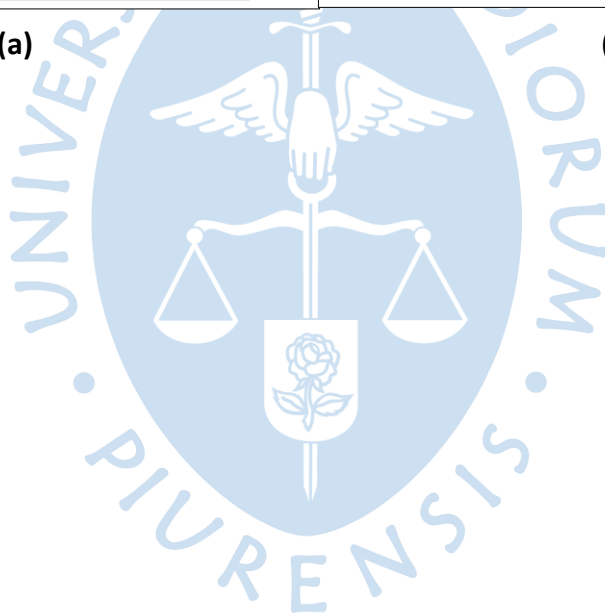
La absorción por capilaridad es la capacidad que tiene un material para absorber un líquido en su interior debido a la presencia de poros y a la fuerza de atracción entre las moléculas de un líquido y del material en un tiempo determinado. Se trabajó con la norma AENOR (2008) la cual explica como calcular la absorción para bloques de tierra comprimida usados como unidades de albañilería. El procedimiento se adaptó colocando las superficies de las probetas en una bandeja con una cama de arena saturada en vez de estar en continuo contacto con el agua. Se usaron dos probetas circulares de 10.16 cm de diámetro y 11.6 cm de alto. La absorción se midió como la variación de peso promedio de las probetas conformadas con una misma concentración. Se registró el peso de los especímenes durante intervalos de tiempo definidos de 15, 30, 60 minutos y 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 24 horas.

2.5.6 Ángulo de contacto

El ángulo de contacto es aquel formado entre una gota de agua y la superficie del suelo; este valor permite medir la afinidad del suelo con el agua. Los ángulos medidos determinan el comportamiento del suelo, siendo así que los ángulos agudos (menores de 90°) presentan una superficie mojable y de comportamiento hidrofílico, mientras que un ángulo obtuso (entre 90° y 180°) muestran una superficie no mojable que es hidrofóbica. Para dicho ensayo se siguieron los lineamientos de Walker (2002). Se depositó una gota de agua destilada sobre la superficie de suelo, midiendo el ángulo formado entre la gota con el suelo y la tangente a la curvatura de la gota que parte en dicho punto (Figura 7a). Se utilizaron 3 especímenes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 2 cm de altura para cada concentración. Asimismo, se utilizó una cámara fotográfica con la resolución e iluminación adecuada para capturar el momento en que la gota se deposita sobre la superficie (Figura 7b).

Figura 7

Representación de la medición del ángulo de contacto. (a) esquematización de la gota y ángulo de contacto sobre la superficie de suelo. (b) esquema del montaje para capturar las fotografías digitales.

**(a)****(b)**

Capítulo 3

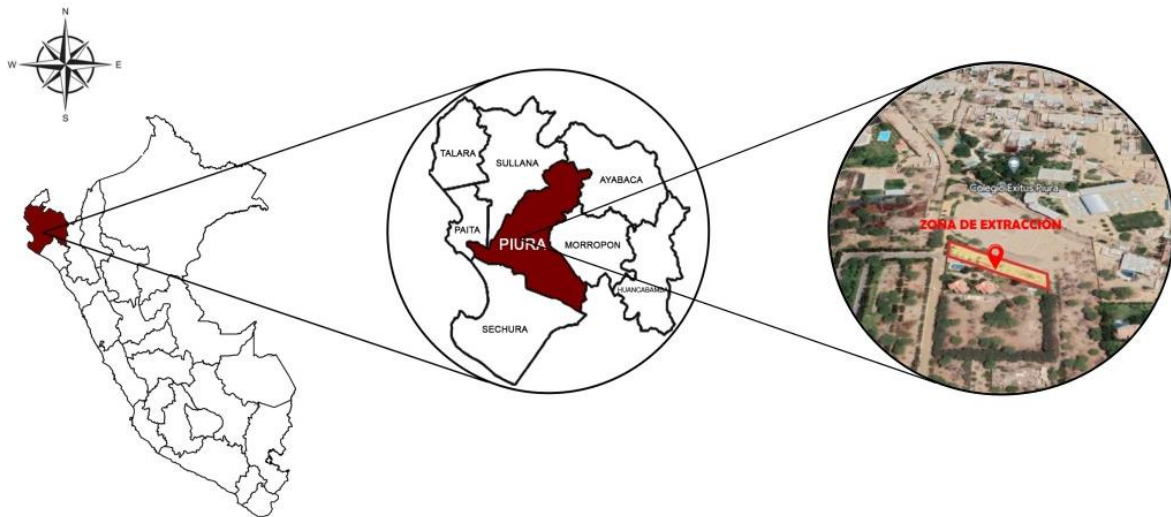
Caracterización de los materiales

3.1 Lugar de procedencia y origen geológico

El suelo empleado en la presente investigación fue seleccionado y extraído del caserío Miraflores del distrito de Castilla, provincia de Piura y departamento Piura (Figura 8). Dicho distrito cuenta con una extensión de 662.23 km² y está ubicado sobre una cota de 32 m.s.n.m. cuyo relieve es de una topografía suave, con pequeñas elevaciones (INDECI & UNP, 2001). La zona de recolección de suelo pertenece a la cuenca geológica del río Piura en el tramo urbano adyacente a la margen izquierda del río Piura.

Figura 8

Ubicación de la zona de extracción del suelo a nivel nacional, regional y local



La ubicación geográfica del lugar de extracción pertenece al cuaternario (formaciones más recientes en la escala de tiempo geológico), que se caracteriza por tener suelos con poca consolidación y estar dispuestos en forma de depósitos aluviales o eólicos, su composición es variable, usualmente están conformado por arenas, limos y arcillas (Guzmán, 1994). Debido a su origen se tienen tierras de color pardo amarillento en la base y gris claro hacia la superficie (INDECI & UNP, 2001). Además de los colores, la forma de transporte para su depósito y consistencia dan indicio de que es un material con baja cohesión y resistencia mecánica, además de un alto desprendimiento de polvo.

En la Figura 9 se muestra la recolección y acondicionamiento del suelo para su caracterización. Después de su extracción (Figura 9a) se dejó secar al aire libre para liberar el exceso de humedad contenido en el suelo (Figura 9b), para finalmente homogenizar el

material extraído antes de pasar por la malla #4 para la elaboración de especímenes y realización de los ensayos (Figura 9c).

Figura 9

Recolección y preparación de muestras de suelos para su caracterización. (a) recolección del suelo. (b) suelo recolectado secado al aire. (c) preparación de suelo para elaboración de especímenes.

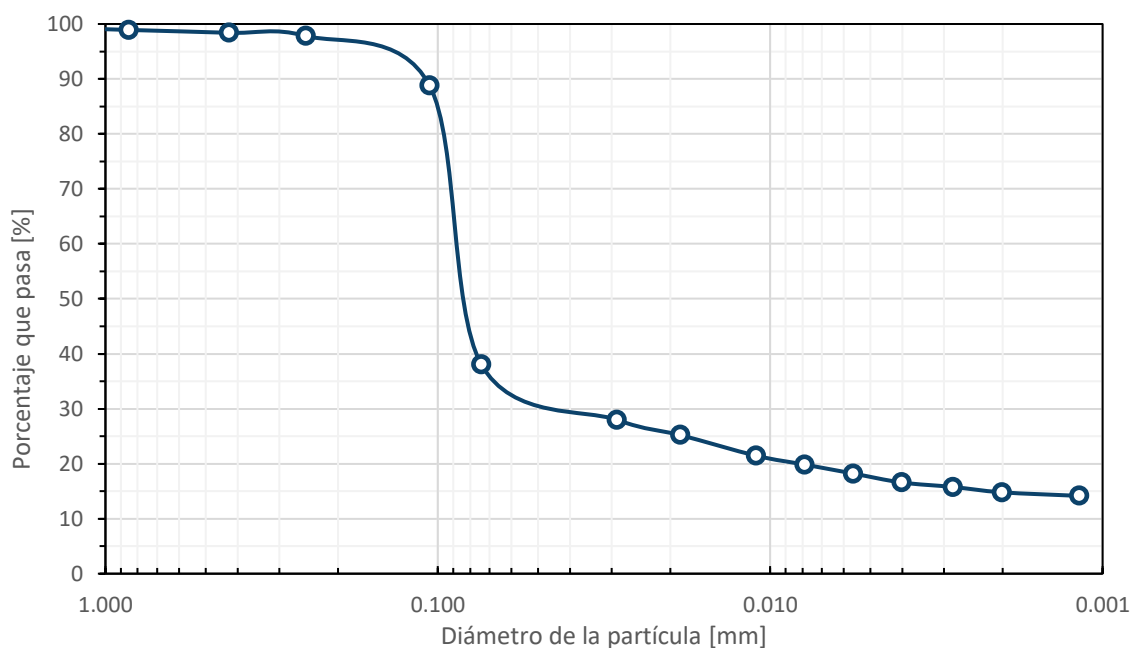


3.2 Suelo a estabilizar

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el suelo utilizado en las pruebas se clasifica como una arena limosa (SM) de baja plasticidad, tiene una gravedad específica (G_s) de 2.68, una densidad seca máxima (γ_{max}) de 1.73 g/cm³, coeficiente de uniformidad (C_u) de 71.67 y coeficiente de Gradación (C_c) de 11.87. En el sistema ASSTHO este suelo recibe la clasificación de A-4(0). En la Figura 10 se muestra la curva granulométrica resultante de la muestra. Los resultados indicaron que hay presencia de 2% de arena gruesa, 60% de arena fina y 38% de limos de baja plasticidad. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de dicho suelo.

Figura 10

Curva granulométrica de la muestra de suelo usado en la presente investigación

**Tabla 5**

Parámetros del suelo usado en la presente investigación

Clasificación SUCS	SM (arena limosa)
Clasificación AASHTO	A-4(0)
Contenido de humedad [%]	1.32%
Gravedad específica	2.68
Consistencia	Suelo de baja plasticidad
Límite Líquido	26
Índice de plasticidad [IP]	4

3.3 Descripción de la planta de cabuya

La planta de cabuya de la cual se obtiene el biopolímero es conocida con diferentes nombres tales como: pajpa, chachua, maguey, agave y penca de maguey (Dávila, 2002; Duran, et al., 2021). A pesar de ser oriunda de México, crece casi en todos los valles interandinos del Perú (Bautista, 2006). La cabuya crece y se adaptan de manera sencilla a tierras ácidas y áridas (Carhuapuma, et al., 2019). Pertenecen a la familia de las agaváceas y están provistas de espinas en sus bordes con hojas largas, carnosas y muy fibrosas (Figura 11), posee flores amarillas y se reproduce por renuevos que brotan del contorno de sus raíces (Barrantes, 2012). Asimismo, esta especie tiene una gran capacidad ecológica para reproducirse y adaptarse a los diversos tipos de medios y ecosistemas ya que su plasticidad genética permite

su propagación mediante germinación de semillas y la polinización, extendiendo su crecimiento a variados territorios (León, et al., 2013).

Figura 11

Planta de cabuya



3.3.1 Descripción del biopolímero

El extracto de cabuya se conoce con los nombres de aguamiel, aguamiel de maguey, miel de México, miel de agave y se obtiene de forma artesanal (Bautista, 2006). Los principales elementos que lo constituyen son agua, azúcares (glucosa, fructosa y sacarosa), proteínas, gomas y sales minerales (Lappe, et al., 2008), que le brindan un color blanquecino amarillento. Al ser una especie rica en carbohidratos es sensible a procesos de fermentación (Bautista & Arias, 2014). El aguamiel de cabuya puede considerarse un polímero natural cuya utilización como estabilizante químico puede ser más ecológico (Untiveros, 2022; Benites, 2017).

La caracterización visual y medición de la densidad del polímero de cabuya fueron analizadas en el laboratorio LEMC – UDEP. Al colocar el polímero natural en el recipiente transparente se pudo apreciar el color amarillo que lo caracteriza (Figura 12). Además, presenta un olor dulce agradable con cierto grado de fermentación. La textura del material es algo viscosa y se contrasta con su densidad que es ligeramente mayor a la del agua. En la Tabla 6, se muestran las características.

Figura 12*Polímero natural de cabuya***Tabla 6***Características del polímero de cabuya usado en la presente investigación*

Color	Amarillo
Olor	Dulce
Textura	Baja viscosidad
Densidad	1.1 g/cm ³

3.3.2 Proceso de extracción del polímero

De acuerdo con Bautista (2006), para la extracción del aguamiel aún no existen procedimientos estandarizados en el Perú, pero la mayoría de los productores locales lo realizan de la siguiente manera:

Se selecciona una planta de cabuya cuya edad sea mayor a 5 años (Figura 13a), luego se corta las hojas que se encuentran más externamente para permitir el acceso al centro de la planta y poder manipular el tallo, corazón o huevo de la cabuya. Con ayuda de algún instrumento punzocortante se realiza una perforación en el tallo para obtener una cavidad lo suficientemente grande (Figura 13b), donde se depositará la savia o aguamiel. Para esta actividad se debe manipular la planta con una indumentaria que cubra la piel, ya que el ácido oxálico contenido en las hojas al entrar en contacto con la esta genera un escozor intenso (Bautista, 2006). Es necesario cubrir con las propias hojas extraídas de la planta al orificio para cuidar la savia ya que su contenido de azúcares y dulce olor es propenso a atraer y acumular

insectos. Cada día se debe raspar las paredes del orificio para garantizar la exudación (Figura 13c), así se obtienen aproximadamente 3 litros diarios.

Figura 13

Proceso de extracción del aguamiel. (a) identificación de la planta de cabuya. (b) perforación del orificio en el tallo. (c) extracción del aguamiel (savia).



(a)

(b)

(c)

3.3.3 Proceso de almacenaje y maceración

Según el estudio previo de Benites (2017), para activar las propiedades estabilizantes del extracto de Cabuya se necesitan al menos 10 días de maceración, por ello, se decidió almacenar el polímero natural en envases comerciales (Figura 14a) y descartables (Figura 14b) hasta cumplir con el tiempo de maceración y fecha de realización de los respectivos ensayos. La maceración se realizó al aire libre a temperatura ambiente de Piura (alrededor de los 32°C en los meses de marzo - abril).

Figura 14

Almacenamiento y maceración del polímero natural. (a) almacenamiento en envase comercial. (b) almacenamiento en envases descartables.

**(a)****(b)**

Capítulo 4

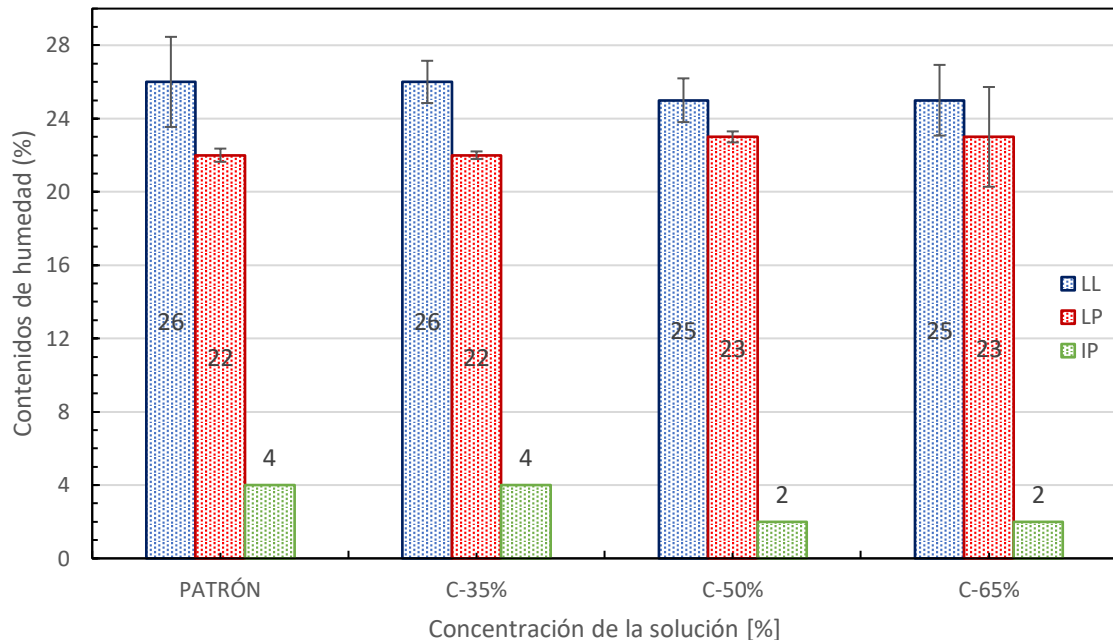
Resultados y discusión

4.1 Consistencia

La consistencia del suelo se mide mediante los límites de Atterberg. En la Figura 15 se han graficado los contenidos de humedad para las distintas concentraciones de solución polimérica. Se puede observar que la solución al 35% de concentración no modificó la consistencia del suelo, pues se obtuvieron los mismos resultados que el suelo patrón (suelo sin adición de cabuya). Mientras que a partir del 50% de concentración, el límite líquido decrece y el límite plástico aumenta haciendo que el índice de plasticidad disminuya. Aunque estas variaciones son poco significativas son el resultado del efecto aglomerante que presenta la cabuya. Esto debió hacer que las partículas finas, las cuales son las responsables de dar la plasticidad, se aglomeren, de modo que se reduce la movilidad del conjunto.

Figura 15

Variación de la consistencia del suelo con el polímero de la cabuya



4.2 Capacidad de soporte del suelo – CBR

4.2.1 Proctor modificado

El ensayo Proctor modificado permite establecer parámetros como la máxima densidad seca (MDS) y el contenido óptimo de humedad. En la Tabla 7 se muestran los

resultados de estos 2 parámetros al variar la concentración del polímero. Se puede observar que la adición de polímero contribuye a aumentar la máxima densidad seca, siendo la solución al 50% de polímero la que produce un incremento del 2.3% respecto al suelo sin polímero. Este incremento de la densidad podría deberse a que la cabuya tiene propiedades aglomerantes, por lo cual debió recubrir las partículas finas y gruesas mediante la generación de membranas viscosas sellando los vacíos e incrementando el peso del suelo, con lo que se incrementa la densidad seca. Sin embargo, en el conjunto, esta variación no es significativa. En cuanto al contenido de humedad óptimo, se observa que se mantiene casi constante y alrededor de 13%, es decir, no sufre cambios significativos.

Tabla 7

Resultados de los ensayos Proctor en suelo patrón y suelo estabilizado con cabuya

Muestra	Densidad seca máxima [g/cm³]	Humedad óptima [%]
Suelo patrón	1.73	13.3
C-35%	1.75	13.2
C-50%	1.77	13.2
C-65%	1.76	12.9

4.2.2 California Bearing Ratio (CBR)

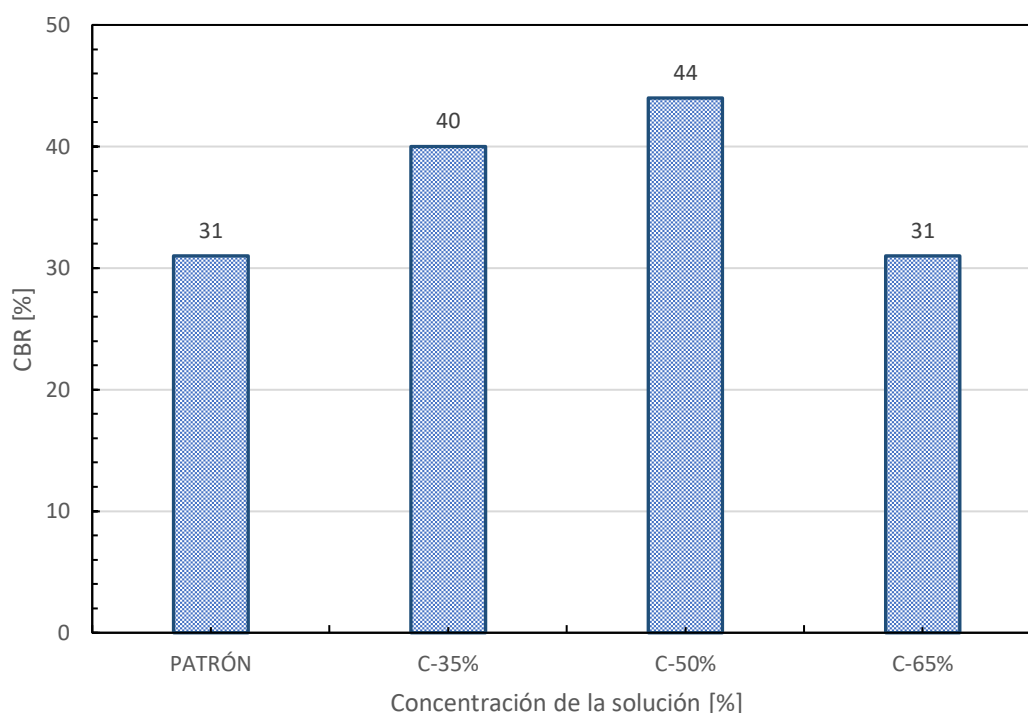
La capacidad soporte del suelo se mide mediante el ensayo de CBR. En la Figura 16 se muestran los resultados del CBR referidos a una penetración de 0.1" y al 95% de la máxima densidad seca tanto para la muestra sin estabilizar como para las muestras elaboradas con 35%, 50% y 65% de concentración de solución de cabuya. Se observa que el suelo sin estabilizar tiene un valor de CBR de 31, mientras que en los especímenes elaborados con la solución al 35% de concentración el CBR aumenta a 40. Los especímenes elaborados con solución al 50% alcanzan un CBR de 44, que representa un incremento del 42% respecto al suelo sin polímero. Sin embargo, con la solución al 65% el CBR disminuye drásticamente hasta un valor igual que el patrón (31).

Al parecer, las propiedades aglomerantes de la cabuya garantizan el recubrimiento de las partículas, tanto finas como gruesas del suelo, generando membranas viscosas y entrelazadas alrededor de los granos que podrían ser causa del mayor contacto entre granos dando lugar a una matriz de suelo más estable. Sin embargo, este efecto no parece variar mucho de una concentración pudiendo estar relacionado solo con el incremento de la densidad. Una mayor impermeabilidad del suelo haría que el suelo mantenga su integridad en condiciones saturadas, que es la condición usada al medir el CBR. Por lo tanto, este ligero aumento podría considerarse poco significativo en términos de capacidad resistente por ello al aumentar la concentración del polímero, el valor de CBR retorna a ser el mismo que el suelo patrón.

En conclusión, se puede identificar una concentración óptima de solución de cabuya del 50% para lograr un efecto positivo en el comportamiento mecánico del material. Esto es coherente con los resultados de la investigación de Rojas & García (2023), donde hay un porcentaje óptimo de polímero para un CBR máximo, aunque en su caso la cantidad óptima se encuentra al 35% de concentración. Esta diferencia en el porcentaje óptimo podría estar relacionado con el tipo de suelo, debido a que su estudio fue realizado en un suelo fino (arcilla de baja plasticidad) se debió necesitar poca cantidad de polímero para cubrir los vacíos y mejorar la adhesión puesto que la disposición de partículas de arcilla se encuentra muy juntas.

Figura 16

Resultados del ensayo CBR compactados al Proctor modificado del suelo estabilizado con cabuya



4.3 Corte directo

La resistencia al corte de un suelo se mide mediante el ensayo de corte directo, del cual se obtienen los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interno de un suelo. En la Tabla 8 se observan los resultados de la cohesión y el ángulo de fricción del suelo con concentraciones de cabuya. Se puede observar que la adición de la solución polimérica no tiene efecto sobre la cohesión del suelo. Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Rojas & García (2023), para suelos arcillosos, con incrementos poco significativos de la cohesión. Asimismo, se puede observar que para una concentración del 35% y 65% de cabuya el ángulo de fricción del suelo se incrementa en un 5% y 9% respectivamente, con respecto a la muestra patrón. Esto indicaría una ligera mejora en la resistencia al deslizamiento en

comparación con las otras concentraciones de solución polimérica. Sin embargo, los resultados obtenidos no siguen un patrón establecido ni una tendencia clara.

Tabla 8

Resultados del ensayo de corte directo del suelo patrón y estabilizado con cabuya

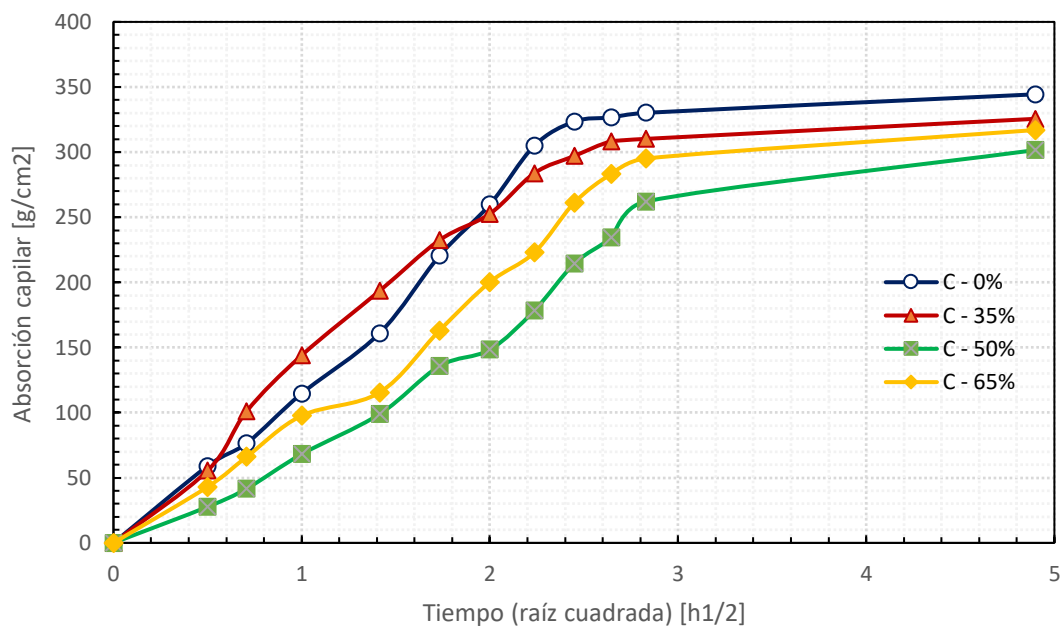
Muestra	Cohesión [kg/cm ²]	Ángulo de fricción [°]
Suelo patrón	0	35.7
C-35%	0	37.4
C-50%	0.1	27.8
C-65%	0	38.9

4.4 Absorción por capilaridad

La absorción de un suelo se puede medir mediante el ensayo de absorción por capilaridad, del cual se obtienen las curvas de absorción capilar, como se muestran en la Figura 17. Se observa que todos los especímenes estabilizados con las soluciones de cabuya presentaron menor absorción que los especímenes de control. Aunque los especímenes con 35% de cabuya tuvieron una rápida absorción inicial, al transcurrir el tiempo la absorción se redujo en todos los casos y fue menor que la del patrón, tal como se esperaba. Además, se puede identificar una concentración óptima de cabuya del 50% que produce la mayor resistencia al paso del agua. Este efecto de reducción de la absorción capilar se puede explicar porque el polímero de cabuya posee propiedades de reducción de la permeabilidad. Se sabe que este tipo de polímero crea membranas que encapsulan a las partículas y los hidrogeles viscosos llenan los vacíos existentes en el suelo y los obstruyen, reduciendo la conductividad hidráulica y la filtración de agua (Benites, 2017; Liu, et al., 2018). Esto explicaría la disminución de la absorción capilar en los especímenes con adición de biopolímero de cabuya. Se concluye que la solución de polímero logra reducir la absorción capilar del suelo areno – limoso.

Figura 17

Resultados del ensayo de absorción por capilaridad del suelo estabilizado con cabuya



En la Tabla 9 tanto para la muestra patrón y para las conformadas con distintas concentraciones, se han resumido los valores de absorción final y los coeficientes de absorción capilar, que corresponden con la pendiente de las curvas de absorción (Tabla 9). Las muestras con menor absorción final son aquellas con la solución polimérica al 50% de concentración con una absorción final de 3.72 g/cm². La misma tendencia se observa en el coeficiente de absorción capilar, con un valor de 1.08 g/cm².hora^{1/2} para el suelo con el 50% de polímero.

Tabla 9

Absorción final y coeficientes de absorción

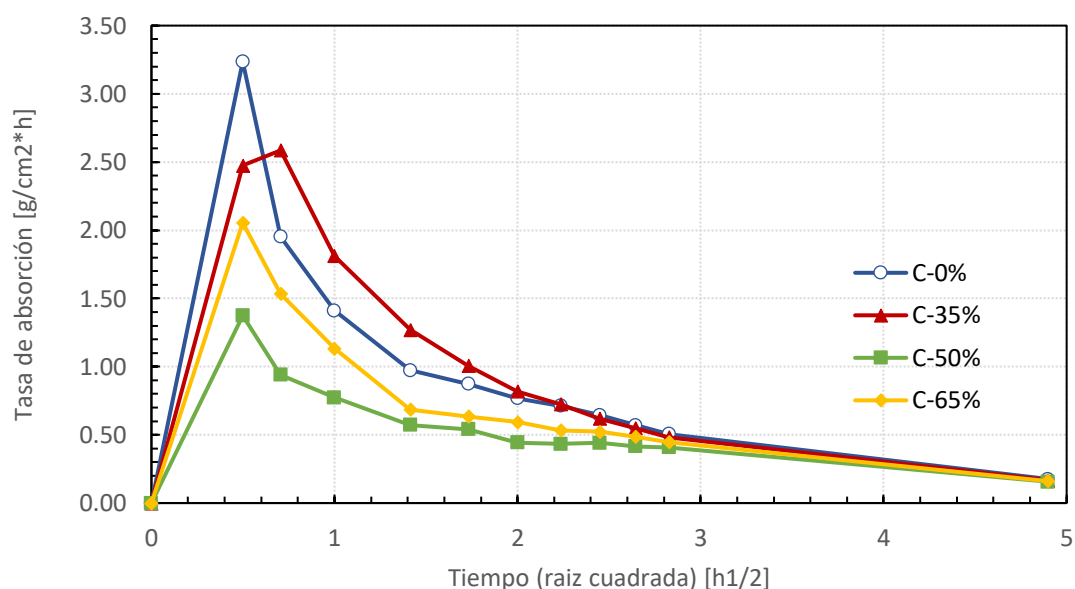
Muestra	Absorción final [g/cm ²]	Coefficiente de absorción capilar [g/cm ² .hora ^{1/2}]
C - 0%	4.23	1.58
C - 35%	4.02	1.53
C - 50%	3.72	1.08
C - 65%	3.88	1.28

En la Figura 18 se ha graficado la tasa de absorción de las probetas (pendientes de la curva de absorción) para el suelo sin estabilizar y las distintas concentraciones de solución con respecto a la raíz del tiempo. Se observa que todas las muestras de suelo estabilizado presentaron una alta tasa de absorción inicial menor al suelo sin estabilizar, y que disminuyen gradualmente en el tiempo. Las muestras elaboradas con la solución al 50% fueron las que

presentaron la menor tasa de absorción, confirmando que esta es la concentración óptima de polímero. Asimismo, se observa que a partir de las 8 horas (tiempo de $2.83 \text{ h}^{1/2}$) en la Figura 18 la tasa de absorción de todas las muestras se estabiliza, sin importar la concentración de cabuya usada. El efecto de la cabuya en la reducción de la tasa de absorción parece actuar en las primeras horas al obstruir los poros, generando que se sellen los vacíos entre partículas y reduciendo de esta manera la permeabilidad y la conductividad hidráulica.

Figura 18

Tasa de absorción del suelo estabilizado con cabuya



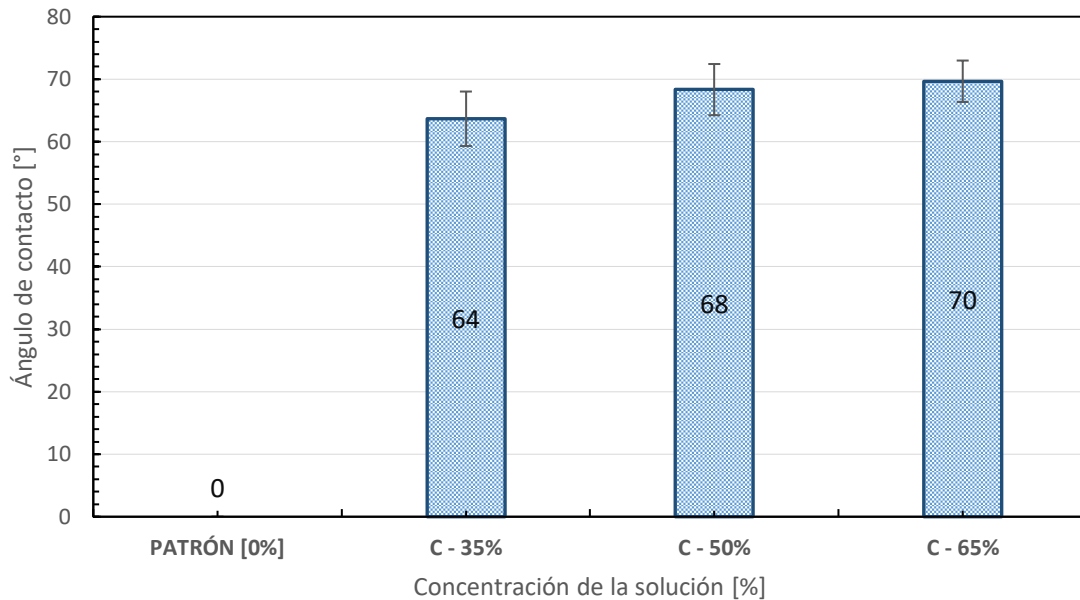
Otra manera de medir el grado de impermeabilidad de un suelo es midiendo el ángulo de contacto que forma una gota de agua sobre su superficie. Si el ángulo de contacto que se forma es mayor a 90° se considera que el material es hidrofóbico; una absorción inmediata de la gota sobre su superficie indica una clara afinidad por el agua. En este caso, al medir el ángulo de contacto en la superficie de las muestras utilizadas para el ensayo de absorción capilar se verificó en todos los casos que el agua era absorbida de inmediato, lo que indicaría una condición hidrofílica del suelo estabilizado con cabuya. Esto es consistente con los resultados obtenidos, puesto que el comportamiento del material mejora poco al usar la cabuya. Pero basados en investigaciones anteriores con este mismo polímero (Benites, 2017), se esperaba una mejora significativa al menos en las propiedades impermeabilizantes de la cabuya.

Para ello, se repitió la medición del ángulo de contacto en el suelo estabilizado pero esta vez aumentando la condición de saturación del suelo con la solución de polímero, pero manteniendo las concentraciones. En esta condición ya fue posible medir un ángulo de contacto en el suelo estabilizado, aunque sigue siendo menor a 90° cuyos resultados se muestran en la Figura 19. Esto confirma el potencial estabilizador de la cabuya, pero también

la necesidad de establecer un procedimiento para la mezcla de suelo que garantice la acción del polímero.

Figura 19

Resultados del ensayo de ángulo de contacto del suelo estabilizado con solución de cabuya a mayor grado de saturación (37.5%)



Finalmente, tal como se concluyó en investigaciones previas (Benites, 2017; Rojas & García, 2023) el polímero de cabuya tiene potencial como impermeabilizante de suelos, reduciendo la absorción capilar, mejorando las propiedades hidrofóbicas y aumentando la resistencia mecánica. Esto abre la posibilidad de seguir explorando su uso como estabilizador de suelos frente a solicitudes de inundación o saturación severas.

Conclusiones

El polímero de cabuya en un suelo areno – limoso disminuye el límite líquido y aumenta el límite plástico modificando ligeramente su índice de plasticidad, pero no de manera significativa.

La adición de polímero de cabuya en las muestras de suelo no modifica la cohesión, pero sí contribuye ligeramente a aumentar el ángulo de fricción hasta en un 9% respecto a la muestra de control lo que podría ser favorable ya que a mayor ángulo de fricción la estabilidad lateral del suelo se incrementa.

La adición de polímero de cabuya en las muestras de suelo generó un aumento del 42% del valor CBR respecto a la muestra de control. Esto indicaría que puede ser usado en un suelo con fines de pavimentación pues mejora la capacidad de soporte, el cual es un parámetro importante en el diseño de pavimentos.

El polímero de cabuya disminuye la permeabilidad capilar del suelo, favoreciendo el desempeño de los suelos en condiciones de drenaje deficiente.



Recomendaciones

La mayor parte de los agentes químicos no tradicionales se han estudiado a nivel químico previo a su utilización en la estabilización de suelos. Se recomienda realizar el análisis a nivel molecular de la cabuya para conocer con mayor profundidad su comportamiento y características que posteriormente sirvan para conocer la forma de interacción a nivel molecular con las partículas del suelo.

Asimismo, este trabajo se puede extender a otros suelos para verificar los efectos impermeabilizantes y considerando otras condiciones de mezclado para garantizar la completa saturación del suelo con el polímero.



Referencias

- AENOR. (2008). Asociación Española de Normalización y Certificación - UNE 41410. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayos.
- Aguilar, C. & Borda, Y. (2015). Revisión del estado del arte del uso de polímeros en la estabilización de suelos. (Monografía). Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Bahar, R., Benazzoug, M. & Kenai, S. (2004) Performance of compacted cement-stabilised soil, *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 811-820. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- Barrantes, W. (2012). Efecto de la concentración de sólidos solubles de aguamiel de cabuya (*furcraea andina*) en las características sensoriales de una bebida destilada tipo tequila blanco. (Tesis para optar el título de ingeniero agroindustrial). Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú.
- Bautista, D. & Arias, A. (2014). Estudio químico bromatológico de aguamiel de Agave americana L. (Maguey). *Ciencia e Investigación*, 11(2), 46-51. <https://doi.org/10.15381/ci.v11i2.4061>
- Bautista, N. (2006). Estudio químico-bromatológico y elaboración de néctar de aguamiel de Agave americana L. (maguey) procedente de Ayacucho. (Tesis para optar el título profesional de Químico Farmacéutico). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Benites, V. (2017). Adobe estabilizado con extracto de cabuya *Furcraea andina* (Tesis en Ingeniería Civil). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Billong, N., Melo, U., Louvet, F. & Njopwouo, D. (2009). Properties of compressed lateritic soil stabilized with a burnt clay–lime binder: Effect of mixture components, *Construction and Building Materials*, 23(6), 2457-2460. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.017>
- Camacho, J., Reyes, O. & Mayorga, C. (2008). Curado natural y acelerado de una arcilla estabilizada con aceite sulfonado. *Ingeniería y desarrollo*, 24, 48-62.
- Carhuapuma, B., Gambini, Y., Panta, L. & Quispe, M. (2019). Estudio de pre-factibilidad para la producción de carteras elaboradas con fibra de maguey. (Trabajo de Investigación para optar el Grado Académico de Bachiller en Ingeniería Ambiental). Universidad San Ignacio de Loyola, Lima, Perú.
- Chang, I. & Cho, G. (2012). Strengthening of Korean residual soil with β -1,3/1,6-glucan biopolymer. *Construction and Building Materials*, 30, 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.030>

- Chang, I., Im, J. & Cho, G. (2016a). Geotechnical engineering behaviors of gellan gum biopolymer treated sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 53(10), 1658-1670. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0475>
- Chang, I., Im, J., & Cho, G. (2016b). Introduction of Microbial Biopolymers in Soil Treatment for Future Environmentally-Friendly and Sustainable Geotechnical Engineering. *Sustainability*, 8(3), 251. <http://dx.doi.org/10.3390/su8030251>
- Corzo, C. (2013). Evaluación de las reacciones de hidratación y puzolánica del cemento portland con incorporación de puzolana natural y cal mediante termogravimetría y microscopía electrónica de barrido. (Trabajo de Grado.) Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Cruz, E. (2021). Análisis comparativo entre estabilizantes químicos de enzimas y polímeros para evaluar su efecto de capacidad de soporte de subrasante. (Tesis para optar el título de ingeniero civil). Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, Perú.
- Dávila, C. (2002). Estrategias para la comercialización de los derivados de la Cabuya (Agave americana L). (Tesis de Post Grado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Duran, H., Pulido, J., Ávila, A., Vasilevich, Y. & Vladimirovna, L. (2021). Diseño de una picadora de pencas de maguey y nopal. *Acta universitaria*, 31, 1-6. <https://doi.org/10.15174/au.2021.2580>
- Elizondo, F., Navas, A. & Sibaja, D. (2010). Efectos de la cal en la estabilización de subrasantes. *Ingeniería*, 20, 93-108. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/7268/6945>
- Guzmán, A. (1994). Estudio Geodinámico de la Cuenca del Río Piura, Boletín N°9 (INGEMET). Instituto Geológico, Minero y Metalurgico. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/255>
- Hassan, M. (2009). Engineering characteristics of cement stabilized soft finnish clay – A Laboratory study. (Licentiate thesis). Helsinki University of Technology. Faculty of Engineering and Architecture, Helsinki, Finland.
- Huang, J., Kogbara, R., Hariharan, N., Masad, E. & Little, D. (2021). State-of-the-art review of polymers used in soil stabilization, *Construction and Building Materials*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124685>
- IMT. (2021). Instituto Mexicano del Transporte. Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos estabilizados con un polímero. Publicación Técnica No. 619. Sanfadilla, Qro.
- INDECI & UNP (2001). Instituto Nacional de Defensa Civil y Universidad Nacional de Piura. Estudio de Mecánica de Suelos y Mapa de Peligros del distrito de Castilla – Piura.

- INDECOPI (1999). NTP 339.127.1998 – SUELOS: Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo.
- INDECOPI (1999). NTP 339.128.1999 – SUELOS: Método de ensayo para el análisis granulométrico.
- INDECOPI (1999). NTP 339.129.1999– SUELOS: Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad en suelos.
- INDECOPI (1999). NTP 339.131.1999– SUELOS: Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo.
- INDECOPI (1999). NTP 339.141.1999– SUELOS: Método de ensayo para la compactación del suelo en laboratorio utilizando una energía modificada
- INDECOPI (1999). NTP 339.145.1999– SUELOS: Método de ensayo de CBR de suelos compactados en laboratorio.
- INDECOPI (1999). NTP 339.171.2002– SUELOS: suelos. Método de ensayo normalizado para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas no drenadas.
- Lappe, P., Moreno, R., Arrizón, J., Herrera, T., García, A. & Gschaedler, A. (2008). Yeasts associated with the production of Mexican alcoholic nondistilled and distilled Agave beverages. *FEMS Yeast Research*, 8(7), 1037-1052. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00430.x>
- León, N., Campos, G., Enríquez del Valle, J., Velasco, V., Marini, F. & Rodríguez, G. (2013). Diversidad de especies de agave en San Miguel Tilquiapam, Ocotlán, Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 4, 1185- 1195. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i6.1282>
- Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Lu, Y., Qian, W. & Kanungo, D. (2018). Evaluation of Strength Properties of Sand Modified with Organic Polymers. *Polymers*, 10(3), 287. <http://dx.doi.org/10.3390/polym10030287>
- Llano, E. (2021). Efecto del intemperismo sobre las propiedades fisicoquímicas, el desempeño y la durabilidad de suelos viales aditivados con estabilizantes químicos. (Tesis de doctoral en Ingeniería Civil). Universidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería, Medellín, Colombia
- Martínez, M., Campos, L. & Castillo, J. (2021). Metodologías para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero: descripción del proyecto de control en una industria productora de cemento. *Revista Tecnología en Marcha*, 34(3), 177-188. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5313>

- Mohamed, A., Wagiealla, S. (2004). Stabilization of Desert Sand Using Water-Borne Polymers. (Thesis for the degree of Master of Science in Materials Science and Engineering). United Arab Emirates University.
- MTC. (2014). Ministerio de Transportes y Comunicaciones. Manual de Carreteras - Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos: Sección suelos y pavimentos. Lima, Perú.
- Odar, G., Chavez, D. & Silvera, M. (2019). Stabilization method with lime in subgrades for rigid pavements designed by AASHTO 93 in road projects with the presence of bofedales. Industry, Innovation, and Infrastructure for Sustainable Cities and Communities, 60. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.60>
- PITRA. (2017). Programa de Infraestructura del Transporte – LanammeUCR. Estabilización de suelos y materiales granulares en caminos de bajo volumen de tránsito, empleando productos no tradicionales, 8 (2).
- Ravines, M. (2010). Pruebas con un producto enzimático como agente estabilizador de suelos para carreteras. (Tesis para optar el título de ingeniero civil). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Retuerto, G. & Gonzales, A. (2022). Incremento de la capacidad de soporte de los suelos inestables de la Av. Naranjal en San Martín de Porres-Lima, mediante estabilización con biopolímero Lignina. (Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil). Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
- Rojas, C. & García, J. (2023). Estabilización de suelos con fines de pavimentación usando el polímero natural de la cabuya (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Civil. Piura, Perú.
- Taha, I. & Raihan, M. (2023). Portland Cement Treated Soil: Evaluation and Conflict Results. Civil Engineering and Architecture, 11(2), 560-568. DOI: 10.13189/cea.2023.110203
- Taher, Z., Scalia, J., Bareither, C. (2020). Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers. Transportation Geotechnics, 24. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100387>
- Tingle, J., Kent Newman, J., Larson, S., Weiss, C. & Rushing, J. (2007). Stabilization Mechanisms of Nontraditional Additives. Journal of the Transportation Research Board, 2, 59-67. DOI: 10.3141/1989-49
- Umesha, T., Dinesh, S. & Sivapullaiah, P. (2009). Control of dispersivity of soil using lime and cement. International Journal of Geology, 3(1), 8-16.
- Untiveros, J. (2022). Influencia del aguamiel de cabuya en las propiedades mecánicas del material para afirmado, San Jerónimo, Cusco – 2022. (Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil). Universidad Cesar Vallejo, Callao, Perú.

Walker, P. (2002). The Australian earth building handbook. Australia, Sydney.

