Pontificia Universidad Católica del Ecuador
Facultad de Hábitat, Infraestructura y Creatividad
Maestría en Geotecnia Aplicada

Revisión de métodos no tradicionales de mejora de suelos usando fibras naturales

Trabajo de titulación – Opción: Proyecto de Titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo. presentado para obtener el grado académico de Magister en Geotecnia Aplicada

Autor: Ing. Erick Steven Rosero Chamorro
Tutor: Ing. Jorge David Albuja Sánchez, M.Sc. PHd.

Quito, 2026

Dedicatoria.

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, quien a lo largo de mi formación académica me ha concedido fortaleza y discernimiento para tomar decisiones acertadas, permitiéndome hoy alcanzar uno de los sueños más importantes de mi vida.

A mis padres, verdaderos cimientos de mi existencia, por su amor constante, sus consejos oportunos, los valores inculcados y su apoyo incondicional; gracias a su ejemplo y acompañamiento ha sido posible culminar con éxito esta etapa académica.

A mis abuelos, que desde el cielo iluminan y resguardan mi camino, bendiciendo cada paso que doy; este logro también les pertenece. Un abrazo eterno hasta el cielo.

Agradecimiento.

Expreso mi profunda gratitud a Dios por concederme salud y vida, y por guiar mis pasos con sabiduría a lo largo de este proceso, permitiéndome tomar decisiones acertadas en los momentos determinantes.

A mi padre, Carlos Ramiro, por su apoyo constante y su motivación inquebrantable, fundamentales para superar los desafíos que se presentaron en este camino. A mi madre, Erika Cecilia, por su amor, sus consejos y la fortaleza que siempre me ha transmitido para enfrentar cada obstáculo con determinación.

A mis hermanas, A Karla, junto a su esposo Henry Paul y mi sobrina Paula Victoria, por abrirme siempre las puertas de su hogar y brindarme respaldo incondicional. A Ana Belén, con quien hoy puedo compartir la satisfacción de haber alcanzado esta meta; aunque nuestros caminos sean distintos, el apoyo será siempre mutuo.

A toda mi familia, gracias por su preocupación, acompañamiento y confianza durante este proceso que hoy rinde sus frutos. A mis amigos, con quienes compartí jornadas de estudio, aprendizajes y experiencias que enriquecieron tanto mi formación académica como personal.

A mi tutor, Ing. Jorge Albuja Sánchez, M.Sc. PhD., por su confianza, orientación y compromiso durante el desarrollo de este trabajo. Finalmente, a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador y, de manera especial, a los docentes de la Facultad de Hábitat e Infraestructura, por transmitir con dedicación sus conocimientos y experiencias a lo largo de mi formación profesional.

Resumen.

Esta investigación desarrolla una revisión sistemática de la evidencia científica indexada sobre el uso de fibras naturales como método no tradicional para la mejora de suelos, analizando su impacto mecánico y viabilidad sostenible. Mediante un enfoque cuantitativo-analítico, se evaluaron 55 artículos científicos a través de un instrumento de calidad metodológica que clasificó al 75% de los estudios en un nivel de calidad moderada, evidenciando un control experimental adecuado, pero con vacíos recurrentes en pruebas de durabilidad a largo plazo. Los hallazgos demuestran mejoras significativas en la resistencia a la compresión simple (UCS), con incrementos reportados de hasta el 348%, además de optimizar el valor del CBR y los parámetros de corte. Se identificó que el mecanismo fundamental es el efecto de "puenteado", el cual transforma el comportamiento frágil del suelo en uno dúctil, manteniendo la integridad de la matriz tras la falla pico. Los resultados sugieren configuraciones óptimas de diseño con contenidos de fibra entre el 0.5% y 2.0% y longitudes de 15 a 30 mm. A pesar de los beneficios mecánicos y la reducción de la huella de carbono, la biodegradabilidad y la naturaleza hidrofílica de las fibras lignocelulósicas representan limitaciones críticas para aplicaciones permanentes sin tratamientos previos. Finalmente, se destaca a la fibra de banano como una línea innovadora de investigación debido a su potencial para inducir reacciones cementantes por su elevado contenido de calcio. Esta revisión consolida criterios técnicos para fomentar el aprovechamiento de residuos agroindustriales en infraestructuras geotécnicas sostenibles.

Palabras clave: Fibras naturales, Estabilización de suelos, Geotecnia Sostenible.

Abstract.

This research conducts a systematic review of indexed scientific evidence on the use of natural fibers as a non-traditional method for soil improvement, analyzing their mechanical impact and sustainable viability. Using a quantitative-analytical approach, 55 scientific articles were evaluated using a methodological quality instrument that classified 75% of the studies as moderate quality, demonstrating adequate experimental control but with recurring gaps in long-term durability testing. The findings demonstrate significant improvements in unconfined compressive strength (UCS), with reported increases of up to 348%, in addition to optimizing CBR values and shear parameters. The fundamental mechanism identified is the "bridging" effect, which transforms the fragile behavior of the soil into a ductile one, maintaining the integrity of the matrix after peak failure. The results suggest optimal design configurations with fiber contents between 0.5% and 2.0% and lengths of 15 to 30 mm. Despite the mechanical benefits and reduced carbon footprint, the biodegradability and hydrophilic nature of lignocellulosic fibers represent critical limitations for permanent applications without prior treatment. Finally, banana fiber stands out as an innovative line of research due to its potential to induce cementing reactions due to its high calcium content. This review consolidates technical criteria to promote the use of agro-industrial waste in sustainable geotechnical infrastructures.

Keywords: Natural fibers, Soil stabilization, Sustainable geotechnics.

Índice general de contenidos

Índice general de contenidos ..... **i**
Lista de figuras ..... **v**
Lista de tablas ..... **v**
CAPÍTULO I **6**
1. Generalidades **6**
1.1. Introducción 6
1.2. Antecedentes 7
1.3. Planteamiento del problema 9
1.4. Formulación del problema 10
1.5. Justificación 10
1.6. Objetivos 11
1.6.1. Objetivo General 11
1.6.2. Objetivos Específicos 11
1.7. Hipótesis 12
1.7.1. Variables independientes 12
1.7.2. Variables dependientes 12
CAPÍTULO II **14**
2. Marco Teórico **14**
2.1. Fibras naturales 14
2.1.1. Tipos de fibras naturales usadas en suelos 14
2.1.2. Propiedades físicas y mecánicas 15
2.1.3. Ventajas y limitaciones frente a fibras sintéticas 16
2.2. Interacción suelo – fibra 17
2.2.1. Mecanismo de refuerzo 17
2.2.2. Influencia del tipo de suelo 18

2.2.3. Influencia de la humedad, succión y estructura del suelo 19
2.2.4. Anisotropía y orientación 20
2.3. Parámetros clave del refuerzo con fibras naturales 21
2.4. Efectos del refuerzo con fibras naturales en el comportamiento del suelo 22
2.5. Factores que afectan el desempeño del suelo reforzado con fibras 23
2.6. Aspectos de sostenibilidad y gestión de recursos 23
2.6.1. Reducción de huella de carbono y aprovechamiento de residuos agrícolas 24
2.6.2. Costos, disponibilidad local e impacto ambiental-social 25
2.7. Aplicaciones geotécnicas de las fibras naturales 27
2.8. Limitaciones, desafíos y vacíos de investigación 29
CAPÍTULO III 31
3. Marco Metodológico 31
3.1. Enfoque y tipo de investigación 31
3.2. Diseño metodológico 31
3.2.1. Búsqueda bibliográfica 31
3.2.2. Extracción y sistematización de datos 33
3.2.3. Metodología de análisis y limitaciones metodológicas 34
3.2.4. Instrumento de calidad metodológica 36
3.2.4.1. Estructura del instrumento 37
3.2.4.2. Sistema de puntuación del instrumento 37
3.2.4.3. Aplicación del instrumento 38
CAPÍTULO IV 47
4. Análisis de Resultados 47
4.1. Selección y caracterización de los estudios analizados 47
4.2. Evaluación de la calidad metodológica de los estudios 53
4.2.1. Dimensiones evaluadas y criterios de ponderación 53

4.2.2. Escala de puntaje e interpretación 54
4.2.3. Análisis de los resultados de calidad 54
4.2.4. Brechas metodológicas identificadas 55
4.3. Tendencias en el uso de fibras naturales en suelos 55
4.3.1. Tipos de fibras predominantes y disponibilidad global 56
4.3.2. Fibras emergentes y subproductos agrícolas 56
4.3.3. Distribución geográfica de la investigación 57
4.3.4. Evolución de los métodos de aplicación 57
4.4. Efectos del refuerzo con fibras en las propiedades mecánicas 57
4.4.1. Resistencia al corte 58
4.4.2. Resistencia a la compresión simple (UCS) 58
4.4.3. Valor del CBR (California Bearing Ratio) 59
4.4.4. Ductilidad y comportamiento post-pico 59
4.5. Factores que influyen en el desempeño del refuerzo 60
4.5.1. Contenido de fibra 60
4.5.2. Longitud de fibra y relación de aspecto (Aspect Ratio) 60
4.5.3. Tipo de suelo y granulometría 61
4.5.4. Estado de compactación y densidad 61
4.5.5. Humedad y succión matricial 61
4.6. Limitaciones de la evidencia científica 61
4.6.1. Falta de estandarización metodológica 62
4.6.2. Durabilidad y biodegradación a largo plazo 62
4.6.3. Desafíos en la uniformidad de la mezcla (Efecto "Balling") 62
4.6.4. Brechas en el conocimiento micro-mecánico 63
4.6.5. Falta de datos de campo y análisis de ciclo de vida (LCA) 63

4.7. Vacíos de investigación 63
4.7.1. Cuantificación de la durabilidad y degradación bioquímica 63
4.7.2. Ausencia de estándares de diseño y normativas técnicas 64
4.7.3. Escalamiento y efectos de borde en aplicaciones de campo 64
4.7.4. Mecanismos micro mecánicos e influencia mineralógica 64
4.7.5. Respuesta a la fatiga y ciclos ambientales 65
4.7.6. Análisis de ciclo de vida (LCA) y soluciones híbridas 65
CAPÍTULO V 66
5. Conclusiones y Recomendaciones 66
5.1. Conclusiones 66
5.2. Recomendaciones 67
CAPÍTULO VI 69
6. REFERENCIAS Y ANEXOS 69

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo de búsqueda bibliográfica..... 33
Figura 2. Aplicación de Research Rabbit Plus 35
Figura 3. Publicaciones por año..... 47
Figura 4. Publicaciones por Tipo de Suelo 48
Figura 5. Publicaciones por Tipo de Fibra..... 49
Figura 6. Parámetros de fibra más estudiados 50
Figura 7. Propiedades mecánicas del suelo más estudiadas 51
Figura 8. Ensayos de laboratorio más ejecutados 52

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de fibras naturales utilizados en mejora de suelos..... 14
Tabla 2. Propiedades físicas y mecánicas de suelos inherentes a las fibras naturales 15
Tabla 3. Influencia del tipo de suelo en mecanismo de refuerzo de suelos 18
Tabla 4. Parámetros clave del refuerzo con fibras naturales..... 21
Tabla 5. Efectos del refuerzo con fibras naturales en el comportamiento del suelo..... 22
Tabla 6. Factores que afectan el desempeño del suelo reforzado con fibras 23
Tabla 7. Aplicaciones geotécnicas de las fibras naturales 27
Tabla 8. Estructura del instrumento de calidad metodológica 37
Tabla 9. Sistema de puntuación del instrumento de calidad metodológica 37
Tabla 10. Instrumento de calidad metodológica 39
Tabla 11. Resultados de la investigación 41

CAPÍTULO I

1. Generalidades

1.1. Introducción

La estabilidad y el mejoramiento de suelos constituyen uno de los pilares fundamentales de la ingeniería geotécnica, especialmente en regiones donde los suelos presentan baja capacidad portante, alta compresibilidad o comportamientos problemáticos. Tradicionalmente, estos desafíos se han abordado mediante técnicas como la estabilización con cal o cemento, la compactación intensiva y el empleo de geosintéticos. Si bien estos métodos han demostrado eficacia, también presentan limitaciones ambientales y económicas importantes, asociadas a la elevada demanda energética y a la significativa huella de carbono que generan los materiales industriales utilizados en estos procesos (Noriega Armas et al., 2022).

En este contexto, el interés por métodos no tradicionales de mejora de suelos ha aumentado de forma considerable. Dentro de estas alternativas, el uso de fibras naturales se ha consolidado como una opción prometedora debido a su disponibilidad local, bajo costo, propiedades mecánicas favorables y, sobre todo, su potencial como material sostenible. Investigaciones recientes demuestran que fibras como sisal, coco, yute, bambú, paja de arroz, entre otras, pueden incrementar la resistencia al corte, la resistencia a compresión simple, la ductilidad y el CBR, especialmente en suelos cohesivos y arenosos finos (Abood & Shakir, 2023). Estos refuerzos actúan a través de mecanismos de fricción, adherencia y puenteo, generando un reforzamiento tridimensional que controla la propagación de grietas y mejora la respuesta post-pico.

Sin embargo, a pesar de estos resultados alentadores, la aplicación de fibras naturales en la práctica geotécnica sigue siendo limitada. La literatura muestra una alta dispersión en métodos de ensayo, variabilidad en longitudes y contenidos de fibra, diferencias sustanciales entre tipos de suelos y enfoques experimentales difíciles de comparar entre sí (Kafodya & Okonta, 2018). Además, persisten desafíos relevantes relacionados con la durabilidad y la biodegradación de las fibras, especialmente en ambientes húmedos o en suelos con pH desfavorables, lo que genera incertidumbre en su aplicación a largo plazo (Zhang et al., 2021a).

Por otro lado, distintas revisiones especializadas señalan que el uso de fibras naturales se alinea con las tendencias globales de geotecnia sostenible, ya que permite aprovechar residuos agrícolas y reducir la dependencia de estabilizantes químicos de alto impacto ambiental(Zhao et al., 2021). No obstante, coinciden en la necesidad de contar con revisiones sistemáticas que integren el conocimiento existente y ofrezcan una visión crítica sobre las ventajas, limitaciones y potencial real de estas técnicas dentro del diseño geotécnico (Vettorelo Juan J Clariá & José Clariá, 2014).

La investigación busca consolidar, analizar y evaluar críticamente el conocimiento sobre la mejora de suelos mediante fibras naturales, validando su aplicabilidad técnica a través del análisis de casos prácticos y experiencias operativas documentadas. Al integrar información de diversos estudios, el trabajo pretende generar una base técnica sólida que oriente decisiones en proyectos de infraestructura, tales como pavimentos, terraplenes ferroviarios y estabilización de taludes, donde el uso de fibras ya ha demostrado un desempeño real eficaz. Finalmente, el estudio busca fortalecer la comprensión de estas técnicas en condiciones de servicio y definir líneas claras para futuras investigaciones sobre durabilidad, estandarización de ensayos y criterios de diseño que faciliten su implementación masiva (Gowthaman et al., 2018a; Z. Liu et al., 2025; Nguyen & Indraratna, 2023a).

1.2. Antecedentes

Si bien el estudio científico sistemático del refuerzo de suelos mediante fibras discretas se consolidó hacia finales del siglo XX, esta técnica encuentra sus raíces en la antigüedad, con registros que datan de hace más de 5000 años. Existe evidencia histórica del empleo de paja de cebada y crin de caballo para el reforzamiento de bloques de barro, en el Antiguo Egipto (aprox. 2000 a.C.), así como el uso de esteras de caña en los zigurats de Mesopotamia y ramas de árboles como elementos a tracción en la Gran Muralla China. En la era contemporánea, este principio de tierra armada fue redescubierto y formalizado por Henri Vidal en la década de 1960, lo que impulsó la exploración moderna de materiales vegetales como la palma, el bambú o la paja. Dentro de estas contribuciones recientes, se demostraron que la inclusión aleatoria de fibras de palma en suelos limo arenosos mejora significativamente la resistencia al corte y reduce la fragilidad de la falla,

consolidándose como una alternativa técnica viable frente a los refuerzos sintéticos tempranos (Ak et al., 2020; Hejazi et al., 2013; Z. Liu et al., 2025; Medina-Martinez et al., 2022a).

En años posteriores, la investigación avanzó hacia la evaluación sistemática de diferentes fibras naturales y su comportamiento dentro de distintos tipos de suelos. Trabajos como el de (Devi & Jempen, 2016) confirmaron que la incorporación de fibras de bambú incrementaba la resistencia al corte en arcillas, mientras que (Singh & Bagra, 2007a) demostraron mejoras significativas en CBR cuando se utilizaba fibra de yute en suelos de baja capacidad portante. Estas investigaciones consolidaron la idea de que las fibras naturales podían generar beneficios comparables a estabilizaciones convencionales de uso común en capas de subrasante y rellenos estructurales.

El estudio del refuerzo con fibras también se ha extendido a condiciones ambientales complejas. Investigaciones en regiones con climas fríos, como las realizadas por (B. Liu et al., 2025), mostraron que las fibras de paja permitían mejorar la resistencia a compresión simple incluso después de múltiples ciclos de congelación y descongelación, mientras que (Kravchenko et al., 2018) observaron que la capacidad de carga del suelo reforzado se mantenía relativamente estable frente a esos ciclos térmicos. Estos aportes amplían el entendimiento del desempeño de las fibras bajo condiciones ambientales exigentes y revelan su potencial más allá de contextos convencionales.

De igual forma, estudios recientes han explorado el comportamiento de suelos reforzados con fibras naturales bajo cargas dinámicas o cíclicas. (Zhao et al., 2021)concluyeron que la inclusión de fibras en suelos arenosos aumenta la resistencia cíclica y mejora la estabilidad de terraplenes sometidos a cargas repetitivas, lo que abre posibilidades para su uso en aplicaciones ferroviarias y en mitigación de licuación. Este tipo de resultados evidencia que las fibras naturales no solo incrementan la resistencia estática del suelo, sino que también aportan beneficios en escenarios de carga variable o severa.

Finalmente, investigaciones orientadas a la mejora de suelos expansivos y suelos blandos han resaltado el valor ambiental de las fibras naturales. (Tiwari et al., 2021a) demostraron que la combinación de fibras con subproductos reciclados, como cenizas, mejora la resistencia y durabilidad de suelos expansivos, mientras que (Albadrani, 2025a) mostró que las fibras de paja pueden estabilizar arcillas blandas con reducciones importantes en asentamientos y mejoras en

parámetros de consolidación. Estos estudios refuerzan el potencial sostenible de estas técnicas, al aprovechar residuos agrícolas y minimizar la dependencia de insumos industriales de alta huella ambiental.

1.3. Planteamiento del problema

La mejora de suelos constituye una necesidad frecuente en proyectos viales, urbanos e industriales, especialmente en contextos donde los suelos presentan baja resistencia, alta deformabilidad o condiciones geotécnicas desfavorables. Los métodos tradicionales empleados para este fin como la compactación, el reemplazo de material, la estabilización química y el uso de geosintéticos han demostrado efectividad operativa, pero también poseen limitaciones significativas. Entre ellas destacan el elevado consumo energético, los costos asociados al transporte y procesamiento de materiales industrializados y, particularmente, la considerable huella de carbono generada durante la producción de insumos como la cal y el cemento (Noriega Armas et al., 2022). Este escenario ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles y accesibles, especialmente en países con alta disponibilidad de recursos naturales y residuos agrícolas.

Bajo esta base conceptual, se ratifica que el empleo de fibras como sisal, yute, coco o palma trasciende la simple mejora de la resistencia al corte y el CBR, consolidándose como una estrategia de geotecnia sostenible. El valor de estos refuerzos reside en su capacidad para actuar como elementos discretos que, mediante un mecanismo de puenteo interno, inhiben la propagación de micro fisuras y transforman la falla frágil del suelo en un comportamiento dúctil y tenaz. En este contexto, la investigación no solo recapitula estos beneficios ya documentados, sino que evalúa la variabilidad de su desempeño real para definir criterios de diseño que reduzcan la huella ambiental de los proyectos de infraestructura (Chegenizadeh & Nikraz, 2011; Gowthaman et al., 2018a; Li et al., 2023).

A pesar del potencial demostrado, la transición de estas técnicas hacia la práctica profesional se ve obstaculizada por la heterogeneidad metodológica que impera en la literatura actual. La variabilidad en los parámetros de diseño (longitud, dosificación y tipo de suelo) y la falta de protocolos de ensayo estandarizados impiden la formulación de criterios de diseño universales (Gowthaman et al., 2018a). Esta dispersión, sumada a la incertidumbre sobre la

integridad estructural a largo plazo frente a la degradación biológica, justifica la necesidad de una revisión sistemática que consolide la evidencia disponible (Albadrani, 2025b; Zhang et al., 2021b). Bajo este escenario, el presente trabajo se propone mitigar dicha ambigüedad técnica, estableciendo una base sólida para la futura estandarización de estos métodos no tradicionales.

Esta heterogeneidad de resultados y enfoques metodológicos ha generado una brecha entre la evidencia científica disponible y su aplicación en la ingeniería práctica. Pese al creciente número de estudios, no existe una revisión crítica y estructurada que integre la información dispersa, evalúe el desempeño geotécnico de estas técnicas en comparación con métodos tradicionales y determine en qué condiciones las fibras naturales representan una alternativa técnica y sostenible viable. Esta carencia limita la capacidad de los ingenieros para tomar decisiones fundamentadas y retrasa la incorporación de soluciones de bajo impacto ambiental en proyectos de infraestructura (Alqawasmeh et al., 2023; Kara, 2025; Rocio Hernández et al., 2015).

Dado este escenario, surge la necesidad de una investigación que sistematice, analice y compare la evidencia disponible, identificando patrones de comportamiento, rangos óptimos de diseño, limitaciones y oportunidades de aplicación. Una revisión rigurosa permitirá clarificar el estado actual del conocimiento, aportar criterios preliminares de selección y uso de fibras naturales, y establecer una base científica sólida para fomentar su implementación en la práctica geotécnica contemporánea.

1.4. Formulación del problema

¿En qué medida la literatura científica valida el uso de fibras naturales como una alternativa técnica y sostenible frente a la estabilización de suelos convencional?

1.5. Justificación

La mejora de suelos es un componente fundamental de la ingeniería geotécnica, especialmente en Ecuador, donde la presencia de arcillas de alta plasticidad y baja reactividad química limita la eficacia de estabilizantes convencionales como la cal. Frente a este escenario, las fibras naturales surgen como un recurso local y renovable cuya capacidad para optimizar la integridad estructural y la respuesta tenso-deformacional del terreno ha sido ratificada en la literatura técnica. Su inclusión no solo permite alcanzar un desempeño mecánico competitivo

mediante mecanismos de puenteo interfacial, sino que se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible al reducir la dependencia de materiales de alta huella de carbono.

A pesar de su potencial, la aplicación de fibras naturales en la práctica geotécnica continúa siendo limitada debido a la dispersión de la información y a la ausencia de criterios consolidados para su selección, dosificación y diseño. La literatura disponible presenta variaciones significativas en métodos de ensayo, tipos de fibra y condiciones de suelo, lo que dificulta establecer lineamientos claros para su uso. En este contexto, la presente investigación adquiere relevancia al integrar y analizar de manera crítica la evidencia existente, con el fin de identificar patrones de comportamiento, rangos óptimos de diseño y limitaciones técnicas. Al hacerlo, se generan aportes útiles tanto para la práctica profesional como para futuras líneas de investigación orientadas a mejorar la durabilidad, estandarización de ensayos y criterios preliminares de diseño de suelos reforzados con fibras naturales.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Sistematizar de manera crítica la evidencia científica sobre el refuerzo de suelos con fibras naturales mediante el análisis de efectos mecánicos reportados en la literatura, para establecer su eficacia técnica y grado de sostenibilidad frente a los métodos de estabilización convencionales.

1.6.2. Objetivos Específicos

A. Identificar los tipos de fibras naturales utilizadas en la mejora de suelos y describir sus principales propiedades geotécnicas relevantes.

B. Clasificar la literatura científica seleccionada según su origen geográfico, tipología de estudio, año de publicación y alcance investigativo, identificando las tendencias actuales en el uso de fibras naturales para geotecnia.

C. Desarrollar una matriz comparativa de datos que sistematice los efectos de la incorporación de fibras naturales en las propiedades mecánicas del suelo, contrastando los parámetros óptimos de dosificación de fibras que se ha reportado.

D. Determinar las limitaciones técnicas, desafíos de durabilidad y condiciones que afectan el desempeño de las fibras naturales en suelos.

E. Determinar las limitaciones técnicas y los desafíos de durabilidad vinculados a la degradación biológica y la naturaleza hidrofílica de las fibras, analizando las condiciones que restringen su aplicación a largo plazo.

1.7. Hipótesis

La evaluación crítica de la evidencia científica sistematizada valida la viabilidad del refuerzo con fibras naturales, demostrando que la mejora de la respuesta geomecánica del suelo es consistente con la aplicación de los parámetros óptimos reportados en la literatura y que el método ofrece una superioridad ambiental cuantificable frente a la estabilización convencional.

1.7.1. Variables independientes

Corresponde a la incorporación de fibras naturales en la matriz del suelo con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas. Esta variable se caracteriza por parámetros que determinan su desempeño dentro del suelo, tales como:

- Tipo de fibra natural
- Longitud de la fibra
- Contenido de fibra
- Relación de aspecto

1.7.2. Variables dependientes

Corresponden a los parámetros del suelo que resultan afectados cuando se incorpora la fibra. En este estudio se consideran las propiedades mecánicas más reportadas en la literatura:

- Resistencia al corte
- Resistencia a compresión simple

- CBR (California Bearing Ratio)
- Ductilidad y comportamiento post-pico

CAPÍTULO II

2. Marco Teórico

2.1. Fibras naturales

Las fibras naturales utilizadas en geotecnia son materiales de origen vegetal incorporados al suelo de manera aleatoria o distribuida, con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas mediante mecanismos de fricción, adherencia y puenteo interno. Están compuestas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, componentes que les confieren resistencia a tracción, flexibilidad y una textura superficial favorable para interactuar con la matriz del suelo. De acuerdo con (Gowthaman et al., 2018b), estas fibras pueden provenir de plantas como sisal, yute, coco, bambú, paja de arroz o palma, y se caracterizan por ser biodegradables, renovables y ampliamente disponibles en regiones agrícolas. Investigaciones como la de (Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023) señalan que el desempeño del refuerzo depende directamente de la fricción y adhesión en la interfaz suelo y fibra. Estas fibras operan como elementos discretos que generan un mecanismo de puenteo interno, el cual modifica significativamente la integridad estructural del suelo al absorber tensiones y prevenir la propagación de grietas ante cargas externas."

2.1.1. Tipos de fibras naturales usadas en suelos

Las fibras naturales empleadas en geotecnia provienen principalmente de tejidos lignocelulósicos de origen vegetal y se seleccionan por su resistencia a tracción, disponibilidad local y bajo costo.

Tabla 1.

Tipos de fibras naturales utilizados en mejora de suelos

Tipo de fibra natural	Origen	Características relevantes	Fuente
Yute	Planta Corchorus spp.	Alta resistencia a tracción, buena rugosidad, biodegradable	(Singh & Bagra, 2007a)
Sisal	Hojas de Agave sisalana	Elevada rigidez, alta celulosa, buena adherencia	(Medina-Martinez et al., 2022b)

Tipo de fibra natural	Origen	Características relevantes	Fuente
Coco	Cáscara de fruto de Cocos nucifera	Alta durabilidad relativa, buena absorción de energía	(Medina-Martinez et al., 2022b)
Paja de arroz	Residuo agrícola	Muy ligera, flexible, biodegradable	(Albadrani, 2025a)
Palma	Residuos de palma datilera o africana	Buena resistencia al corte, textura rugosa	(Marandi et al., 2008)
Bambú picado	Tallo de Bambusoideae	Alta resistencia y rigidez, fibras largas	(Devi & Jempen, 2016)
Fibras lignocelulósicas forestales	Residuos de madera y corteza	Buena adherencia, control de fisuración por desecación	(B. Yang & Jin, 2024, 2024b)

Nota. Esta tabla categoriza las fibras según su origen botánico y rasgos distintivos, facilitando la identificación de materiales con potencial geotécnico según su disponibilidad regional y resistencia intrínseca – Elaborado por Rosero, 2026

2.1.2. Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas y mecánicas de las fibras naturales determinan su comportamiento dentro de la matriz del suelo y condicionan la eficiencia del refuerzo

Tabla 2.

Propiedades físicas y mecánicas de suelos inherentes a las fibras naturales

Propiedad	Descripción	Relevancia geotécnica	Fuente
Resistencia a tracción	Capacidad de la fibra para soportar esfuerzos de tensión sin romperse.	Permite el efecto de puenteo; incrementa la resistencia al corte y la capacidad post-pico.	(Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023)
Rugosidad superficial	Textura y microaspereza de la superficie de la fibra.	Mejora la fricción y el anclaje con partículas del suelo.	(Evangelou et al., 2023)
Módulo de elasticidad	Capacidad de la fibra para deformarse sin fracturarse.	Aumenta la ductilidad del suelo reforzado y reduce fallas frágiles.	(Reza Tabakouei et al., 2022)
Absorción de agua	Cantidad de humedad que puede retener la fibra.	Influye en la durabilidad y en la interacción suelo–fibra, sobre todo en suelos finos.	(Kafodya & Okonta, 2018)

Propiedad	Descripción	Relevancia geotécnica	Fuente
Relación de aspecto (L/d)	Relación entre longitud y diámetro de la fibra.	Controla el anclaje y la eficiencia del refuerzo; valores altos mejoran la resistencia.	(Kafodya & Okonta, 2018)
Densidad	Masa por unidad de volumen de la fibra.	Afecta la mezcla, la distribución en el suelo y la trabajabilidad.	(Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023)
Durabilidad / Resistencia a degradación	Capacidad de la fibra para mantener sus propiedades con el tiempo.	Determina la vida útil del refuerzo, especialmente en ambientes húmedos o agresivos.	(H. Yang et al., 2023)

Nota. Se detallan las propiedades de las fibras que condicionan su interacción con la matriz del suelo, subrayando parámetros críticos como la relación de aspecto y la resistencia a la tracción – Elaborado por Rosero, 2026

2.1.3. Ventajas y limitaciones frente a fibras sintéticas

Las fibras naturales ofrecen ventajas claras frente a las fibras sintéticas debido a su bajo impacto ambiental, disponibilidad local y compatibilidad con prácticas de geotecnia sostenible. Su origen vegetal y su estructura lignocelulósica favorecen la fricción y el anclaje dentro del suelo, mejorando la resistencia al corte y la ductilidad (Reza Tabakouei et al., 2022). Además, al provenir de residuos agrícolas, permiten reducir costos y evitar el uso de materiales industrializados con alta huella de carbono, elemento destacado en estudios recientes sobre alternativas sostenibles para estabilización de suelos (Nguyen & Indraratna, 2023b).

No obstante, sus limitaciones están asociadas a su naturaleza biológica. Las fibras naturales presentan variabilidad en composición y dimensiones, lo que dificulta la estandarización de su uso, y son susceptibles a degradación química y biológica, especialmente en ambientes húmedos o agresivos (B. Yang & Jin, 2024b). Por el contrario, las fibras sintéticas mantienen mayor durabilidad y uniformidad, lo que explica su predominancia en aplicaciones críticas pese a su mayor impacto ambiental (Yazici & Keskín, 2021). En conjunto, la elección entre fibras naturales y sintéticas depende del equilibrio entre sostenibilidad, desempeño mecánico requerido y condiciones de servicio del proyecto.

2.2. Interacción suelo – fibra

La interacción entre el suelo y las fibras constituye el mecanismo fundamental para la mejora del material. En condiciones saturadas y no drenadas, donde la resistencia está influenciada por la presión de poros, las fibras actúan mediante la movilización de su capacidad a la tracción ante la deformación de la matriz. Este refuerzo no depende exclusivamente de la fricción intergranular, sino que opera como una malla estructural que desarrolla adhesión interfacial y enclavamiento mecánico con las partículas. A través de un efecto de puenteo interno, la fibra restringe el desplazamiento de los granos y redistribuye los esfuerzos, lo que permite controlar la formación de fisuras internas e incrementar la estabilidad post-pico incluso ante incrementos en la presión de poros (Kannan & Sujatha, 2023).

La eficiencia de esta interacción depende directamente de las propiedades del suelo y de la fibra. En suelos finos, la presencia de arcillas favorece la adherencia y confinamiento de la fibra, mientras que en suelos arenosos la mejora se asocia al incremento de la fricción interna y la resistencia cíclica bajo cargas repetidas (Zhao et al., 2021). La rugosidad superficial, la longitud y la relación de aspecto de la fibra determinan su capacidad de anclaje; fibras más largas o rugosas desarrollan mayor resistencia por fricción, aunque pueden dificultar la mezcla si se exceden ciertos valores (Reza Tabakouei et al., 2022). Por otro lado, factores ambientales como la humedad y los ciclos térmicos influyen en la interacción, afectando tanto las condiciones de contacto como la durabilidad de la fibra (Cheng et al., 2021). En conjunto, el comportamiento suelo–fibra resulta de un equilibrio entre las características del material, la condición del suelo y la configuración del refuerzo utilizada.

2.2.1. Mecanismo de refuerzo

La incorporación de fibras naturales actúa como un refuerzo discreto que, al tensarse ante el esfuerzo, activa un mecanismo de puenteo interno que inhibe el crecimiento de grietas y preserva la integridad estructural del terreno. Este comportamiento, documentado experimentalmente por (Evangelou et al., 2023) demuestra que las fibras movilizan una resistencia adicional en ensayos triaxiales, compensando la deficiencia tensil del suelo mediante la transferencia de tensiones entre zonas críticas. El resultado es una mejora significativa en la estabilidad post-pico, especialmente en matrices cohesivas propensas al agrietamiento(Nezhad et al., 2021).

Adicionalmente, la presencia de fibras mejora la ductilidad del conjunto, ya que estas actúan como elementos capaces de deformarse sin fracturarse, permitiendo un comportamiento post-pico más estable. En esta zona plástica, mientras el contacto partícula a partícula se debilita por el desplazamiento, los esfuerzos son asumidos primordialmente por las fibras, las cuales movilizan su capacidad a la tracción mediante un mecanismo de puenteo interno que 'cose' los planos de falla (Bordoloi et al., 2018). Investigaciones como la de (Tiwari et al., 2021a) muestran que las fibras mantienen unido el suelo incluso después de alcanzar la resistencia máxima, reduciendo la posibilidad de fallas frágiles y otorgándole un desempeño más progresivo. Este conjunto de mecanismos convierte a las fibras naturales en elementos de refuerzo efectivos, especialmente en suelos con tendencia a agrietamiento o en aplicaciones que requieren control de deformaciones.

2.2.2. Influencia del tipo de suelo

El desempeño del refuerzo depende críticamente de la matriz receptora, ya que la interacción suelo–fibra es gobernada por la configuración microestructural del material. En términos de granulometría, la evidencia científica señala que los suelos de grano fino (limos y arenas finas) desarrollan una mayor fuerza de adherencia que los suelos gruesos, debido al incremento del área de contacto efectiva y a un entrelazamiento mecánico más denso. Respecto a la plasticidad, los efectos de mejora son más estables en suelos de plasticidad baja a media; por el contrario, en arcillas de alta plasticidad, los ciclos de expansión y contracción generan micro vacíos en la interfase que reducen la fricción superficial y debilitan el anclaje del refuerzo."

Tabla 3.

Influencia del tipo de suelo en mecanismo de refuerzo de suelos

Tipo de suelo	Mecanismo dominante	Efectos principales del refuerzo	Fuente
Suelos cohesivos (arcillas)	Adhesión y confinamiento de la fibra dentro de la matriz fina	Incremento de resistencia al corte y compresión; mayor ductilidad; control de fisuración por retracción	(Shen et al., 2021)
Suelos arenosos	Fricción interna y restricción del movimiento de partículas	Mayor resistencia al corte; mejora del comportamiento	(Zhao et al., 2021)

		cíclico; reducción del potencial de licuación	
Suelos expansivos	Puenteo interno y restricción de apertura de grietas	Disminución de fisuración por desecación; mayor estabilidad volumétrica; aumento de ductilidad	(Medina-Martinez et al., 2022b)
Suelos blandos o compresibles	Incremento de rigidez y redistribución de esfuerzos	Mejora de resistencia uniaxial; reducción de asentamientos; aumento de rigidez inicial	(Albadrani, 2025a)

Nota. La tabla sintetiza cómo la granulometría y plasticidad del suelo determinan si el refuerzo actúa mediante adhesión (en arcillas) o mediante fricción interna y restricción de movimiento (en arenas) – Elaborado por Rosero, 2026

2.2.3. Influencia de la humedad, succión y estructura del suelo

La humedad y la succión del suelo influyen directamente en la interacción suelo–fibra y en la eficiencia del refuerzo. En suelos finos, la humedad controla el espesor de la película de agua alrededor de las partículas y modifica la adherencia entre el suelo y la fibra. Según (C. Liu et al., 2020), un aumento de humedad reduce la resistencia no drenada del suelo reforzado, pero al mismo tiempo permite una mejor redistribución de tensiones, especialmente cuando la fibra posee alta capacidad de absorción. En suelos parcialmente saturados, la presencia de succión matricial aumenta la rigidez inicial del sistema y mejora la capacidad de anclaje, ya que la succión contribuye a "tensar" el contacto entre fibra y matriz arcillosa. Este efecto es especialmente relevante en suelos con plasticidades medias y altas. La estructura del suelo, entendida como la disposición y organización de sus partículas, también condiciona la respuesta del refuerzo. Suelos con estructura agregada o bloques definidos como algunas arcillas tropicales o limos cementados generan mejores condiciones de anclaje, mientras que suelos dispersos o altamente remoldados presentan menor fricción interna y mayores dificultades para movilizar resistencia. Investigaciones como las de (Evangelou et al., 2023) evidencian que el efecto del refuerzo con fibras naturales depende de la estructura del suelo. En suelos remoldeados, las fibras contribuyen principalmente al control de la fisuración y a mejorar la ductilidad, mientras que en suelos con estructura natural favorecen una mayor movilización de la resistencia al corte.

Por otra parte, ciclos de humedad–secado pueden modificar tanto la estructura del suelo como las propiedades superficiales de la fibra. En suelos arcillosos expansivos, (Medina-Martinez et al., 2022b) demostraron que las fibras reducen la severidad de las fisuras generadas durante el secado, actuando como puentes que limitan la apertura de grietas.

La durabilidad de este refuerzo está condicionada por la naturaleza lignocelulósica de las fibras, cuya higroscopicidad en ambientes saturados acelera la biodegradación de la celulosa y hemicelulosa por acción microbiana (Gowthaman et al., 2018a; Kumar et al., 2022). Esta pérdida de integridad estructural reduce la capacidad de las fibras para movilizar esfuerzos de tracción en la matriz (Yixian et al., 2016). Complementariamente, factores climáticos extremos como los ciclos de congelación y descongelación inducen un deterioro microestructural en la superficie del refuerzo; según Kravchenko et al. (2018), este fenómeno debilita el vínculo en la interfaz suelo-fibra, comprometiendo la resistencia cíclica y la estabilidad a largo plazo del terreno mejorado (Ak et al., 2020; Z. Liu et al., 2025; Tiwari et al., 2021b)

2.2.4. Anisotropía y orientación

La orientación de las fibras dentro del suelo influye de manera determinante en su comportamiento mecánico, ya que controla la dirección en la que se moviliza el refuerzo. A diferencia de los geosintéticos o refuerzos continuos, las fibras naturales se incorporan de forma dispersa y aleatoria, lo que genera un refuerzo tridimensional que contribuye a la isotropía del material compuesto. Sin embargo, estudios han demostrado que tanto la orientación accidental durante la mezcla como la anisotropía inherente a algunas fibras pueden influir en la eficiencia del refuerzo. Según (Iravanian & Haider, 2020), fibras orientadas preferentemente en una dirección tienden a mejorar la resistencia en ese plano, pero reducen su contribución en direcciones ortogonales, lo que puede afectar el comportamiento global.

La anisotropía también está vinculada a la geometría y estructura interna de la fibra. Fibras vegetales con secciones irregulares, como las de coco o sisal, tienden a generar múltiples puntos de contacto y orientación aleatoria, lo que favorece un refuerzo más uniforme. En contraste, fibras más lisas o con menor rugosidad tienen mayor probabilidad de alinearse, disminuyendo la interacción multiaxial. Estudios de (Reza Tabakouei et al., 2022) destacan que la relación de

aspecto elevada puede aumentar la probabilidad de orientación preferencial si no se controla adecuadamente la mezcla, afectando la isotropía del compuesto suelo–fibra.

2.3. Parámetros clave del refuerzo con fibras naturales

El desempeño del suelo reforzado con fibras naturales depende en gran medida de los parámetros mostrados a continuación. Estos factores controlan la interacción mecánica entre el suelo y la fibra, el grado de anclaje que puede desarrollarse y la distribución del refuerzo dentro de la mezcla. La evidencia científica coincide en que estos parámetros no pueden seleccionarse de manera arbitraria, ya que pequeñas variaciones pueden generar mejoras significativas o, por el contrario, reducir la eficiencia del refuerzo.

Tabla 4.

Parámetros clave del refuerzo con fibras naturales

Parámetro	Descripción	Efecto geotécnico principal	Relevancia técnica
Longitud de fibra	Dimensión individual de cada fibra, usualmente entre 10–30 mm para mezclas eficientes.	Controla el puenteo interno y la transferencia de esfuerzos.	Longitudes adecuadas aumentan la resistencia al corte y la estabilidad post-pico.
Relación de aspecto (L/d)	Proporción entre longitud y diámetro de la fibra; define su capacidad de anclaje.	Mayor fricción y anclaje mecánico dentro del suelo.	Valores altos mejoran resistencia, pero excesos generan problemas de mezclado.
Contenido de fibra	Cantidad de fibra añadida al suelo, normalmente entre 0,3 %–1,5 % en peso seco.	Incrementa resistencia, CBR y ductilidad.	Contenidos excesivos reducen compactación y generan aglomeraciones.
Distribución y dispersión	Homogeneidad con la que se distribuyen las fibras en la mezcla suelo–fibra.	Asegura refuerzo tridimensional uniforme y evita zonas débiles.	Distribución deficiente reduce fricción interna y puede provocar anisotropía.
Tamaño de partícula del suelo	Relación entre granulometría del suelo y el anclaje de la fibra.	Influye en adherencia, confinamiento y fricción movilizada.	Suelos finos ofrecen mayor adherencia; suelos arenosos dependen más de fricción interna.

Nota. Presenta las variables de diseño fundamentales, como la dosificación y longitud de la fibra, cuya optimización es esencial para evitar aglomeraciones y maximizar la eficiencia mecánica del compuesto – Referencia: k(Gowthaman et al., 2018b; Kafodya & Okonta, 2018; Nezhad et al., 2021; Reza Tabakouei et al., 2022; Singh & Bagra, 2007a) - Elaborado por Rosero, 2026

2.4. Efectos del refuerzo con fibras naturales en el comportamiento del suelo

El refuerzo con fibras naturales mejora el comportamiento mecánico del suelo mediante la interacción entre las partículas y las fibras, basada en mecanismos de fricción, adhesión y efecto de puenteo, lo que incrementa la capacidad del suelo para resistir esfuerzos y controlar la propagación de fisuras. Además, constituye una alternativa sostenible frente a los métodos tradicionales de estabilización, debido al uso de materiales renovables y de bajo impacto ambiental. A continuación, se presentan los principales efectos del refuerzo con fibras naturales sobre el comportamiento del suelo.

Tabla 5.

Efectos del refuerzo con fibras naturales en el comportamiento del suelo

Efecto	Descripción del comportamiento	Resultado geotécnico principal
Resistencia al corte	Las fibras actúan como puentes que incrementan la fricción interna y la cohesión aparente.	Aumento significativo de τ, mayor estabilidad mecánica y resistencia frente a esfuerzos tangenciales.
Resistencia a compresión simple	La fibra limita la propagación de fallas verticales y mejora la resistencia no confinada.	Incremento de q_u y mayor desempeño en suelos blandos o cohesivos.
CBR	La presencia de fibras mejora la capacidad de soporte mediante refuerzo distribuido.	Mayor soporte para subrasantes viales y capas estructurales.
Ductilidad y comportamiento post-pico	Las fibras permiten una deformación progresiva tras el pico de resistencia.	Mayor tenacidad, reducción de fallas frágiles y mejor comportamiento post-pico.
Control de agrietamiento por desecación	Las fibras limitan la apertura y profundidad de grietas en suelos finos.	Reducción de fisuración, mayor estabilidad volumétrica en climas áridos.
Comportamiento dinámico	Las fibras restringen el movimiento de partículas bajo cargas repetitivas.	Mejora de resistencia cíclica, reducción del potencial de licuación y mayor estabilidad en terraplenes.

Nota. Resume las mejoras alcanzadas tras la incorporación de fibras, destacando el incremento en la capacidad de soporte (CBR) y la transición hacia un comportamiento dúctil y tenaz en la etapa post-pico Referencia: k(Abood & Shakir, 2023; Albadrani, 2025a; Kafodya & Okonta, 2018; Kravchenko et al., 2018; Marandi et al., 2008; Nezhad et al., 2021; Reza Tabakouei et al., 2022; Shen et al., 2021; Singh & Bagra, 2007a; Tiwari et al., 2021a; B. Yang & Jin, 2024b; Zhao et al., 2021) – Elaborado por Rosero, 2026

2.5. Factores que afectan el desempeño del suelo reforzado con fibras

El comportamiento del suelo reforzado con fibras naturales no depende únicamente de las propiedades de la fibra o de los parámetros de diseño, sino también de una serie de factores externos e intrínsecos que condicionan su eficiencia. Entre estos destacan la durabilidad y biodegradación de la fibra, las condiciones ambientales, la variabilidad de la fibra, y el tipo y estructura del suelo donde es incorporada.

Tabla 6.

Factores que afectan el desempeño del suelo reforzado con fibras

Factor	Descripción / Influencia	Efecto geotécnico principal
Durabilidad y biodegradación	Las fibras pueden deteriorarse por humedad, pH, microorganismos y temperatura.	Reducción del anclaje y pérdida gradual de resistencia.
Condiciones ambientales	La humedad modifica la rigidez de la fibra; ciclos humedad–secado y térmicos afectan su integridad.	Cambios en q_u, resistencia al corte y estabilidad volumétrica.
Variabilidad natural de las fibras	Variaciones en longitud, rugosidad, composición y rigidez incluso dentro del mismo tipo vegetal.	Resultados inconsistentes y menor reproducibilidad del refuerzo.
Tipo y estructura del suelo	La adhesión domina en arcillas; la fricción en arenas. La estructura natural logra mejores resultados que suelos remoldeados.	Incrementos variables en resistencia y ductilidad según el suelo.
Métodos de mezclado y dispersión	Distribución no uniforme genera aglomeraciones y anisotropía.	Disminución del refuerzo y pérdida de uniformidad en el comportamiento.

Nota. Identifica variables externas e intrínsecas, como la biodegradación y los métodos de mezclado, que pueden condicionar la durabilidad y la uniformidad del refuerzo en aplicaciones reales – Referencia: k(Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023; C. Liu et al., 2020; Reza Tabakouei et al., 2022; Shen et al., 2021; B. Yang & Jin, 2024b; Zhao et al., 2021) – Elaborado por Rosero, 2026

2.6. Aspectos de sostenibilidad y gestión de recursos

La integración de fibras naturales en la ingeniería geotécnica responde a la creciente necesidad global de adoptar materiales con un bajo impacto geoambiental y asegurar la

sostenibilidad para las generaciones futuras. Frente a los métodos tradicionales de estabilización química que emplean cemento, cal o asfalto, cuya producción a gran escala conlleva un elevado consumo energético y degradación ambiental, las fibras naturales emergen como una alternativa renovable, biodegradable y de bajo costo (Gowthaman et al., 2018a; Z. Liu et al., 2025).

2.6.1. Reducción de huella de carbono y aprovechamiento de residuos agrícolas

Una de las ventajas competitivas más críticas de las fibras vegetales es su reducida energía incorporada. Mientras que las fibras sintéticas industriales (como el carbono o el Kevlar) requieren entre 25 y 130 GJ por tonelada, las fibras de origen vegetal consumen únicamente 4 GJ por tonelada (Gowthaman et al., 2018a; Nguyen & Indraratna, 2023a).

En términos de emisiones, la industria del cemento es responsable de aproximadamente el 6% de las emisiones globales de CO_2, generando cerca de 0.8 toneladas de CO_2 por cada tonelada producida. Por el contrario, las fibras naturales, como el yute, presentan una emisión de gases de efecto invernadero negativa, ya que las plantas absorben CO_2 durante su crecimiento, actuando como sumideros de carbono y devolviendo oxígeno al entorno (Bawadi et al., 2020; Z. Liu et al., 2025; Md Zahri & Zainorabidin, 2019; Singh & Bagra, 2007b).

El uso de estas fibras fomenta un modelo de economía circular al valorizar residuos y subproductos de procesos agrícolas que, de otro modo, se quemarían o acumularían en vertederos, generando riesgos de contaminación. Se ha demostrado la eficacia de diversos residuos para este fin:

A. Bagazo de caña de azúcar:

Residuo de la industria azucarera con alto potencial para estabilizar suelos expansivos.

B. Paja y cascarilla de arroz:

Residuos abundantes en Asia y Ecuador que mejoran la resistencia mecánica y la ductilidad.

C. Fibra de coco (Coir):

Subproducto de la cáscara del coco, valorado por su alta durabilidad debido a su contenido de lignina (35-45%).

D. Residuos invasivos:

El uso de especies como el jacinto de agua añade valor ambiental al impedir la propagación de estas especies dañinas para los ecosistemas hídricos.

2.6.2. Costos, disponibilidad local e impacto ambiental-social

La adopción de fibras naturales en la geotecnia no solo responde a criterios de eficiencia mecánica, sino que constituye una estrategia integral para abordar desafíos económicos, ambientales y sociales, especialmente en países en vías de desarrollo.

El uso de fibras naturales representa una alternativa altamente competitiva frente a los geosintéticos y estabilizantes convencionales. Se estima que las fibras de origen vegetal tienen un costo que oscila entre 200 y 1000 USD por tonelada, cifra significativamente inferior a los 12,500 USD de la fibra de carbono o los 75,000 USD de la fibra de Kevlar (Gowthaman et al., 2018a; Nguyen & Indraratna, 2023a). En proyectos de estabilización de suelos blandos, el uso de fibras como las de paja de arroz puede reducir los costos de construcción entre un 20% y 35% en comparación con los métodos tradicionales de cemento y cal (Albadrani, 2025b). Esta ventaja económica se fundamenta en que las fibras pueden recolectarse localmente y mezclarse in situ sin necesidad de procesamientos industriales complejos h(Albadrani, 2025b; Sharma et al., 2015).

Por otra parte, la disponibilidad de estos materiales es prácticamente ilimitada en regiones agrícolas. La literatura clasifica las fibras según su origen en:

A. Especies de cultivo:

Subproductos como el bagazo de caña, paja de arroz, coco, palma entre otros.

B. Especies no cultivadas:

Plantas silvestres como el yute, sisal y cáñamo.

C. Especies invasoras:

Plantas como el jacinto de agua, cuya extracción para refuerzo de suelos ayuda a controlar su propagación dañina en ecosistemas hídricos.

En contextos como el de Ecuador, la agroindustria genera anualmente cerca de 2.2 millones de toneladas de residuos lignocelulósicos (arroz, caña, banano), lo que garantiza un suministro constante de materia prima para la infraestructura local (Bordoloi et al., 2015; Gowthaman et al., 2018a; Z. Liu et al., 2025; Macías-Párraga et al., 2025; Medina-Martinez et al., 2022a).

Por otro lado, desde la perspectiva geoambiental, las fibras naturales ofrecen ventajas críticas como las que se describen a continuación:

A. Baja energía incorporada:

La producción de fibras naturales consume un promedio de 4 GJ por tonelada, mientras que las fibras sintéticas requieren hasta 130 GJ por tonelada (Li et al., 2023; Nguyen & Indraratna, 2023a).

B. Huella de carbono:

A diferencia del cemento cuya producción genera aproximadamente 0.8 toneladas de CO_2 por cada tonelada producida, las plantas utilizadas para fibras absorben CO_2 durante su crecimiento, actuando como sumideros de carbono y resultando en una emisión neta negativa (Bawadi et al., 2020; Z. Liu et al., 2025; Singh & Bagra, 2007b).

C. Biodegradabilidad:

Al ser biodegradables, no generan la contaminación por microplásticos asociada a los geosintéticos poliméricos al final de su vida útil. Además, al descomponerse, pueden aportar nutrientes al suelo, favoreciendo la revegetación permanente de taludes (Nguyen & Indraratna, 2023a).

La implementación de esta tecnología fomenta la creación de empleo en zonas rurales, ya que las actividades de recolección y procesamiento primario de las fibras requieren mano de obra

local. Esto permite que comunidades de bajos ingresos mejoren sus economías mediante el suministro de materiales para proyectos de infraestructura regional.

2.7. Aplicaciones geotécnicas de las fibras naturales

El refuerzo con fibras naturales ha demostrado ser una alternativa viable en diversas aplicaciones geotécnicas donde se requiere mejorar la resistencia, la ductilidad o el control de deformaciones del suelo.

Tabla 7.

Aplicaciones geotécnicas de las fibras naturales

Aplicación geotécnica	Objetivo del refuerzo	Beneficios principales
Subrasantes viales	Aumentar capacidad de soporte y mejorar comportamiento bajo cargas repetitivas.	Incremento del CBR, reducción de deformaciones, mayor estabilidad inicial.
Suelos expansivos	Controlar agrietamiento por desecación y mejorar estabilidad volumétrica.	Reducción de fisuración, mayor ductilidad, menor variación volumétrica.
Terraplenes ferroviarios (cargas dinámicas)	Aumentar resistencia cíclica y reducir movilidad de partículas bajo carga dinámica.	Menor potencial de licuación, mayor resistencia dinámica, mejor comportamiento vibratorio.

Nota. Describe los escenarios prácticos donde el uso de fibras ofrece beneficios específicos, desde el control de agrietamiento en suelos expansivos hasta la mejora de la resistencia cíclica en terraplenes Referencia: k(Medina-Martinez et al., 2022b; Singh & Bagra, 2007a; Zhao et al., 2021) - Elaborado por Rosero, 2026

La viabilidad de estas aplicaciones ha sido validada en múltiples escenarios globales, a continuación, se presentan algunas aplicaciones:

A. Estabilización de taludes y control de erosión

Diversos proyectos desarrollados en Filipinas, México (Chihuahua) y Vietnam han demostrado la eficacia de las fibras de coco, biomantas vegetales y geotextiles de yute para el control de la erosión superficial, la estabilización de taludes y la prevención de deslizamientos, incluso en taludes de gran altura y en infraestructuras viales (Albadrani, 2025b; Nguyen & Indraratna, 2023a).

B. Infraestructura vial

En India y el Reino Unido, el empleo de fibras naturales como material de refuerzo ha permitido mejorar el desempeño de subrasantes en carreteras de bajo volumen de tránsito, constituyendo una alternativa eficiente a los estabilizantes químicos tradicionales y reduciendo los costos de construcción (Albadrani, 2025b; Gowthaman et al., 2018a; Z. Liu et al., 2025).

C. Cimentaciones y vivienda de bajo costo

Investigaciones desarrolladas en Malasia, Ghana y Nigeria evidencian que el uso de fibras naturales y ceniza de cáscara de maní mejora las propiedades de arcillas marinas blandas y otros suelos de baja capacidad portante, favoreciendo la construcción de cimentaciones económicas para viviendas de bajo costo (Albadrani, 2025b).

D. Restauración de suelos en Ecuador

Estudios realizados en las provincias de Manabí y Guayas han demostrado que la incorporación de ceniza de cascarilla de arroz y fibras de plátano contribuye a la estabilización de suelos arcillosos de alta plasticidad, mitigando los efectos producidos por las variaciones de humedad asociadas al fenómeno de El Niño (Macías-Párraga et al., 2025).

E. Consolidación de suelos en el Sudeste Asiático (India, Indonesia y Malasia)

En países del Sudeste Asiático, el uso de drenes de yute ha sido ampliamente implementado para acelerar la consolidación de suelos blandos y mejorar el desempeño de carreteras rurales de bajo volumen de tránsito (Gowthaman et al., 2018a).

F. Prevención de deslizamientos en Filipinas

En Filipinas, la combinación de redes de fibra de coco y geotextiles ha sido utilizada exitosamente para la estabilización de taludes y la prevención de deslizamientos, mejorando la resistencia superficial del terreno y favoreciendo el establecimiento de cobertura vegetal (Albadrani, 2025b).

G. Cimentaciones económicas en África (Ghana y Nigeria)

En Ghana y Nigeria, la utilización de ceniza de cáscara de maní y fibras de palma ha permitido mejorar la capacidad portante del suelo en proyectos de vivienda de bajo costo, reduciendo la necesidad de cimentaciones profundas y disminuyendo los costos constructivos (Albadrani, 2025b; Nguyen & Indraratna, 2023a).

H. Infraestructura vial en Vietnam

En Vietnam, la aplicación de geotextiles de yute ha demostrado ser una solución efectiva para el control de erosión y la estabilización de taludes asociados a infraestructura vial, favoreciendo la protección del terreno y la estabilidad de las obras (Nguyen & Indraratna, 2023a).

2.8. Limitaciones, desafíos y vacíos de investigación

A pesar del creciente interés en el uso de fibras naturales como método no tradicional de mejora de suelos, existen limitaciones técnicas y desafíos que aún restringen su adopción generalizada en la práctica geotécnica. Una de las principales limitaciones es la variabilidad inherente de las fibras naturales, ya que su composición química, rigidez, rugosidad y geometría pueden variar incluso dentro de un mismo cultivo o lote. Esta falta de uniformidad dificulta la reproducibilidad de resultados y la formulación de parámetros de diseño consistentes (Ghasemi Nezhad & Tabarsa, 2023).

La durabilidad constituye otro desafío importante. Las fibras naturales pueden degradarse bajo condiciones de humedad elevada, pH extremos o actividad microbiológica, lo que reduce el anclaje suelo–fibra y afecta la vida útil del refuerzo. Investigaciones como las de (Kravchenko et al., 2018; B. Yang & Jin, 2024b) evidencian que ciclos ambientales intensos humedad–secado, congelación–descongelación o variaciones térmicas impactan negativamente la integridad de la fibra.

Asimismo, la ausencia de normativas, estándares y metodologías de diseño específicas limita su inclusión en especificaciones técnicas de obras civiles. La mayoría de los estudios disponibles son experimentales y se enfocan en suelos y fibras concretas, sin extrapolaciones claras para otros tipos de suelo o condiciones de carga. Como resaltan (Yazici & Keskín, 2021), esta falta

de estandarización mantiene a las fibras naturales en una posición experimental más que normativa.

Finalmente, existen desafíos prácticos relacionados con la mezcla y dispersión homogénea de las fibras, especialmente cuando se trabaja con fibras largas o contenidos elevados. Una mezcla deficiente puede generar aglomeraciones, anisotropía no deseada y pérdida de eficiencia del refuerzo (Reza Tabakouei et al., 2022). A esto se suma la percepción técnica conservadora en el sector, donde materiales no tradicionales suelen ser adoptados lentamente pese a sus ventajas.

CAPÍTULO III

3. Marco Metodológico

3.1. Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo–analítico, desarrollado mediante una revisión sistemática de literatura científica indexada. El estudio no contempla experimentación directa ni ensayos de laboratorio, sino el análisis crítico y comparativo de evidencia publicada en bases de datos académicas de alto impacto. Metodológicamente, corresponde a un estudio de tipo:

A. Descriptivo–comparativo.

Identifica y clasifica configuraciones de refuerzo con fibras naturales.

B. Analítico.

Examina relaciones entre variables (parámetros de fibra y comportamiento mecánico).

C. Documental,

Se basa exclusivamente en fuentes científicas indexadas.

El diseño es no experimental y transversal, dado que analiza estudios publicados hasta la presente fecha, sin manipulación directa de variables.

3.2. Diseño metodológico

3.2.1. Búsqueda bibliográfica

La selección de bases de datos como Scopus, Web of Science, SciELO y Redalyc constituye una garantía de excelencia académica al integrar revistas con procesos de revisión por pares externos, lo cual asegura la validez metodológica y el respaldo científico de la información recolectada. Estas plataformas permiten acceder a investigaciones de alto impacto y actualización constante, logrando un equilibrio crítico entre la producción científica global y la relevancia

regional necesaria para abordar problemáticas específicas en suelos locales. Finalmente, el uso de estos repositorios indexados asegura que la búsqueda sea transparente y reproducible, cumpliendo con los estándares de rigor técnico exigidos en las revisiones sistemáticas de vanguardia.

La búsqueda se realizará mediante el uso de palabras clave específicas relacionadas con el tema de estudio, combinadas a través de operadores booleanos para optimizar la precisión de los resultados. Entre las principales expresiones empleadas se incluyen:

- *"Natural fiber reinforced soil"*
- *"Soil improvement using natural fibers"*
- *"Fiber reinforced clay"*
- *"CBR fiber soil"*
- *"Dynamic behavior fiber reinforced sand"*
- *"Expansive soil natural fibers"*

La selección de los estudios se realizará mediante criterios definidos de inclusión y exclusión para asegurar la coherencia y calidad de la evidencia analizada. Se incluirán únicamente artículos indexados en Scopus, Web of Science, Scielo y Redalyc, publicados hasta la presente fecha, que correspondan a estudios experimentales o revisiones sistemáticas y que reporten parámetros mecánicos cuantificables como: resistencia al corte (τ), resistencia no confinada (q_u), CBR o módulo dinámico. Se excluirán trabajos sin revisión por pares, investigaciones sin resultados medibles, estudios enfocados exclusivamente en fibras sintéticas y aquellos que no se encuentren dentro del ámbito geotécnico.

Con el propósito de garantizar transparencia, trazabilidad y rigor metodológico en la selección de los estudios, se estructuró un proceso sistemático de depuración y evaluación de la literatura científica. Dicho procedimiento comprende etapas secuenciales que permiten identificar, filtrar y seleccionar únicamente aquellas investigaciones que cumplen con los criterios previamente establecidos, asegurando coherencia con los objetivos y variables del estudio. A continuación, se presenta el diagrama de flujo que sintetiza gráficamente este proceso.

Figura 1.

Diagrama de flujo de búsqueda bibliográfica



Nota. Este diagrama de flujo sintetiza la metodología de selección y depuración, garantizando que la evidencia analizada cumpla con los criterios de rigor técnico, transparencia y trazabilidad exigidos en la revisión sistemática – Elaborado por Rosero, 2026

3.2.2. Extracción y sistematización de datos

La etapa de extracción y sistematización de datos se orientó a registrar de manera estructurada la información técnica relevante de cada estudio seleccionado, garantizando comparabilidad y consistencia en el análisis. Para ello, se identificarán como variables independientes aquellas relacionadas con las características del refuerzo y del material base, tales como el tipo de fibra empleada, su longitud, la relación de aspecto (L/d), el contenido de fibra expresado en porcentaje, el método de mezclado y el tipo de suelo intervenido.

En cuanto a las variables dependientes, se recopilarán los parámetros mecánicos reportados por cada investigación, entre ellos la resistencia al corte, la resistencia a compresión simple (q_u), el CBR, la ductilidad o comportamiento post-pico, los parámetros dinámicos cuando corresponda y el control de agrietamiento. Esta diferenciación permitirá analizar la influencia directa de las características del refuerzo sobre el desempeño mecánico del suelo.

Toda la información será organizada en matrices comparativas elaboradas en Excel, lo que facilitará la sistematización, el cruce de variables y el análisis cuantitativo posterior, asegurando una evaluación objetiva y técnicamente fundamentada de los resultados.

3.2.3. Metodología de análisis y limitaciones metodológicas

El método de análisis de la presente investigación se fundamenta en un enfoque comparativo estructurado, orientado a interpretar de manera crítica los resultados reportados en la literatura científica seleccionada. A partir de los estudios recopilados, se realizará la comparación de tendencias entre investigaciones, la identificación de rangos óptimos relacionados con la dosificación, longitud y relación de aspecto de las fibras naturales, así como el análisis de la coherencia metodológica empleada en los distintos trabajos experimentales. Asimismo, se evaluarán convergencias y discrepancias en los resultados obtenidos por diferentes autores, con el propósito de identificar patrones de comportamiento, limitaciones metodológicas y posibles brechas de conocimiento que orienten futuras líneas de investigación. Cabe señalar que no se desarrollará un metaanálisis estadístico formal; sin embargo, el análisis mantendrá un enfoque sistemático y técnicamente fundamentado, que permita extraer conclusiones sólidas y comparables sobre el desempeño de las fibras naturales en la mejora de propiedades mecánicas del suelo.

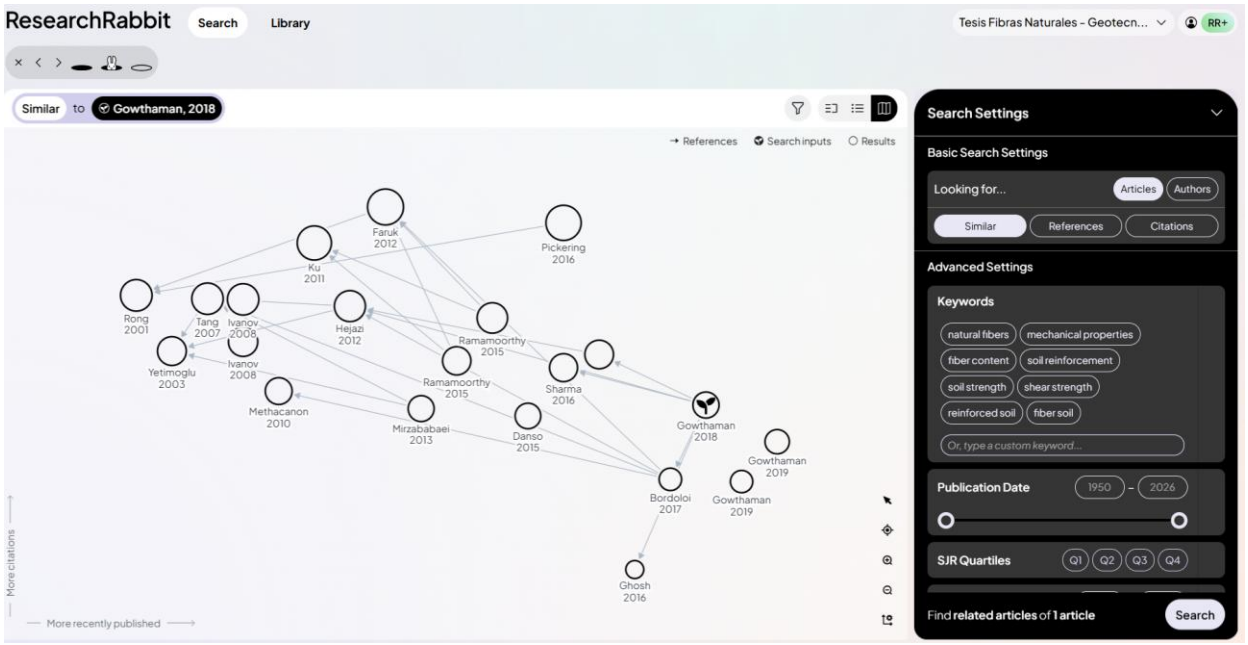
Para la recopilación y organización de la literatura científica se utilizaron bases de datos académicas indexadas, complementadas con herramientas de exploración bibliográfica como Research Rabbit Plus, la cual permitió ampliar la búsqueda mediante el análisis de redes de citación y la identificación de estudios relacionados. El uso de esta herramienta facilitó la localización de artículos relevantes vinculados específicamente con la aplicación de fibras naturales en la estabilización y mejora de propiedades mecánicas de suelos, permitiendo obtener un conjunto de literatura más preciso y representativo del estado actual del conocimiento.

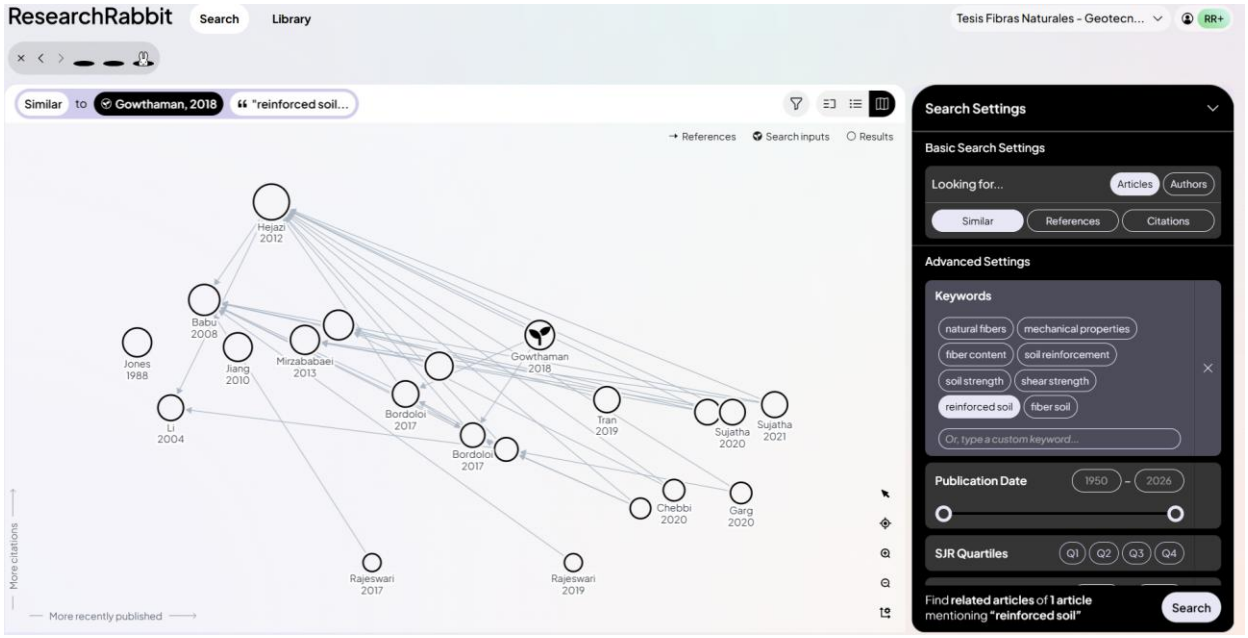
El alcance de la presente investigación se circunscribe al análisis de evidencia científica publicada en literatura académica indexada, por lo que sus resultados dependen directamente del rigor metodológico, la calidad experimental y la consistencia técnica de los estudios seleccionados. En consecuencia, el trabajo no contempla validación experimental propia, ensayos de laboratorio ni estudios de campo, sino que se fundamenta exclusivamente en la revisión sistemática y el análisis crítico de la información disponible. Estas condiciones establecen un marco claro para la

interpretación de los resultados y delimitan el alcance de las conclusiones obtenidas, orientándolas principalmente hacia la síntesis del conocimiento existente y la identificación de tendencias y vacíos de investigación en el uso de fibras naturales en geotecnia. A continuación, se presenta la aplicación del Research Rabbit Plus como herramienta de búsqueda de documentos relevantes para la mejora de suelos usando fibras naturales.

Figura 2.

Aplicación de Research Rabbit Plus





Nota. La utilización de herramientas de exploración bibliográfica permitió identificar redes de citación y artículos clave, optimizando la localización de evidencia representativa sobre el estado actual del conocimiento en fibras naturales aplicadas a la geotecnia – Elaborado por Rosero, 2026 en https://www.researchrabbit.ai/.

3.2.4. Instrumento de calidad metodológica

Con el fin de garantizar el rigor científico de la revisión sistemática y ponderar la solidez de la evidencia analizada, se diseñó un instrumento de evaluación de calidad metodológica aplicable a los estudios seleccionados. Este instrumento permite valorar de manera estructurada la claridad experimental, la coherencia técnica y la validez de los resultados reportados en investigaciones sobre mejora de suelos mediante fibras naturales.

El instrumento fue elaborado considerando criterios comunes en revisiones sistemáticas en ingeniería geotécnica y adaptado a las particularidades de estudios experimentales sobre suelos reforzados con fibras. Su aplicación tiene como propósito:

- Identificar fortalezas y debilidades metodológicas.
- Determinar el nivel de confiabilidad de los resultados reportados.
- Evitar que conclusiones se fundamenten en evidencia de baja calidad.
- Sustentar el análisis comparativo del Capítulo 4.

3.2.4.1. Estructura del instrumento

El instrumento se compone de seis dimensiones de evaluación, las cuales se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 8.

Estructura del instrumento de calidad metodológica:

Parámetro	Aspectos para evaluar	Propósito de evaluación
Caracterización del suelo	Clasificación (SUCS), propiedades básicas, granulometría, condiciones iniciales	Verificar que el material esté correctamente definido y sea replicable
Caracterización de la fibra natural	Tipo, origen, longitud, diámetro o L/d, contenido (%), tratamientos	Confirmar precisión en la definición del refuerzo
Rigor experimental	Tipo de ensayo, control de humedad, compactación, repeticiones, procedimiento	Evaluar confiabilidad y control de variables
Presentación y análisis de resultados	Datos cuantitativos, curvas esfuerzo–deformación, análisis técnico	Determinar claridad y profundidad interpretativa
Discusión crítica y comparación	Contraste con literatura, reconocimiento de limitaciones	Evaluar capacidad analítica y coherencia científica
Durabilidad / sostenibilidad	Evaluación ambiental, ciclos ambientales, comportamiento a largo plazo	Analizar visión integral del desempeño

Nota. Expone las dimensiones evaluadas para determinar el rigor científico de los estudios revisados, garantizando una valoración que abarca desde la caracterización de materiales hasta el análisis técnico – Elaborado por Rosero, 2026

3.2.4.2. Sistema de puntuación del instrumento

Cada dimensión se calificó bajo la siguiente escala, la cual se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 9.

Sistema de puntuación del instrumento de calidad metodológica

Puntaje por dimensión	Descripción del cumplimiento	Rango total acumulado	Nivel de calidad metodológica
0	No cumple el criterio evaluado	0 – 3	Evidencia débil
1	Cumplimiento parcial o insuficiente	4 – 6	Baja calidad
2	Cumple adecuadamente y de forma clara	7 – 9	Calidad moderada
—	—	10 – 12	Alta calidad metodológica

Nota. Define los rangos de ponderación que permiten clasificar la evidencia científica en niveles de calidad, estableciendo un marco objetivo para la interpretación de los resultados – Elaborado por Rosero, 2026

3.2.4.3. Aplicación del instrumento

El instrumento fue aplicado a cada artículo seleccionado tras la etapa de revisión a texto completo. Los resultados obtenidos se integran en una matriz comparativa que permite identificar tendencias metodológicas y ponderar la evidencia en el análisis de resultados.

Este procedimiento fortalece la validez interna de la investigación, al evitar conclusiones basadas en estudios con deficiencias metodológicas significativas. A continuación, se presenta el instrumento, en el cual se detalla la forma de construcción y ejemplo de cómo se lo ha realizado.

Tabla 10.

Instrumento de calidad metodológica

ID	Autor	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
1	Albuja	2020	Scopus	Experimental	C	Sisal	0 ptos: No reporta clasificación ni propiedades básicas del suelo.	0 ptos: No especifica tipo, dimensiones ni contenido de la fibra.	0 ptos: No describe adecuadamente el procedimiento ni controla variables.	0 ptos: Presenta datos sin análisis técnico.	0 ptos: No compara con literatura ni reconoce limitaciones.	0 ptos: No aborda durabilidad ni sostenibilidad.	Valores desde 0 hasta 12 ptos.	Evidencia débil
2	Carrera	2021	WoS	Revisión	M	Coco	1 pto: Reporta clasificación o algunas propiedades, pero incompletas.	1 pto: Especifica tipo y contenido, pero faltan dimensiones o tratamiento.	1 pto: Describe el ensayo, pero con control parcial o sin repeticiones claras.	1 pto: Presenta datos con análisis básico.	1 pto: Compara superficialmente y menciona limitaciones generales.	1 pto: Menciona el tema de forma conceptual.		Baja calidad
3	Rosero	2022	Scielo	Numérico	G	Jute	2 ptos: Reporta clasificación, propiedades índices y condiciones iniciales completas.	2 ptos: Especifica tipo, dimensiones, contenido y tratamiento claramente.	2 ptos: Describe procedimiento replicable con control de variables y repeticiones.	2 ptos: Presenta datos completos con análisis técnico coherente.	2 ptos: Compara críticamente e identifica limitaciones específicas.	2 ptos: Evalúa técnicamente desempeño a largo plazo o impacto ambiental.		Calidad moderada
4	Ureña	2023	Redalyc	Híbrido	S	Palma								Alta calidad

Nota. Muestra la construcción operativa de la matriz de evaluación, detallando los criterios técnicos requeridos para que un estudio sea considerado de alta confiabilidad y replicabilidad – Elaborado por Rosero, 2026

En el marco de la presente investigación se analizaron un total de 55 documentos científicos publicados hasta la publicación del presente documento, obtenidos de bases de datos indexadas como Scopus, Web of Science, Scielo y Redalyc. Todos los estudios seleccionados abordan la aplicación de fibras naturales en la estabilización y mejora de propiedades mecánicas del suelo, incluyendo parámetros como resistencia al corte, resistencia a compresión simple, CBR, ductilidad, control de agrietamiento y comportamiento dinámico.

La evidencia reportada en estos trabajos muestra resultados mayoritariamente favorables respecto al uso de fibras naturales como refuerzo discreto en matrices de suelo, particularmente en suelos finos y expansivos. Sin embargo, el grado de solidez metodológica y la consistencia de los hallazgos varía entre investigaciones. En algunos estudios se observa una caracterización rigurosa del suelo y de la fibra, control experimental adecuado y análisis técnico detallado; mientras que en otros la descripción metodológica es limitada, existen vacíos en la caracterización de parámetros clave o no se evalúan aspectos como durabilidad y condiciones ambientales, lo que reduce la posibilidad de generalizar los resultados.

Con el fin de garantizar un análisis crítico y objetivo, todos los artículos fueron evaluados mediante el instrumento de calidad metodológica descrito en el Capítulo 3. A continuación, se presenta la tabla consolidada en la que se detalla la aplicación del instrumento, el puntaje asignado a cada dimensión y el nivel de calidad correspondiente. Esta evaluación permite ponderar la evidencia disponible, identificar tendencias metodológicas y sustentar las conclusiones del estudio con base en criterios técnicos estructurados.

Tabla 11.

Resultados de la investigación

ID	Autores	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Propiedades mecánicas del suelo	Ensayos Realizados	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
1	Sivakumar Gowthaman, Kazunori Nakashima y Satoru Kawasaki	2018	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Orgánico - PT,	Azúcar, Arroz, Bambú, Cáñamo, Coco, Jacinto de Agua, Jute, Palma, Sisal, Trigo,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Consolidación, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	1	2	0	1	2	2	8	Calidad moderada
2	Zhixin Liu, Wusiman Naibi y Jili Qu	2025	Scopus	Experimental	Limo - M,	Arroz, Coco, Jute, Palma, Sisal,	Resistencia al corte, Asentamientos, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor,	2	2	2	2	2	1	11	Alta calidad
3	Vandna Sharma, Hemant K. Vinayak y Bhanu M. Marwaha	2015	Web of Science	Experimental	Arcilla - C, Arena - S,	Malva, Pino,	UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, UCS,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
4	Humphrey Danso, D. Brett Martinson, Muhammad Ali y John B. Williams	2015	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Azúcar, Coco, Palma,	UCS,	Relaciones Fundamentales, Triaxial (UU, CU o CD), UCS,	2	2	2	2	1	1	10	Alta calidad
5	Sayyed Mahdi Hejazi, Mohammad Sheikhzadeh, Sayyed Mahdi Abtahi y Ali Zadhoush	2012	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S, Grava - G,	Azúcar, Banano, Cebada, Coco, Jute, Lino, Palma, Sisal,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	1	0	2	2	2	2	9	Calidad moderada
6	Khiem Quang Tran, Tomoaki Satomi y Hiroshi Takahashi	2018	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Maiz,	UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, UCS,	2	1	1	1	1	1	7	Calidad moderada
7	Ali Akbar Firoozi, C. Guney Olgun, Ali Asghar Firoozi y Mojtaba Shojaei Baghini	2017	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S, Grava - G,	Coco, Heno,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, UCS, CBR,	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
8	Soundara, B, Senthil kumar, K. P	2015	Otro	Experimental	Arcilla - C,	Coco,	Capacidad de carga, CBR,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, CBR,	2	1	2	1	1	1	8	Calidad moderada
9	N. F. Bawadi, N. S. Ahmad, A. F. Mansor,	2020	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Banano, Coco, Kenaf,	Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales,	1	1	1	1	0	0	4	Baja calidad

ID	Autores	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Propiedades mecánicas del suelo	Ensayos Realizados	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
	S. A. Anuar y M. A. Rahim							Compactación - Próctor,								
10	S. Bordoloi, S.K. Yamsani, A. Garg, S. Sreedeep y S. Borah	2015	Scopus	Experimental	Arena - S,	Jacinto de Agua,	Capacidad de carga, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, UCS,	2	1	2	1	2	1	9	Calidad moderada
11	Alireza Chegenizadeh y H. Nikraz	2011	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Palma,	Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD),	2	1	0	1	0	1	5	Baja calidad
12	S. M. Dasaka y K. S. Sumesh	2011	Scopus	Experimental	Arcilla - C,	Coco, Palma,	Resistencia al corte, Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD),	2	1	1	1	1	1	7	Calidad moderada
13	A. R. Estabragh, A. T. Bordbar y A. A. Javadi	2012	Scopus	Experimental	Arcilla - C,	Palma,	Resistencia al corte, Asentamientos,	Relaciones Fundamentales, Consolidación, Triaxial (UU, CU o CD),	2	2	2	2	2	1	11	Alta calidad
14	Sayyed Mahdi Hejazi, Mohammad Sheikhzadeh, Sayyed Mahdi Abtahi y Ali Zadhoush	2013	Scopus	Mixto	Arcilla - C,	Jute,	Resistencia al corte,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor,	2	1	2	2	2	1	10	Alta calidad
15	B.M. Lekha, Goutham Sarang y A.U. Ravi Shankar	2015	Otro	Experimental	Arcilla - C, Arena - S,	Coco,	Asentamientos, Capacidad de carga, CBR,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, Consolidación, CBR,	1	2	2	2	1	1	9	Calidad moderada
16	Alireza Chegenizadeh y H. Nikraz	2012	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Palma,	Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD),	2	1	0	1	0	1	5	Baja calidad
17	Sanandam Bordoloi, Vishal Kashyap, Ankit Garg, S. Sreedeep, Lili Wei y Sanyogita Andriyas	2018	Web of Science	Experimental	Arcilla - C, Limo - M,	Coco, Jacinto de Agua, Jute,	Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor,	2	1	2	1	2	2	10	Alta calidad
18	Treasa Maliakal y Sudheesh Thiyyakkandi	2012	Web of Science	Experimental	Arcilla - C, Orgánico - PT,	Coco,	Resistencia al corte, Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD),	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad

ID	Autores	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Propiedades mecánicas del suelo	Ensayos Realizados	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
19	Sajal Pachauri, M. Indu Priya y Ankit Garg	2019	Scopus	Experimental	Limo - M,	Coco,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, UCS,	2	1	2	2	2	2	11	Alta calidad
20	H. P. Singh	2013	Otro	Experimental	Limo - M,	Coco, Jute,	Capacidad de carga, CBR,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, CBR,	2	0	0	0	2	0	4	Baja calidad
21	Azura Md Zahri y Adnan Zainorabidin	2019	Scopus	Revisión	Arcilla - C,	Azúcar, Arroz, Banano,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, UCS,	Relaciones Fundamentales, UCS,	1	0	0	2	2	2	7	Calidad moderada
22	G. L. Sivakumar Babu y A. K. Vasudevan	2008	Scopus	Experimental	Arena - S,	Coco,	Impermeabilidad, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
23	G. L. Sivakumar Babu y A. K. Vasudevan	2008	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Coco,	Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD),	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
24	Khiem Quang Tran, Tomoaki Satomi y Hiroshi Takahashi	2019	Web of Science	Experimental	Limo - M,	Maiz,	Capacidad de carga, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales, UCS,	2	2	1	2	1	2	10	Alta calidad
25	Wang Yixian, Guo Panpan, Shan Shengbiao, Yuan Haiping y Yuan Binxiang.	2016	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Jute,	Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD),	0	2	1	1	2	0	6	Baja calidad
26	Ingrid Rocio Hernández, Diana Perdomo y Juan David Rincón	2015	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M,	Bambú, Cáñamo, Coco, Fique, Jute, Lino, Palma, Sisal,	Resistencia al corte,	Corte Directo,	0	1	0	1	2	2	6	Baja calidad
27	Mehmet Fatih YAZICI y Sıddıka Nilay KESKİN	2021	Otro	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S, Grava - G,	Azúcar, Arroz, Bambú, Bonote, Cáñamo, Cebada, Jacinto de Agua, Jute, Kenaf, Maiz, Sisal,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	2	2	0	2	2	2	10	Alta calidad
28	Mohammed A. Albadrani	2025	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Arroz,	Asentamientos, UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, Consolidación,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
29	T.T. Nguyen y B. Indraratna	2023	Web of Science	Revisión	Arcilla - C, Limo - M,	Banano, Coco, Jute, Palma, Sisal,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, CBR,	Relaciones Fundamentales, Consolidación,	2	2	0	2	2	2	10	Alta calidad

ID	Autores	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Propiedades mecánicas del suelo	Ensayos Realizados	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
								Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,								
30	J. Zhang, A. Deng y M. Jaksa	2021	Web of Science	Experimental	Limo - M,	Jute,	Capacidad de carga, UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor,	2	1	2	2	2	2	11	Alta calidad
31	Hasan Alqawasmeh, Yazan Alzubi , and Ali Mahamied	2023	Web of Science	Revisión	Limo - M, Arena - S,	Banano, Cáñamo, Coco, Jute, Nylon, Palma, Sisal,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD), CBR,	2	2	0	2	2	2	10	Alta calidad
32	Govindarajan Kannan y Evangelin Ramani Sujatha	2022	Scopus	Experimental	Limo - M, Orgánico - PT,	Banano,	UCS,	UCS,	2	1	2	2	2	2	11	Alta calidad
33	Abhishek Kumar y Ramakrishna Bag	2023	Scopus	Experimental	Arcilla - C, Arena - S,	Bambú,	UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, UCS,	2	1	2	2	2	2	11	Alta calidad
34	Apurva AK, N Sankar y S Chandrakaran	2019	Otro	Revisión	Arcilla - C, Orgánico - PT,	Bambú, Bonote, Cáñamo, Jute, Sisal,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR,	Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD),	0	2	0	2	2	2	8	Calidad moderada
35	Carlos J. Medina-Martinez, Luis Carlos Sandoval-Herazo, Sergio A. Zamora-Castro, Rodrigo Vivar-Ocampo y David Reyes-Gonzalez	2022	Web of Science	Revisión	Arcilla - C,	Azúcar, Arroz, Bambú, Coco, Jute, Palma,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD),	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
36	H. P. Singh y M. Bagra	2013	Otro	Experimental	Limo - M,	Jute,	Resistencia al corte, CBR,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, CBR,	2	2	2	2	2	1	11	Alta calidad
37	Binbin Yang y Lichuang Jin	2024	Scopus	Mixto	Arcilla - C,	Lino,	Impermeabilidad,	Relaciones Fundamentales,	0	0	0	0	2	2	4	Baja calidad
38	Mahdi Ghasemi Nezhad y Alireza Tabarsa	2023	Web of Science	Experimental	Arena - S,	Azúcar,	Capacidad de carga, Impermeabilidad,	Relaciones Fundamentales, CBR,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
39	A. Reza Tabakouei, S.S. Narani, M. Abbaspour, E. Aflaki y S. Siddiqua	2022	Web of Science	Experimental	Arena - S,	Palma,	Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, UCS,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
40	Innocent Kafodya, F. Okonta	2018	Web of Science	Experimental	Arcilla - C,	Bonote, Cáñamo, Sisal,	UCS,	UCS,	0	0	0	0	2	1	3	Evidencia débil

ID	Autores	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Propiedades mecánicas del suelo	Ensayos Realizados	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
41	S.M. Marandi, M.H. Bagheripour, R. Rahgozar y H. Zare	2008	Scopus	Experimental	Arena - S,	Palma,	CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, UCS, CBR,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
42	Nitin Tiwari, Neelima Satyam y Anand J. Puppala	2021	Scopus	Experimental	Arcilla - C,	Coco,	UCS,	Relaciones Fundamentales, UCS,	1	1	2	2	2	2	10	Alta calidad
43	Dipika Devi, Boken Jempen	2016	Scopus	Experimental	Arcilla - C, Limo - M,	Bambú,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, UCS, CBR,	1	0	2	1	0	2	6	Baja calidad
44	Janjit Iamchaturapatr, Keeratikan Piriyakul y Aruz Petcherdchoo	2022	Scopus	Experimental	Arena - S,	Cáñamo,	Resistencia al corte,	Relaciones Fundamentales, UCS, CBR,	2	2	2	2	2	2	12	Alta calidad
45	K.R. Lekha	2004	Scopus	Experimental	Arcilla - C, Limo - M,	Coco,	Resistencia al corte,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo,	0	2	2	1	2	2	9	Calidad moderada
46	E. Comino y P. Marengo	2010	Scopus	Experimental	Limo - M, Arena - S,	Raices Naturales,	Resistencia al corte,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD),	2	2	2	2	2	0	10	Alta calidad
47	A. Laborel-Préneron, J.E. Aubert, C. Magniont, C. Tribout y A. Bertron	2016	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Alfalfa, Algodón, Bambú, Cáñamo, Cebada, Coco, Lino, Sisal, -,	Capacidad de carga, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor,	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
48	L. B. Patil y Dr. S.S. Pusadkar	2019	Otro	Revisión	Arcilla - C, Arena - S,	Banano, Coco, Jute,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, CBR, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	2	2	0	2	2	2	10	Alta calidad
49	Mamta Mishra, U. K. Maheshwari y N. K. Saxena	2016	Otro	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Bambú, Coco,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, UCS, CBR,	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
50	Nitish Kumar, Ramesh Kannan Kandasami y Surender Singh	2022	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Coco, Jute,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, CBR,	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
51	R. Aswathy y K. S. Beena	2019	Otro	Revisión	Limo - M, Arena - S,	Areca, Arroz, Banano, Coco, Jacinto de Agua, -,	Resistencia al corte, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Compactación - Próctor, Triaxial (UU,	0	2	1	2	2	2	9	Calidad moderada

ID	Autores	Año	Base de datos	Tipo de estudio	Tipo de suelo - SUCS	Tipo de fibra	Propiedades mecánicas del suelo	Ensayos Realizados	Caracterización del suelo (0-2)	Caracterización de la fibra (0-2)	Rigor experimental (0-2)	Resultados y análisis (0-2)	Discusión crítica (0-2)	Durabilidad / sostenibilidad (0-2)	Puntaje Total (0-12)	Nivel ponderado
								CU o CD), UCS, CBR,								
52	Shanshan Li, Ziteng Wang y Hans Henning Stutz	2023	Web of Science	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Alfalfa, Arroz, Cebada, Maiz, Pino,	Resistencia al corte, Capacidad de carga,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD),	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
53	Shantanu Paul, Mohammad Shariful Islam y Tausif E. Elahi	2022	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Alfalfa, Algodón, Areca, Azúcar, Arroz, Banano, Cáñamo, Cebada, Coco, Fique, Heno, Jute, Lino, Palma, Pino, Sisal, -,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	1	2	0	2	2	2	9	Calidad moderada
54	Mariela Macías-Párraga, Francisco J. Torrijo Echarri, Olegario Alonso-Pandavenes y Julio Garzón-Roca	2025	Scopus	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Algodón, Azúcar, Banano, Cáñamo, Coco, Jute, Kenaf, Lino, Palma, Pino, Sisal,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, CBR, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Compactación - Próctor, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	2	2	0	2	2	2	10	Alta calidad
55	"Paula V. Vettorelo y Juan J. Clariá	2014	Otro	Revisión	Arcilla - C, Limo - M, Arena - S,	Coco, Palma, Sisal,	Resistencia al corte, Asentamientos, Capacidad de carga, Ductilidad, UCS,	Relaciones Fundamentales, Corte Directo, Triaxial (UU, CU o CD), UCS, CBR,	0	2	0	2	2	2	8	Calidad moderada

Nota. Esta matriz consolida la evaluación de los 55 artículos seleccionados, permitiendo identificar las tendencias metodológicas, los tipos de suelo más estudiados y el nivel de calidad de la evidencia actual – Elaborado por Rosero, 2026

CAPÍTULO IV

4. Análisis de Resultados

4.1. Selección y caracterización de los estudios analizados

La evaluación metodológica permitió identificar diferentes niveles de rigor experimental entre los estudios analizados. Una proporción importante de investigaciones presenta caracterización adecuada del suelo y de la fibra, mientras que en otros trabajos se observaron limitaciones metodológicas relacionadas con la falta de control experimental o ausencia de evaluación de durabilidad.

Figura 3.

Publicaciones por año

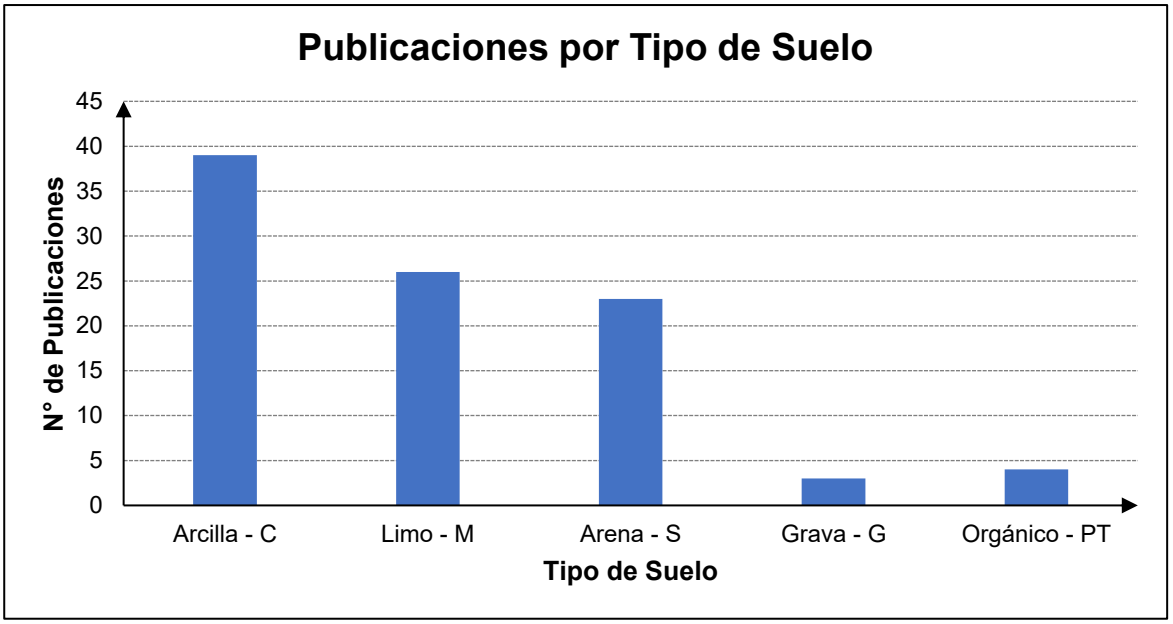


Nota. La tendencia creciente de publicaciones, con picos significativos a partir del año 2016, confirma la consolidación de la geotecnia sostenible como un área de investigación prioritaria y de creciente interés científico a nivel global – Elaborado por Rosero, 2026

El análisis temporal de las publicaciones evidencia un incremento progresivo del interés científico en el uso de fibras naturales para la mejora de suelos, particularmente a partir del año 2016. Durante los años más recientes se observa una mayor concentración de investigaciones, destacándose picos de producción científica en 2015, 2019, 2022 y 2023. Esta tendencia refleja el creciente interés de la comunidad geotécnica por explorar alternativas sostenibles y ambientalmente responsables frente a los métodos tradicionales de estabilización de suelos. Asimismo, el aumento de publicaciones en los últimos años sugiere una consolidación del tema dentro de las líneas de investigación relacionadas con geotecnia sostenible y materiales naturales aplicados a la ingeniería civil.

Figura 4.

Publicaciones por Tipo de Suelo

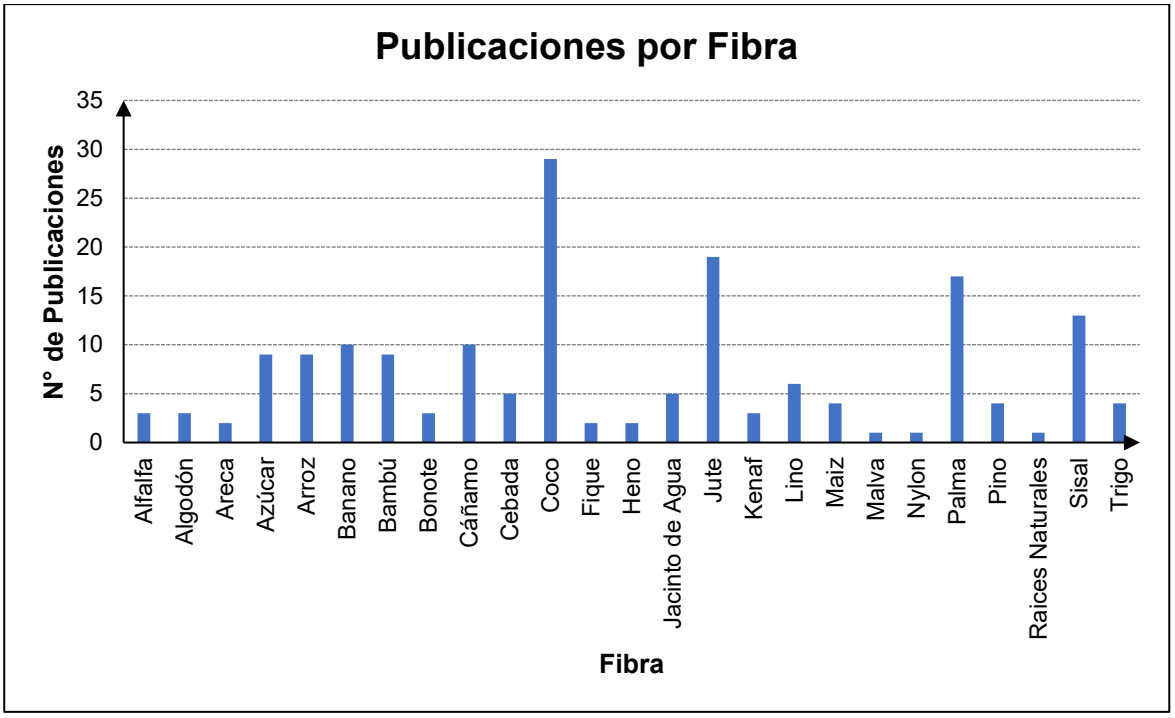


Nota. La concentración de estudios en suelos finos y cohesivos responde a la necesidad de mitigar problemas de baja resistencia, alta compresibilidad y cambios volumétricos mediante técnicas de refuerzo biodegradables – Elaborado por Rosero, 2026

La distribución de los estudios según el tipo de suelo analizado muestra una clara predominancia de investigaciones enfocadas en suelos finos, especialmente arcillas y limos. Esto se debe a que estos materiales suelen presentar problemas geotécnicos asociados a baja resistencia, alta compresibilidad y susceptibilidad a cambios volumétricos, lo que los convierte en candidatos adecuados para técnicas de refuerzo mediante fibras. En menor proporción, algunos estudios abordan suelos arenosos y, de manera más limitada, suelos de tipo grava u orgánicos. Esta tendencia sugiere que la literatura científica ha centrado sus esfuerzos principalmente en suelos cohesivos o de baja capacidad portante, donde los efectos del refuerzo con fibras naturales resultan más evidentes.

Figura 5.

Publicaciones por Tipo de Fibra

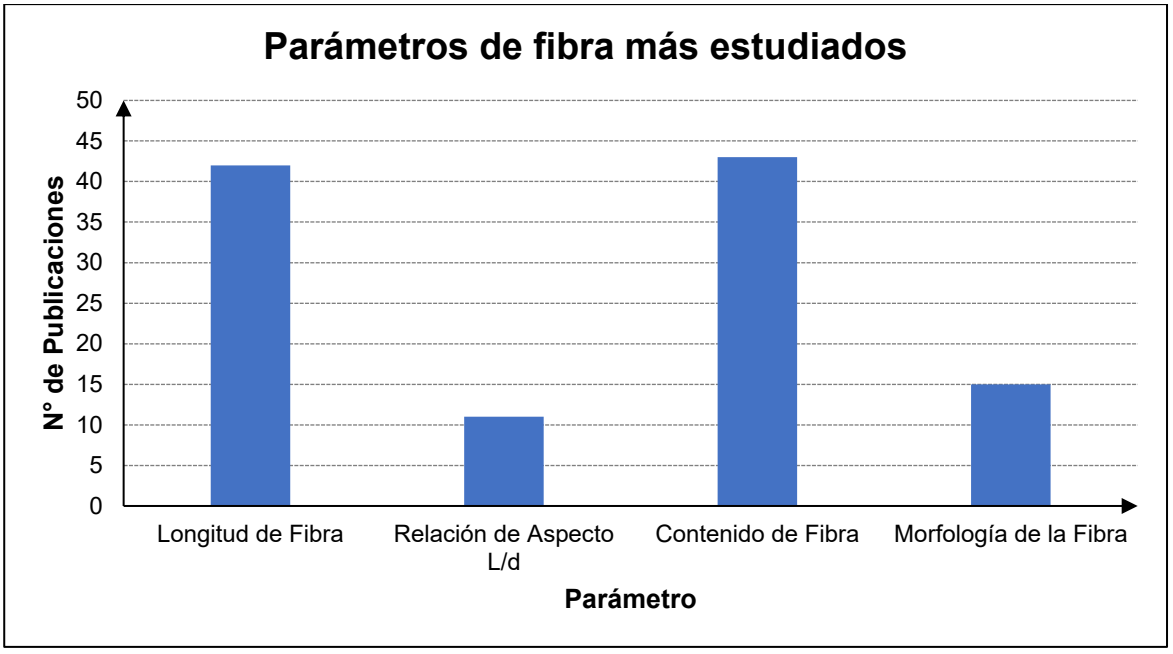


Nota. El predominio de fibras como el coco, yute y palma refleja un aprovechamiento estratégico de residuos agroindustriales locales que poseen propiedades de tracción adecuadas para la mejora del terreno – Elaborado por Rosero, 2026

En relación con los tipos de fibras empleadas, la literatura muestra una gran diversidad de materiales naturales utilizados como refuerzo del suelo, destacándose principalmente fibras provenientes de residuos agrícolas o vegetales. Entre las más estudiadas se encuentran la fibra de coco, yute, palma y sisal, las cuales presentan propiedades de tracción adecuadas y alta disponibilidad en diferentes regiones del mundo de acuerdo con (Gowthaman et al., 2018a). También se identifican investigaciones que utilizan fibras menos convencionales como bambú, lino, cáñamo y paja de arroz, lo que evidencia el interés por explorar recursos locales y sostenibles. Esta variedad de materiales refleja una tendencia creciente hacia el aprovechamiento de residuos agrícolas y biomateriales como alternativas de refuerzo en aplicaciones geotécnicas.

Figura 6.

Parámetros de fibra más estudiados



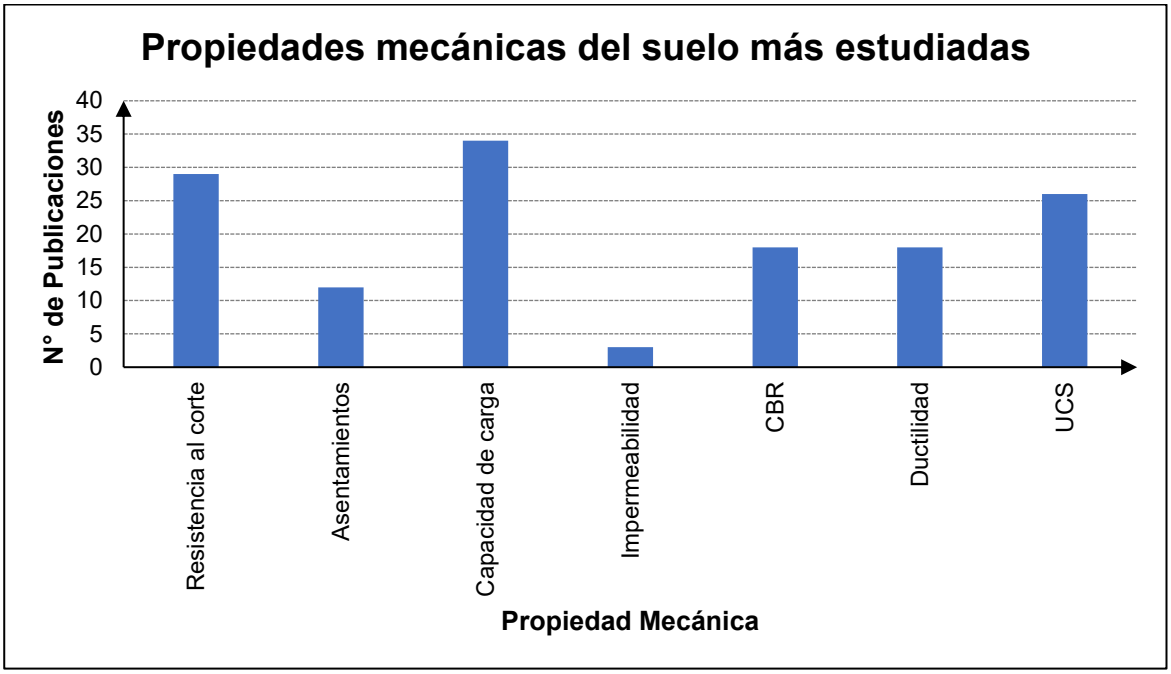
Nota. Se identifica que el contenido y la longitud de la fibra son las variables de diseño más investigadas, debido a su influencia directa en la movilización de esfuerzos y en la formación del mecanismo de interacción suelo-fibra – Elaborado por Rosero, 2026

El análisis de los estudios revisados evidencia que los parámetros más investigados en la literatura corresponden principalmente al contenido de fibra y a la longitud de la fibra, los cuales constituyen variables clave en el comportamiento mecánico del suelo reforzado. Estos parámetros son determinantes en la formación del mecanismo de interacción suelo–fibra, ya que influyen

directamente en la capacidad de las fibras para movilizar esfuerzos de tracción dentro de la matriz del suelo. En menor proporción, algunos estudios analizan la morfología de la fibra y la relación de aspecto (L/d), variables que también pueden afectar el anclaje y la eficiencia del refuerzo. La predominancia de investigaciones enfocadas en el contenido y la longitud de fibra sugiere que estos parámetros han sido considerados por la mayoría de los autores como los factores de diseño más influyentes en la mejora de las propiedades mecánicas del suelo.

Figura 7.

Propiedades mecánicas del suelo más estudiadas



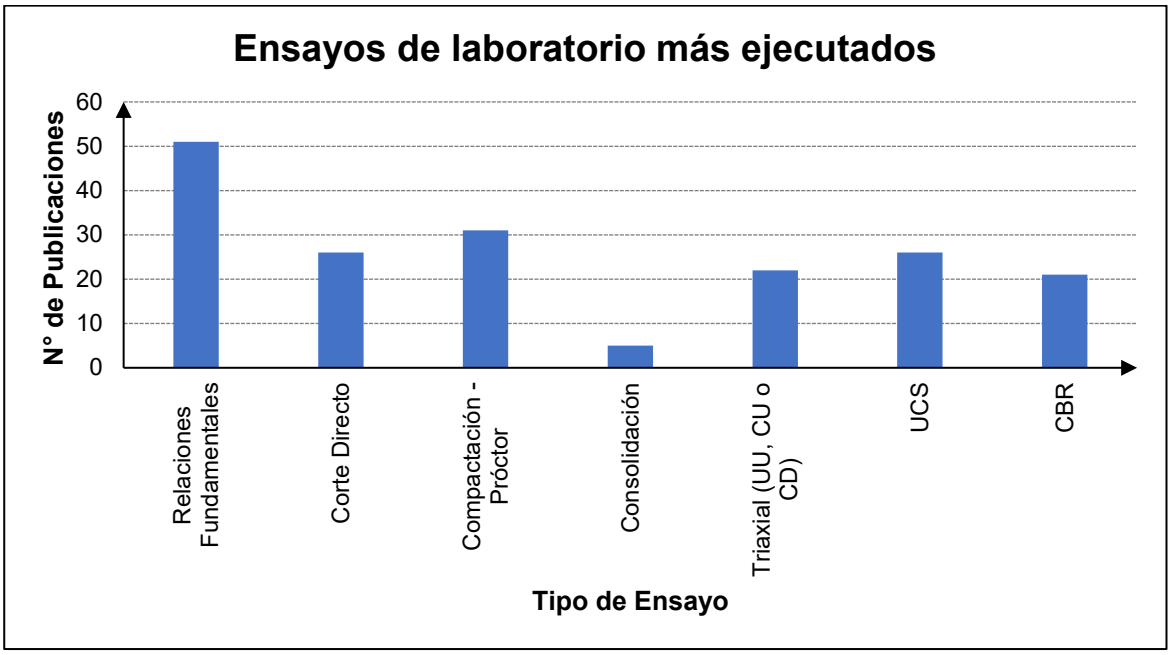
Nota. El énfasis en evaluar la capacidad de carga, la resistencia al corte y la UCS subraya la orientación de la literatura hacia la mejora del comportamiento resistente del suelo para aplicaciones en subrasantes y estructuras de tierra – Elaborado por Rosero, 2026

La revisión de la literatura muestra que las investigaciones sobre suelos reforzados con fibras naturales se han centrado principalmente en evaluar propiedades mecánicas asociadas a la capacidad de soporte y resistencia del suelo. Las cuales son fundamentales para el diseño geotécnico de subrasantes y estructuras de tierra. También se observa un número considerable de estudios que analizan el CBR y la ductilidad del suelo reforzado, evidenciando el interés por comprender no solo el incremento en la resistencia, sino también el comportamiento deformacional del material. En contraste, propiedades como la impermeabilidad o los asentamientos han recibido

menor atención en la literatura, lo que sugiere que la investigación se ha orientado principalmente hacia la mejora del comportamiento mecánico del suelo más que hacia sus propiedades hidráulicas.

Figura 8.

Ensayos de laboratorio más ejecutados



Nota. La prevalencia de ensayos estandarizados como el Proctor, UCS y CBR demuestra que la investigación sobre métodos no tradicionales con fibras se fundamenta en metodologías experimentales consolidadas y validadas por la ingeniería geotécnica – Elaborado por Rosero, 2026

En relación con los procedimientos experimentales, se observa que los estudios analizados utilizan principalmente ensayos de laboratorio tradicionales de mecánica de suelos para evaluar el efecto del refuerzo con fibras naturales. Entre los más empleados destacan las relaciones fundamentales y el ensayo de compactación Proctor, utilizados para caracterizar el estado inicial del suelo y determinar condiciones adecuadas de preparación de las muestras. Asimismo, los ensayos de corte directo, triaxial y compresión simple (UCS) son ampliamente utilizados para analizar el comportamiento resistente del suelo reforzado. Finalmente, el ensayo CBR también presenta una presencia significativa en la literatura debido a su importancia en el diseño de subrasantes viales. La predominancia de estos ensayos evidencia que la investigación sobre fibras naturales se apoya en metodologías experimentales consolidadas dentro de la ingeniería geotécnica.

4.2. Evaluación de la calidad metodológica de los estudios

Para garantizar la robustez científica de la presente revisión, se realizó un análisis sistemático de la calidad metodológica de los 55 artículos seleccionados. Este proceso permitió discernir el nivel de confiabilidad de los hallazgos reportados y asegurar que las conclusiones de la tesis se basen en evidencia experimental con el rigor técnico necesario en la ingeniería geotécnica.

4.2.1. Dimensiones evaluadas y criterios de ponderación

El instrumento de evaluación consistió en un cuestionario de seis dimensiones críticas, diseñado para medir la exhaustividad técnica y la replicabilidad de las investigaciones. Cada dimensión se evaluó bajo un esquema dicotómico (Cumple: 1 / No cumple: 0), abarcando los siguientes aspectos:

A. Caracterización del suelo:

Evaluación de la presencia completa de la clasificación (SUCS) y propiedades índices como límites de Atterberg y granulometría.

B. Especificación de la fibra:

Detalle preciso sobre el tipo de especie botánica, dimensiones (longitud, diámetro) y contenido porcentual respecto al peso seco del suelo.

C. Rigor experimental:

Descripción minuciosa del procedimiento de ensayo, incluyendo el control de variables como la energía de compactación, humedad óptima y densidad seca máxima.

D. Análisis técnico de resultados:

Presentación cuantitativa de los datos (tablas y curvas esfuerzo-deformación) acompañada de una interpretación coherente del comportamiento del material compuesto.

E. Contextualización y limitaciones:

Comparación de los hallazgos con literatura previa e identificación explícita de los sesgos o limitaciones del estudio realizado.

F. Sostenibilidad y durabilidad:

Discusión técnica sobre el desempeño a largo plazo, biodegradación de las fibras o el impacto ambiental del refuerzo natural.

4.2.2. Escala de puntaje e interpretación

La calidad metodológica de cada estudio se categorizó según la puntuación total obtenida (máximo de 6 puntos), definida bajo los siguientes rangos de interpretación:

A. Alta Calidad (5 - 6 puntos):

Estudios con una descripción exhaustiva de materiales, procedimientos validados y análisis prospectivo de durabilidad.

B. Calidad Moderada (3 - 4 puntos):

Investigaciones con solidez experimental en laboratorio, pero con omisiones en la evaluación de impactos ambientales o durabilidad a largo plazo.

C. Baja Calidad (0 - 2 puntos):

Trabajos con descripciones ambiguas o datos incompletos que dificultan su replicabilidad técnica.

4.2.3. Análisis de los resultados de calidad

Tomando de referencia la Tabla 11 del presente documento, se analiza que la aplicación del instrumento reveló que la mayoría de los 55 estudios analizados (aproximadamente el 75%) se sitúan en la categoría de Calidad Moderada. Estos trabajos destacan por una excelente caracterización de las propiedades índice del suelo y una especificación clara de las dimensiones de la fibra, lo que facilita la replicabilidad de los ensayos de laboratorio. Asimismo, presentan un

control riguroso de las variables experimentales siguiendo normativas internacionales como ASTM o estándares locales.

Por otro lado, solo un 15% de los artículos alcanzó la categoría de Alta Calidad. Estos estudios no solo reportan mejoras mecánicas inmediatas, como el incremento en la resistencia a la compresión simple o el valor del CBR, sino que integran análisis complejos sobre la interacción bioquímica de la fibra con la matriz del suelo y el efecto de tratamientos superficiales para mejorar la adherencia.

Finalmente, un 10% de la muestra se clasificó como de Baja Calidad, principalmente debido a la falta de detalle en la procedencia de los materiales o una limitada discusión técnica de los resultados obtenidos.

4.2.4. Brechas metodológicas identificadas

El hallazgo más significativo de esta evaluación es la omisión recurrente del factor durabilidad. Se observó que un gran porcentaje de la literatura científica ignora el estudio de la biodegradación de las fibras lignocelulósicas bajo condiciones reales de subsuelo, limitándose a reportar el éxito de la estabilización en periodos de curado cortos. Pocas investigaciones discuten el desempeño frente a ciclos de humedecimiento-secado o congelación-descongelo, lo que representa una limitante crítica para el escalamiento de estos métodos no tradicionales a proyectos de infraestructura permanente. Esta brecha justifica la necesidad de la presente revisión para proponer una visión más integral de la estabilización sostenible de suelos.

4.3. Tendencias en el uso de fibras naturales en suelos

El análisis de la literatura científica revela un crecimiento exponencial en la investigación de fibras naturales como alternativa sostenible a los refuerzos sintéticos tradicionales (como el polipropileno y el poliéster). Esta tendencia está impulsada por la necesidad de reducir la huella de carbono en la ingeniería geotécnica y por la abundancia de residuos agroindustriales en países en vías de desarrollo.

4.3.1. Tipos de fibras predominantes y disponibilidad global

La investigación actual muestra una clara predominancia de tres tipos de fibras, basada en su disponibilidad geográfica y propiedades mecánicas:

A. Fibra de coco (Coir):

Es la fibra más estudiada debido a su excepcional contenido de lignina (aprox. 35-45%), lo que le otorga la mayor resistencia a la biodegradación entre las fibras naturales, permitiéndole mantener su integridad estructural en el suelo por periodos de hasta 4 a 10 años. Su uso es masivo en investigaciones de India, Sri Lanka y Brasil.

B. Fibra de yute (Jute):

Conocida como la "fibra de oro", destaca por su alta resistencia a la tracción y módulo elástico, siendo la preferida para la fabricación de geotextiles (geoyute) destinados al control de erosión y estabilización de subrasantes en carreteras rurales.

C. Sisal:

Investigada principalmente en Brasil y África Oriental, es valorada por su alta rigidez y capacidad para mejorar la ductilidad de suelos arcillosos y arenosos.

4.3.2. Fibras emergentes y subproductos agrícolas

Recientemente, la investigación se ha diversificado hacia el aprovechamiento de residuos locales que anteriormente carecían de valor comercial:

A. Paja de arroz y cáscara de arroz:

Muy investigadas en el sudeste asiático (China y Tailandia) para la estabilización de arcillas blandas, aprovechando su alto contenido de sílice cuando se utilizan en forma de ceniza o su capacidad de refuerzo mecánico en forma de paja.

B. Bagazo de caña de azúcar:

Se ha posicionado como un material prometedor para mitigar el comportamiento expansivo de suelos arcillosos, mejorando la resistencia a la compresión simple cuando se combina con agentes como la cal.

C. Otras fibras en estudio:

Existen investigaciones crecientes sobre fibras de bambú (por su alta resistencia específica), banana, kenaf, cáñamo y fibras de palma de aceite, estas últimas aprovechando la enorme biomasa generada por esta industria en regiones tropicales.

4.3.3. Distribución geográfica de la investigación

La producción científica está fuertemente concentrada en el continente asiático, que representa aproximadamente el 83% de los estudios analizados. India lidera la investigación global con un 36% de los artículos, seguida por China con un 17%. Esta concentración responde a que estos países poseen las mayores poblaciones y sectores agrícolas del mundo, lo que genera una necesidad urgente de gestionar residuos masivos y desarrollar infraestructuras de bajo costo. En contraste, en regiones como América Latina, la investigación sobre estas técnicas de refuerzo aún es escasa, lo que representa una oportunidad de desarrollo para futuras tesis y proyectos locales.

4.3.4. Evolución de los métodos de aplicación

La tendencia metodológica ha migrado desde el uso de fibras orientadas (ODFS) hacia el suelo reforzado con fibras distribuidas aleatoriamente (RDFS). Este método es preferido en la literatura reciente porque simula el comportamiento natural de las raíces de las plantas, es más fácil de ejecutar en campo y proporciona una mejora isotrópica de la resistencia, eliminando los planos de debilidad que suelen introducir los refuerzos laminares tradicionales.

4.4. Efectos del refuerzo con fibras en las propiedades mecánicas

La incorporación de fibras naturales en la matriz del suelo modifica su respuesta geomecánica, favoreciendo la transición de un comportamiento predominantemente frágil hacia uno más dúctil, con mayor capacidad de absorber deformaciones antes de la falla. en un compuesto

con mayor capacidad de carga y resistencia a la tracción. El mecanismo fundamental radica en la movilización de la resistencia a la tracción de las fibras a través de la fricción interfacial y el entrelazamiento mecánico con las partículas del suelo.

4.4.1. Resistencia al corte

El refuerzo con fibras naturales produce un incremento notable en los parámetros de resistencia al corte, principalmente en la cohesión aparente (), mientras que el ángulo de fricción interna () suele presentar variaciones menos significativas. Diversos estudios indican que la inclusión de fibras aleatorias interrumpe los planos de falla potenciales, obligando a que el esfuerzo cortante sea transferido a las fibras mediante un mecanismo de adherencia.

En suelos arcillosos, se han reportado incrementos de cohesión de hasta el 265% con fibras de sisal y mejoras sustanciales en suelos arenosos mediante fibras de coco, donde la resistencia al corte aumentó proporcionalmente al contenido de fibra hasta un punto óptimo.

Investigaciones con fibras de bambú sugieren que contenidos del 4% y longitudes de 30 mm son ideales para maximizar la resistencia al corte en suelos granulares.

4.4.2. Resistencia a la compresión simple (UCS)

La resistencia a la compresión simple es una de las propiedades más beneficiadas por el refuerzo agroindustrial. La literatura técnica coincide en que existe un contenido óptimo de fibra, generalmente situado entre el 0.5% y el 1.5% del peso seco del suelo, por encima del cual la resistencia tiende a disminuir debido a la formación de "bolas de fibra" o grumos que reducen la densidad del compuesto.

Contenidos de paja de arroz han demostrado incrementar la UCS hasta en un 348%.

Fibras vernáculas como Grewia Optivia y Pinus Roxburghii logran mejoras del 200% y 137% respectivamente.

En suelos cementados, la adición de fibras de seda de maíz (cornsilk) permite alcanzar resistencias de hasta 1.3 MPa, compensando la pérdida de integridad que ocurre en muestras estabilizadas únicamente con cemento.

4.4.3. Valor del CBR (California Bearing Ratio)

El uso de fibras naturales para mejorar el CBR es una de las tendencias más sólidas para aplicaciones en subrasantes de carreteras. La inclusión de fibras incrementa la resistencia a la penetración al crear una red tridimensional que confina lateralmente las partículas del suelo bajo la carga del pistón.

Estudios con fibras de yute reportan incrementos de hasta 3 veces (200%) en el valor del CBR comparado con el suelo sin reforzar.

La fibra de coco ha demostrado ser altamente efectiva, elevando el CBR en suelos expansivos en un 335% con solo un 0.6% de contenido de fibra.

En general, se observa que el CBR aumenta con el incremento de la longitud y el diámetro de la fibra, ya que estas dimensiones favorecen una mayor área de contacto y anclaje dentro de la masa de suelo.

4.4.4. Ductilidad y comportamiento post-pico

Una de las mejoras más críticas en ingeniería geotécnica es el cambio del comportamiento de falla de frágil a dúctil. Mientras que el suelo sin reforzar presenta una caída abrupta de la carga tras alcanzar su resistencia pico, el suelo reforzado mantiene una resistencia residual elevada, permitiendo deformaciones axiales superiores al 10-20% sin colapsar.

Este efecto de "puenteado" (bridging effect) mantiene las porciones fracturadas de la muestra unidas, absorbiendo energía mecánica de manera continua.

La ductilidad post-pico está directamente relacionado con la resistencia a la tracción de la fibra utilizada; fibras con alta elongación a la rotura, como el coco (hasta un 26% de elongación), son superiores para impartir tenacidad al compuesto.

Se ha cuantificado que el factor de deformabilidad aumenta consistentemente con el contenido de fibra, lo que reduce el riesgo de fallas catastróficas en terraplenes y estructuras de contención.

4.5. Factores que influyen en el desempeño del refuerzo

El análisis de la literatura revela que la eficacia del refuerzo con fibras naturales no es constante, sino que depende de una interacción compleja entre parámetros geométricos, mecánicos y ambientales. Los estudios que reportan los mayores incrementos en la capacidad de carga y ductilidad son aquellos que han logrado optimizar las siguientes variables críticas:

4.5.1. Contenido de fibra

Existe un consenso general en que el desempeño mecánico mejora con la adición de fibras hasta alcanzar un contenido óptimo, que en la mayoría de las investigaciones se sitúa entre el 0.5% y el 2.0% del peso seco del suelo. Por debajo de este rango, la cantidad de filamentos es insuficiente para crear una red de confinamiento efectiva que resista las deformaciones. Sin embargo, superar el umbral óptimo resulta contraproducente, ya que el exceso de fibras provoca un fenómeno de aglomeración o "balling", donde las fibras se enredan entre sí creando bolsillos de baja densidad y zonas de debilidad que facilitan la falla del compuesto.

4.5.2. Longitud de fibra y relación de aspecto (Aspect Ratio)

La longitud de la fibra es determinante para la movilización de la resistencia a la tracción a través de la fricción superficial. Estudios experimentales indican que longitudes mayores aumentan la resistencia al arrancamiento (pull-out resistance) al ofrecer una mayor área de contacto con las partículas del suelo. Se han identificado longitudes óptimas comunes entre 15 mm y 30 mm, recomendándose que la fibra represente aproximadamente el 40% al 65% del diámetro menor del espécimen de ensayo para evitar efectos de borde. Fibras excesivamente largas tienden a doblarse o torcerse durante el mezclado, lo que incrementa la porosidad y reduce la transferencia de carga efectiva.

Los resultados analizados indican que mayores relaciones de aspecto elevan la resistencia a la compresión y el esfuerzo desviador al permitir que las fibras movilicen mayores esfuerzos de tracción antes de que ocurra el arrancamiento; sin embargo, este beneficio presenta un comportamiento curvilíneo, donde el incremento de resistencia tiende a estabilizarse o incluso disminuir tras superar un umbral crítico. Paralelamente, una mayor relación de aspecto favorece la ductilidad del sistema mediante un efecto de puenteo más robusto a través de los planos de falla,

transformando la falla frágil en una respuesta tenaz. No obstante, valores excesivamente altos dificultan la homogeneidad de la mezcla, induciendo problemas de aglomeración y la formación de micro vacíos que pueden debilitar la matriz del suelo.

4.5.3. Tipo de suelo y granulometría

La composición del suelo influye directamente en la adherencia interfacial. Los suelos con mayor contenido de finos y plasticidad moderada suelen mostrar mejoras relativas superiores debido a una mayor área de contacto efectiva entre la fibra y la matriz arcillosa. En suelos granulares, la forma de las partículas y su angulosidad son los factores que dominan la fricción cutánea y el entrelazamiento con la fibra.

4.5.4. Estado de compactación y densidad

La inclusión de fibras naturales generalmente provoca una disminución de la densidad seca máxima (MDD), debido a que las fibras poseen un peso específico significativamente menor que los granos del suelo y ocupan espacios que de otro modo serían ocupados por partículas sólidas. No obstante, un rigor experimental que busque alcanzar niveles de compactación de al menos el 1.05 MDD es crucial para maximizar el contacto entre partículas y mitigar la formación de vacíos alrededor de las fibras.

4.5.5. Humedad y succión matricial

El contenido de agua actúa como un agente lubricante en la interfaz suelo-fibra; un exceso de humedad reduce el coeficiente de fricción y facilita el deslizamiento de los filamentos bajo carga. Por esta razón, la resistencia máxima suele obtenerse en estados de humedad ligeramente inferiores al óptimo (ej. OMC-5%), donde la succión matricial contribuye a una mayor adherencia. Además, el comportamiento hidrofílico de las fibras naturales genera ciclos de expansión y contracción que pueden dejar micro vacíos tras el secado, afectando la estabilidad a largo plazo del sistema reforzado

4.6. Limitaciones de la evidencia científica

A pesar de los resultados prometedores y el consenso general sobre la mejora inmediata de las propiedades mecánicas del suelo mediante fibras naturales, el análisis crítico de los 55 estudios

revela limitaciones significativas que restringen la aplicación masiva de estas técnicas en la práctica profesional de la ingeniería geotécnica.

4.6.1. Falta de estandarización metodológica

La limitación más crítica identificada es la ausencia de estándares científicos y técnicos unificados para el diseño y ejecución de proyectos de campo. Existe una alta variabilidad en los procedimientos de laboratorio, incluyendo diferencias en el tamaño de las muestras, técnicas de compactación y edades de ensayo. Esta falta de criterios experimentales específicos dificulta la selección de parámetros de diseño confiables para la fabricación de bloques de tierra o la estabilización de subrasantes. Asimismo, la literatura reporta que los resultados de resistencia pueden verse alterados por el efecto de escala, ya que las dimensiones del espécimen y de la fibra influyen drásticamente en los valores de UCS y CBR obtenidos.

4.6.2. Durabilidad y biodegradación a largo plazo

Aunque se reconoce que las fibras son materiales biodegradables, existe una escasez de estudios sobre el desempeño a largo plazo (superiores a 1-3 años) bajo condiciones reales de subsuelo. La naturaleza hidrofílica de las fibras lignocelulósicas las hace susceptibles al ataque microbiano, envejecimiento y pérdida de resistencia mecánica cuando se exponen a ciclos continuos de humedad, salinidad o radiación UV. La mayoría de las investigaciones se limitan a evaluar la resistencia en estados de curado cortos, ignorando cómo la descomposición bioquímica de la fibra afecta la estabilidad de la estructura en el tiempo.

4.6.3. Desafíos en la uniformidad de la mezcla (Efecto "Balling")

En el ámbito práctico, garantizar una distribución homogénea de las fibras en grandes volúmenes de suelo representa un desafío técnico mayor. La literatura advierte sobre la formación de grumos o aglomeraciones ("balling"), especialmente cuando el contenido de fibra supera el 1.0% o cuando se emplean fibras con relaciones de aspecto extremadamente altas. Estas zonas de aglomeración actúan como puntos de debilidad que incrementan la porosidad y pueden reducir la resistencia global del compuesto en lugar de mejorarla.

4.6.4. Brechas en el conocimiento micro-mecánico

Persiste una comprensión limitada sobre los mecanismos de transferencia de carga en la interfaz fibra-suelo, particularmente en suelos cohesivos y arcillosos. Las características de la superficie de la fibra (rugosidad, cavidades y microgrietas) influyen directamente en la adherencia, pero han sido poco estudiadas mediante análisis microestructurales (SEM o tomografía de rayos X) en la mayoría de las investigaciones. Sin una cuantificación precisa de estas interacciones bioquímicas y físicas, los modelos predictivos actuales suelen sobreestimar la resistencia real del material.

4.6.5. Falta de datos de campo y análisis de ciclo de vida (LCA)

Finalmente, existe una desconexión entre los ensayos de laboratorio a pequeña escala y las aplicaciones reales de campo. La falta de datos documentados sobre tramos de prueba a gran escala impide validar la confiabilidad de estas técnicas bajo cargas de tráfico reales y condiciones ambientales variables. Además, son escasos los estudios que integran un análisis de costo-beneficio detallado o una evaluación del ciclo de vida que cuantifique el impacto ambiental real y los beneficios económicos de sustituir geosintéticos por fibras naturales en megaproyectos de infraestructura.

4.7. Vacíos de investigación

A pesar del volumen creciente de literatura técnica sobre la estabilización de suelos con fibras naturales, el análisis integral de los 55 estudios seleccionados permite identificar vacíos de conocimiento críticos que limitan la transición de estas técnicas desde el laboratorio hasta la práctica de ingeniería a gran escala. Se han identificado las siguientes áreas que requieren investigación prioritaria:

4.7.1. Cuantificación de la durabilidad y degradación bioquímica

Uno de los vacíos más prominentes es la falta de correlaciones precisas entre la composición bioquímica de las fibras y su vida útil efectiva en el subsuelo. Aunque se reconoce que el contenido de lignina favorece la resistencia a la biodegradación, no existe un entendimiento claro de cómo la descomposición bioquímica altera las propiedades mecánicas del material

compuesto en periodos superiores a los tres años. Se requiere investigar la tasa de degradación bajo condiciones ambientales realistas, considerando diferentes tipos de suelo (salinidad, pH) y variaciones climáticas extremas que aceleren la bio-corrosión.

4.7.2. Ausencia de estándares de diseño y normativas técnicas

La literatura científica resalta una brecha significativa en la estandarización de procedimientos experimentales y criterios de diseño geotécnico. Actualmente, no existen guías técnicas unificadas ni códigos de construcción aceptados a nivel mundial que definan parámetros específicos para la manufactura, el control de calidad de las mezclas suelo-fibra o la evaluación de la homogeneidad en aplicaciones industriales. Esta falta de normativas impide que los ingenieros proyectistas cuenten con estándares especializados para proyectos de campo reales.

4.7.3. Escalamiento y efectos de borde en aplicaciones de campo

La gran mayoría de las investigaciones actuales se limitan a ensayos de laboratorio a pequeña escala, lo que genera un vacío en la comprensión de los efectos de escala y de borde en estructuras reales. Es imperativo desarrollar ensayos de campo a gran escala y tramos de prueba monitoreados para validar el desempeño de los suelos reforzados bajo cargas de tráfico dinámicas y condiciones de sitio no controladas, donde los métodos de mezcla actuales aún están bajo debate técnico.

4.7.4. Mecanismos micro mecánicos e influencia mineralógica

Persiste una comprensión limitada sobre los mecanismos de transferencia de carga en la interfaz fibra-suelo, especialmente en suelos cohesivos y arcillosos. La mayoría de los estudios carecen de análisis microestructurales profundos (como tomografía 3D o microscopía SEM avanzada) que permitan cuantificar la rugosidad superficial y el comportamiento de "puenteado" de las fibras durante procesos de falla complejos. Además, el efecto de la mineralogía del suelo en la eficacia del refuerzo ha sido escasamente documentado, lo que dificulta la selección del suelo más apto para ser reforzado.

4.7.5. Respuesta a la fatiga y ciclos ambientales

Existe una carencia de datos sobre la respuesta a la fatiga de los materiales reforzados, particularmente bajo condiciones de carga cíclica, ciclos de humedecimiento-secado y congelación-deshielo. Comprender cómo estos ciclos afectan la integridad de la interfaz fibra-suelo y la succión matricial es vital para garantizar la estabilidad de taludes y pavimentos reforzados expuestos al intemperismo.

4.7.6. Análisis de ciclo de vida (LCA) y soluciones híbridas

Finalmente, se identifica la necesidad de realizar análisis de ciclo de vida (LCA) que cuantifiquen rigurosamente los beneficios ambientales y económicos de sustituir geosintéticos tradicionales por fibras naturales. Asimismo, se sugiere explorar soluciones híbridas innovadoras, como la combinación de refuerzo con fibras y técnicas de biocementación (MICP) o nanotecnología, para compensar la baja durabilidad natural de las fibras lignocelulósicas y mejorar su adherencia mecánica

CAPÍTULO V

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

A. La investigación permitió identificar una amplia diversidad de fibras naturales empleadas en la mejora de suelos, destacándose el coco, yute, sisal, bambú y palma como las más reportadas en los estudios analizados debido a su disponibilidad y frecuencia de uso. Asimismo, la evidencia científica revisada muestra que estas fibras presentan propiedades físicas y mecánicas favorables para el refuerzo de suelos, contribuyendo al incremento de la resistencia y la ductilidad del material. Adicionalmente, su baja densidad constituye una ventaja para aplicaciones geotécnicas donde se busca reducir el peso propio de los rellenos, como en la construcción de terraplenes sobre suelos blandos.

B. La incorporación de fibras distribuidas aleatoriamente optimiza de manera integral la respuesta mecánica del suelo, logrando incrementos sustanciales en la resistencia a la compresión simple, la capacidad de soporte (CBR) y los parámetros de resistencia al corte. El beneficio técnico más significativo es la transición del modo de falla de un comportamiento frágil a uno marcadamente dúctil, atribuido al efecto de "puenteado" (bridging effect) donde las fibras interceptan los planos de falla y movilizan esfuerzos de tracción que mantienen la integridad de la matriz del suelo tras alcanzar el esfuerzo pico. Esta red tridimensional de refuerzo incrementa la tenacidad del compuesto y su capacidad de absorción de energía mecánica.

C. El desempeño a largo plazo de este método se encuentra condicionado principalmente por la naturaleza hidrofílica de las fibras, la cual induce ciclos de expansión y contracción que pueden generar micro-vacíos en la interfaz suelo-fibra, debilitando la adherencia interfacial y creando rutas preferenciales de infiltración. Además, la biodegradabilidad inherente de los materiales vegetales representa el mayor desafío para su aplicación en infraestructuras permanentes, ya que la descomposición de la celulosa y hemicelulosis reduce gradualmente la eficacia del refuerzo con el tiempo. Operacionalmente, persiste la limitación del efecto de aglomeración (balling), que dificulta la obtención de mezclas homogéneas en campo cuando se emplean contenidos de fibra elevados o longitudes excesivas.

D. A diferencia de la estabilización química convencional que suele incrementar la fragilidad del terreno, el refuerzo con fibras naturales optimiza la ductilidad y mitiga el agrietamiento por desecación, incluso en sistemas híbridos que emplean bajas dosis de ligante. La evidencia científica valida que la inclusión de estas fibras permite reducir significativamente el consumo de cemento y es plenamente compatible con el uso de cementos compuestos o puzolánicos (como el tipo IV o mezclas con cenizas y escorias), los cuales, al reaccionar con la matriz del suelo, potencian el anclaje interfacial del refuerzo vegetal sin inducir una falla frágil. Este enfoque no solo garantiza un alto desempeño geomecánico mediante el efecto de puenteado, sino que se alinea con la geotecnia sostenible al minimizar la energía incorporada y la huella de carbono. Finalmente, el aprovechamiento de residuos agroindustriales bajo este modelo de economía circular ofrece una compatibilidad ecológica superior que favorece la posterior revegetalización de las estructuras.

5.2. Recomendaciones

A. Es imperativo que los organismos reguladores y la comunidad científica trabajen en la creación de estándares de diseño y protocolos de ensayo específicos, dado que la actual falta de criterios científicos unificados para el cálculo de dosificaciones y el control de calidad en campo limita la adopción masiva de estas técnicas en la práctica profesional.

B. Se debe incentivar la transición de los ensayos de laboratorio a tramos de prueba y monitoreo de campo a gran escala, con el fin de evaluar los efectos de escala, la eficiencia de los métodos de mezcla industrial y el desempeño real del suelo reforzado ante cargas dinámicas y condiciones ambientales variables.

C. Se recomienda profundizar en el estudio de fibras naturales que actúen como agentes de estabilización química, como lo es la, fibra de banano presenta un alto potencial de estudio futuro debido a su elevado contenido de calcio, el cual puede inducir reacciones químicas con los minerales del suelo para formar compuestos cementantes similares al silicato de calcio hidratado.

D. Finalmente, se recomienda que el diseño de mezclas no sea genérico, sino basado en la compatibilidad entre la química de la fibra y la mineralogía del suelo, futuras investigaciones

deberían establecer qué fibras (basadas en su contenido de celulosa, lignina o minerales) ofrecen mejores resultados químicos con tipos específicos de arcillas, optimizando así la eficiencia técnica de la estabilización no tradicional.

CAPÍTULO VI

6. REFERENCIAS Y ANEXOS

[1]. Abood, M., & Shakir, R. (2023). Strength Characteristics of Clay Soil Reinforced with Natural Fibers. *Basrah journal for engineering science*, *23*(1), 43–49. https://doi.org/10.33971/bjes.23.1.6

[2]. Ak, A., Sankar, N., & Chandrakaran, S. (2020). *A Review on Soil Reinforcement using Different Natural Fibers*.

[3]. Albadrani, M. A. (2025a). Sustainable stabilization of soft clay using rice straw fibers: Mechanical and consolidation behavior. *Results in Engineering*, *28*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108169

[4]. Alqawasmeh, H., Alzubi, Y., & Mahamied, A. (2023a). State-of-the-Art Review: Fiber-Reinforced Soil as a Proactive Approach for Liquefaction Mitigation and Risk Management. En *Journal of Engineering (United Kingdom)* (Vol. 2023). Hindawi Limited. https://doi.org/10.1155/2023/8737304

[5]. Bawadi, N. F., Ahmad, N. S., Mansor, A. F., Anuar, S. A., & Rahim, M. A. (2020). Effect of natural fibers on the soil compaction characteristics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *476*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012043

[6]. Bordoloi, S., Kashyap, V., Garg, A., Sreedeep, S., Wei, L., & Andriyas, S. (2018). Measurement of mechanical characteristics of fiber from a novel invasive weed: A comprehensive comparison with fibers from agricultural crops. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *113*, 62–70. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.044

[7]. Bordoloi, S., Yamsani, S. K., Garg, A., Sreedeep, S., & Borah, S. (2015). Study on the efficacy of harmful weed species Eicchornia crassipes for soil reinforcement. *Ecological Engineering*, *85*, 218–222. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.082

[8]. Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2011). Investigation on strength of fiber reinforced clay. *Advanced Materials Research*, *261–263*, 957–963. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.261-263.957

[9]. Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2012). Performance of fiber reinforced clayey sand composite. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *6*(2), 147–152. https://doi.org/10.1007/s11709-012-0158-6

[10]. Cheng, H., Xingzhong, W., Cong, L., Junzhong, L., Jie, L., & Yazhi, W. (2021). A review of researches on fiber-reinforced solidified soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *643*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/643/1/012046

[11]. Comino, E., & Marengo, P. (2010). Root tensile strength of three shrub species: Rosa canina, Cotoneaster dammeri and Juniperus horizontalis. Soil reinforcement estimation by laboratory tests. *Catena*, *82*(3), 227–235. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.06.010

[12]. Danso, H., Martinson, D. B., Ali, M., & Williams, J. B. (2015). *Physical, Mechanical and Durability Properties of Soil Building Blocks Reinforced with Natural Fibres*.

[13]. Dasaka, S. M., & Sumesh, K. S. (2011). Effect of coir fiber on the stress-strain behavior of a reconstituted fine-grained soil. *Journal of Natural Fibers*, *8*(3), 189–204. https://doi.org/10.1080/15440478.2011.601597

[14]. Devi, D., & Jempen, B. (2016a). Shear Strength Behaviour of Bamboo Fiber Reinforced Soil. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net

[15]. Estabragh, A. R., Bordbar, A. T., & Javadi, A. A. (2013). A Study on the Mechanical Behavior of a Fiber-Clay Composite with Natural Fiber. *Geotechnical and Geological Engineering*, *31*(2), 501–510. https://doi.org/10.1007/s10706-012-9602-6

[16]. Evangelou, E. D., Markou, I. N., Verykaki, S. E., & Bantralexis, K. E. (2023). Mechanical Behavior of Fiber-Reinforced Soils under Undrained Triaxial Loading Conditions. *Geotechnics*, *3*(3), 874–893. https://doi.org/10.3390/geotechnics3030047

[17]. Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, *8*(1). https://doi.org/10.1186/s40703-017-0064-9

[18]. Ghasemi Nezhad, M., & Tabarsa, A. (2023a). An Experimental Study on the Mechanical Characteristics of Natural and Synthetic Fiber-Reinforced Sandy Soil in Pavement Construction. *Journal of Natural Fibers*, *20*(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2181266

[19]. Gowthaman, S., Nakashima, K., & Kawasaki, S. (2018a). A state-of-the-art review on soil reinforcement technology using natural plant fiber materials: Past findings, present trends and future directions. En *Materials* (Vol. 11, Número 4). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/ma11040553

[20]. Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2012). A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. En *Construction and Building Materials* (Vol. 30, pp. 100–116). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.045

[21]. Hejazi, S. M., Sheikhzadeh, M., Abtahi, S. M., & Zadhoush, A. (2013). Shear modeling of fiber reinforced soil composite on the base of fiber pull-out test. *Fibers and Polymers*, *14*(2), 277–284. https://doi.org/10.1007/s12221-013-0277-2

[22]. Iamchaturapatr, J., Piriyakul, K., & Petcherdchoo, A. (2022). Characteristics of sandy soil treated using EICP-based urease enzymatic acceleration method and natural hemp fibers. *Case Studies in Construction Materials*, *16*. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00871

[23]. Iravanian, A., & Haider, A. B. (2020). Soil Stabilization Using Waste Plastic Bottles Fibers: A Review Paper. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *614*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/614/1/012082

[24]. Kafodya, I., & Okonta, F. (2018a). Effects of natural fiber inclusions and pre-compression on the strength properties of lime-fly ash stabilised soil. *Construction and Building Materials*, *170*, 737–746. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.194

[25]. Kannan, G., & Sujatha, E. R. (2023). Effect of Nano Additive on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Soil. *Journal of Natural Fibers*, *20*(1). https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2143980

[26]. Kara, H. O. (2025). A Bibliometric Analysis of WOS Database Publications in the Field of Soil Improvement from 2020 to 2025. *Kastamonu University Journal of Engineering and Sciences*, *11*(1), 21–31. https://doi.org/10.55385/kastamonujes.1658529

[27]. Kravchenko, E., Liu, J., Niu, W., & Zhang, S. (2018). Performance of clay soil reinforced with fibers subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, *153*, 18–24. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.05.002

[28]. Kumar, N., Kandasami, R. K., & Singh, S. (2022). Effective utilization of natural fibres (coir and jute) for sustainable low-volume rural road construction – A critical review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 347). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128606

[29]. Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., & Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. En *Construction and Building Materials* (Vol. 111, pp. 719–734). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119

[30]. Lekha, B. M., Goutham, S., & Shankar, A. U. R. (2015). Evaluation of lateritic soil stabilized with Arecanut coir for low volume pavements. *Transportation Geotechnics*, *2*, 20–29. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.001

[31]. Lekha, K. R. (2004). Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilised slopes - A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, *22*(5), 399–413. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2003.12.003

[32]. Li, S., Wang, Z., & Stutz, H. H. (2023). State-of-the-art review on plant-based solutions for soil improvement. En *Biogeotechnics* (Vol. 1, Número 3). KeAi Communications Co. https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100035

[33]. Liu, B., Zhang, Z., Huang, X., Zhang, J., Cai, Y., Liu, X., & Tang, F. (2025). Effect of Straw Characterization on the Mechanical Behavior of Compacted Straw-Reinforced Soils. *Buildings*, *15*(9). https://doi.org/10.3390/buildings15091543

[34]. Liu, C., Lv, Y., Yu, X., & Wu, X. (2020). Effects of freeze-thaw cycles on the unconfined compressive strength of straw fiber-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, *48*(4), 581–590. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.03.004

[35]. Liu, Z., Naibi, W., & Qu, J. (2025). Mechanical properties and micromechanisms of natural fiber-modified saline soil. *Scientific Reports*. https://doi.org/10.1038/s41598-025-32424-w

[36]. Macías-Párraga, M., Echarri, F. J. T., Alonso-Pandavenes, O., & Garzón-Roca, J. (2025). Improvement of Expansive Soils: A Review Focused on Applying Innovative and Sustainable Techniques in the Ecuadorian Coastal Soils. En *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 15, Número 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/app15158184

[37]. Maliakal, T., & Thiyyakkandi, S. (2013). Influence of Randomly Distributed Coir Fibers on Shear Strength of Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, *31*(2), 425–433. https://doi.org/10.1007/s10706-012-9595-1

[38]. Marandi, S. M., Prof, A., Bagheripour, M. H., Rahgozar, R., & Zare, H. (2008a). Strength and Ductility of Randomly Distributed Palm Fibers Reinforced Silty-Sand Soils 1. *American Journal of Applied Sciences*, *5*(3), 209–220.

[39]. Md Zahri, A., & Zainorabidin, A. (2019). An overview of traditional and non traditional stabilizer for soft soil. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *527*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/527/1/012015

[40]. Medina-Martinez, C. J., Sandoval-Herazo, L. C., Zamora-Castro, S. A., Vivar-Ocampo, R., & Reyes-Gonzalez, D. (2022a). Natural Fibers: An Alternative for the Reinforcement of Expansive Soils. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Número 15). MDPI. https://doi.org/10.3390/su14159275

[41]. Mishra, M., Maheshwari, U. K., & Saxena, N. K. (2016). Improving Strength of Soil using Fiber and Fly ash-A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net

[42]. Nezhad, M. G., Tabarsa, A., & Latifi, N. (2021). Effect of natural and synthetic fibers reinforcement on California bearing ratio and tensile strength of clay. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *13*(3), 626–642. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.01.004

[43]. Nguyen, T. T., & Indraratna, B. (2023a). Natural Fibre for Geotechnical Applications: Concepts, Achievements and Challenges. En *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Número 11). MDPI. https://doi.org/10.3390/su15118603

[44]. Noriega Armas, Y. V., Vives Arroyo, J. A., & Muñoz Pérez, S. P. (2022). Uso de estabiliazadores de suelo: Una revisión del impacto al corte y asentamiento. *Avances Investigación en Ingeniería*, *19*(1 (Enero-Junio)). https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6856

[45]. Pachauri, S., Indu Priya, M., & Garg, A. (2019). Comparative analysis of strength characteristics of soil reinforced with coir and polypropylene fibers. En *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 14, pp. 355–361). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0559-7_40

[46]. Patil, L. B., Pusadkar, S. S., & Professor, A. (2019). Recent Advances in Engineering and Technology" SAMMANTRANA 19 Organized by Government College of Engineering. En *Nagpur International Journal of Innovations in Engineering and Science* (Vol. 4, Número 8). www.ijies.net

[47]. Paul, S., Islam, M. S., & Elahi, T. E. (2022). Comparative effectiveness of fibers in enhancing engineering properties of Earth as a building Material: A review. *Construction and Building Materials*, *332*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127366

[48]. Reza Tabakouei, A., Narani, S. S., Abbaspour, M., Aflaki, E., & Siddiqua, S. (2022a). Coupled specimen and fiber dimensions influence measurement on the properties of fiber-

reinforced soil. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *188*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110556

[49]. Rocio Hernández, I., Christian, I., & Gutierrez, C. (2015a). *Engineering Education Facing the Grand Challenges, What Are We Doing?*

[50]. Sharma, V., Vinayak, H. K., & Marwaha, B. M. (2015). Enhancing compressive strength of soil using natural fibers. *Construction and Building Materials*, *93*, 943–949. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.065

[51]. Shen, Y. shun, Tang, Y., Yin, J., Li, M. ping, & Wen, T. (2021). An experimental investigation on strength characteristics of fiber-reinforced clayey soil treated with lime or cement. *Construction and Building Materials*, *294*. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123537

[52]. Singh, H. P. (2013). Effects of Coir Fiber on CBR Value of Itnagar Soil. En *Research Article International Journal of Current Engineering and Technology*. http://inpressco.com/category/ijcet

[53]. Singh, H. P., & Bagra, M. (2007a). IMPROVEMENT IN CBR VALUE OF SOIL REINFORCED WITH JUTE FIBER. En *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* (Vol. 3297). www.ijirset.com

[54]. Sivakumar Babu, G. L., & Vasudevan, A. K. (2008a). *Seepage Velocity and Piping Resistance of Coir Fiber Mixed Soils*. https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94372008134:4485

[55]. Sivakumar Babu, G. L., & Vasudevan, A. K. (2008b). *Strength and Stiffness Response of Coir Fiber-Reinforced Tropical Soil*. https://doi.org/10.1061/ASCE0899-1561200820:9571

[56]. Soundara, B., & Senthil kumar K. P. (2015). *Effect of Fibers on Properties of Clay*. www.ijeas.org

[57]. Tiwari, N., Satyam, N., & Puppala, A. J. (2021a). Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers. *Transportation Geotechnics*, *29*. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100556

[58]. Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2018). Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. *Construction and Building Materials*, *178*, 204–210. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.104

[59]. Tran, K. Q., Satomi, T., & Takahashi, H. (2019). Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test. *Journal of Building Engineering*, *24*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100748

[60]. Vettorelo Juan J Clariá, P. V, & José Clariá, J. (2014a). Suelos Reforzados con Fibras: Estado del Arte y Aplicaciones. En *MARZO* (Vol. 1, Número 1).

[61]. Yadav, S. K., & Bag, R. (2023). Effect of Bamboo biochar on strength and water retention properties of low plastic clay and silty sand. *Scientific Reports*, *13*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-023-33466-8

[62]. Yang, B., & Jin, L. (2024a). Fractal Characteristics of Natural Fiber-Reinforced Soil in Arid Climate Due to Cracking. *Fractal and Fractional*, *8*(4). https://doi.org/10.3390/fractalfract8040209

[63]. Yang, H., Li, P., Yang, E., Jiang, X., & Chen, J. (2023). The strength law of coir fiber-reinforced soil based on modified Duncan-Chang model. *Frontiers in Earth Science*, *10*. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1078624

[64]. Yazici, M. F., & Keskín, N. (2021). Zeminlerin Doğal ve Sentetik Lifler ile Güçlendirilmesi Üzerine Bir Derleme Çalışması. *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, *14*(2), 631–663. https://doi.org/10.18185/erzifbed.874339

[65]. Yixian, W., Panpan, G., Shengbiao, S., Haiping, Y., & Binxiang, Y. (2016). Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute. *Geotechnical and Geological Engineering*, *34*(4), 1079–1088. https://doi.org/10.1007/s10706-016-0028-4

[66]. Zhang, J., Deng, A., & Jaksa, M. (2021a). Enhancing mechanical behavior of micaceous soil with jute fibers and lime additives. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *13*(5), 1093–1100. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.04.008

[67]. Zhao, Y., Yang, Y., Ling, X., Gong, W., Li, G., & Su, L. (2021). Dynamic behavior of natural sand soils and fiber reinforced soils in heavy-haul railway embankment under multistage cyclic loading. *Transportation Geotechnics*, *28*. https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100507