

3

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN

TÉCNICAS ECOLÓGICAS ALTERNATIVAS EN MEJORAMIENTO DE SUELOS - LA BIOCEMENTACIÓN

...

Fecha de recepción: 31/07/2025 | Fecha de aceptación: 08/08/2025

Autor(es):

*** Rosemary Janneth Llanque Ayala**

Universidad de Brasilia y Docente de Doctorado - UAJMS.

* Correspondencia del autor(es): jannethllanque@gmail.com



Técnicas Ecológicas Alternativas en Mejoramiento de Suelos - La Biocementación

Resumen:

El presente trabajo evalúa mediante una extensa revisión bibliográfica a la biocementación como método innovador y sostenible para el mejoramiento de suelos en ingeniería civil. Una revisión crítica de los métodos tradicionales y emergentes es realizada y asimismo, nuevas técnicas de mejoramiento de suelos son analizadas destacando la biocementación basada en la precipitación microbiana de carbonato de calcio inducida por *Sporosarcina pasteurii*. Se describen sus características microbiológicas, procedimiento experimental y ventajas ambientales frente a técnicas convencionales. Además, es propuesto un esquema biotecnológico para su implementación práctica, incluyendo cultivo bacteriano, preparación de medios, inyección e inmersión en suelo. Los resultados esperados esperan mejoras significativas en las propiedades mecánicas y reducción de los impactos ambientales, se destaca una potencial aplicación en infraestructuras viales y estabilización de taludes. Finalmente, se discuten consideraciones técnicas, ambientales y perspectivas futuras, la viabilidad y retos para la adopción industrial de esta tecnología ecológica es planteada como punto conclusivo, se destaca el gran avance que se tendría en relación a la contribución a la sostenibilidad y resiliencia de proyectos de mejoramiento de suelos.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y mejoramiento de suelos constituyen aspectos fundamentales en la ingeniería civil, dado que el suelo es el material de construcción más abundante y el soporte primario de toda infraestructura, incluidas edificaciones, vías, puentes y otras obras civiles. Un análisis riguroso de las propiedades físicas, mecánicas y geológicas del suelo, mediante estudios extensivos de mecánica de suelos, resulta indispensable para determinar la capacidad portante del terreno y seleccionar el tipo apropiado de cimentación, a fin de evitar fallas estructurales y problemas referentes a asentamientos diferenciales o licuación (Duque *et al.*, 2022), (Terzaghi *et al.*, 1996).

Históricamente, los métodos tradicionales de mejoramiento del suelo, como la estabilización química con cal y cemento o la compactación mecánica, han sido implementados para incrementar la resistencia y estabilidad del terreno. No obstante, estas técnicas presentan limitaciones significativas, especialmente en términos de impacto ambiental, debido a su elevada huella de carbono y la generación potencial de contaminantes (Bahadori, 2016). La creciente necesidad de soluciones sostenibles y eficientes ha motivado el desarrollo y la adopción de nuevas tecnologías con menor impacto ecológico.

Entre estas innovaciones se destaca la biocementación, técnica ecológica que se fundamenta en la precipita-

ción microbiana de carbonato de calcio inducida por microorganismos específicos, en particular la bacteria *Sporosarcina pasteurii*. Mediante un proceso bioquímico, esta técnica incrementa la cohesión y rigidez del suelo sin la necesidad de materiales cementantes tradicionales, minimizando así el impacto ambiental (De Jong *et al.*, 2006), (Achal y Pan, 2010).

El presente estudio tiene como objetivo exponer detalladamente la biocementación como un método ecológico y eficiente para el mejoramiento de suelos, efectuando un análisis comparativo con métodos tradicionales y emergentes, y proponiendo un esquema metodológico para su aplicación práctica en obras de ingeniería civil, sustentado en evidencias científicas y avances tecnológicos recientes.

2. MÉTODOS TRADICIONALES DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

El mejoramiento de suelos ha sido una disciplina central en la ingeniería civil para garantizar la estabilidad y capacidad portante de las cimentaciones. Tradicionalmente, estas técnicas han buscado incrementar la resistencia mecánica y mejorar las propiedades físicas del suelo, mediante métodos físicos y químicos ampliamente validados desde mediados del siglo XX y que continúan siendo base fundamental en obras civiles alrededor del mundo.

Entre los métodos convencionales más utilizados destacan la estabilización con cal y cemento, la compactación mecánica, y la densificación por vibroflotación o columnas de grava. La estabilización química con cal o cemento consiste en aditar materiales cementantes que alteran la estructura mineralógica del suelo, incrementando la resistencia al corte y reduciendo la plasticidad y la compresibilidad. Investigaciones recientes confirman la vigencia y eficacia de estos métodos para

suelos arcillosos y limosos en proyectos de ingeniería civil; sin embargo, su uso implica un considerable consumo energético y una significativa emisión de gases de efecto invernadero, lo que genera un impacto ambiental relevante asociado con la producción del cemento y la activación química de la cal (Barrios *et al.*, 2021), (Torres *et al.*, 2023).

La compactación mecánica, mediante rodillos vibratorios o equipos especializados, busca reducir la porosidad del suelo suelto para aumentar la densidad relativa y la capacidad de carga. A pesar de su sencillez, efectividad y uso extendido en la ingeniería moderna, esta técnica es limitada en su aplicación para suelos saturados y cohesivos profundos, donde resultan insuficientes para controlar asentamientos diferenciales y posibles licuaciones (Ishihara, 2015).

La vibroflotación o el refuerzo con columnas de grava representa otro método tradicional para suelos granulares, logrando mejorar la densidad y disminuir la permeabilidad al introducir columnas compactadas o incluir materiales rígidos que actúan como inclusiones que distribuyen las cargas. Tal técnica sigue vigente en el diseño de estructuras ligeras, tanto urbanas como infraestructurales, pero requiere equipos especializados y puede ser de alto costo en zonas con accesibilidad limitada (Torres *et al.*, 2023).

Cabe destacar que, paralelamente, las investigaciones han señalado limitaciones cruciales en la sostenibilidad de estos métodos, destacando la necesidad de reducir el consumo energético y la huella ambiental asociada, aspectos que han impulsado la búsqueda de tecnologías alternativas o complementarias más ecológicas en los últimos años (Barrios *et al.*, 2021), (Bahadori, 2016).

La Tabla 1 muestra el resumen de las ventajas y desventajas de los métodos tradicionales de mejoramiento de suelos.

Tabla 1. Resumen de los métodos tradicionales de mejoramiento de suelos

Método	Objetivos	Resultados Esperados	Ventajas	Desventajas
1	Incrementar resistencia al corte y reducir plasticidad y compresibilidad	Suelos más rígidos, mayor capacidad portante	Técnica ampliamente conocida y aplicada; mejora duradera	Alta huella de carbono; consumo energético elevado; posible contaminación
2	Aumentar densidad relativa y reducir porosidad	Reducción de asentamientos y mayor capacidad de carga	Método sencillo, económico y rápido	Limitado en suelos saturados o cohesivos profundos
3	Mejorar densidad del suelo granular y distribuir cargas	Suelos densificados, reducción de licuación y asentamientos	Efectivo para suelos arenosos, mejora la permeabilidad	Requiere equipos especializados, costo elevado y accesibilidad limitada
4	Consolidar suelos blandos con cargas previas para anticipar asentamientos	Disminución de asentamientos post-construcción	Método natural y probado	El proceso puede ser lento y requiere espacio para cargas
5	Acelerar consolidación de suelos saturados eliminando agua	Aumento de resistencia, reducción de licuación y asentamientos	Facilita consolidación rápida y eficiente	Puede ser costoso y depende del tipo de suelo

Siendo: 1 el método de estabilización con cal y cemento, 2 = compactación mecánica, 3 = vibroflotación y columnas de Grava, 4 = precarga o sobrecarga y 5 = drenaje vertical (mechas drenantes).

3. NUEVOS MÉTODOS DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

En la última década, la ingeniería civil ha experimentado una evolución significativa en el mejoramiento de suelos, impulsada por la necesidad de superar las limitantes ambientales y operativas de las técnicas tradicionales. Este avance se centra en estrategias sostenibles y eficientes que integran tecnologías avanzadas y biotecnológicas para responder a la demanda global de infraestructura resiliente y con baja huella ambiental.

Entre los métodos emergentes que han recibido mayor atención y desarrollo reciente se destacan:

Columnas de módulo controlado e inclusiones rígidas, que consisten en la inserción vertical de elementos de mortero o concreto que refuerzan la matriz del terreno, actuando como materiales compuestos de baja compresibilidad. Esto permite cimentaciones superficiales eficientes en suelos tradicionalmente no aptos, reduciendo la necesidad de excavaciones profundas y acelerando el proceso constructivo (Barzegar *et al.*, 2020).

Deep Soil Mixing (DSM), técnica que mezcla in situ el suelo con aglutinantes hidráulicos mediante equipos mecánicos especializados, formando columnas con propiedades mecánicas mejoradas. DSM reduce el uso de materiales de relleno y es apto para contextos urbanos densos con bajas vibraciones y contaminaciones (Vidal *et al.*, 2023).

Jet Grouting, método avanzado que pulveriza lechadas cementantes a alta presión para consolidar el suelo in situ en columnas altamente resistentes, empleado en cimentaciones, túneles y obras subterráneas, particularmente en terrenos blandos o saturados (Leonards, 2021).

Inyecciones por fracturación hidráulica, donde se fractura el terreno con inyección controlada de lechadas para rellenar fisuras con morteros o polímeros, produciendo soluciones suelo-fractura con alta resistencia y aplicabilidad en una amplia gama de suelos y rocas blandas (Wang y Zhang, 2020).

Materiales carbonosos y bioproductos innovadores, como el aditivo Maxan, que optimizan la retención de agua y nutrientes, contribuyendo a la sustentabili-

dad ambiental y a la recuperación de suelos degradados (Maxan, 2025).

Biocementación y biotecnología aplicada, la innovación más destacada, que utiliza microorganismos como *Sporosarcina pasteurii* para inducir la precipitación bioquímica de carbonato de calcio, generando un biocemento capaz de consolidar suelos granulares. Además, la liofilización bacteriana ha permitido mejorar la conservación y el transporte de estas bacterias para su

uso en campo, facilitando aplicaciones ecológicas y de bajo impacto ambiental en obras civiles (Gupta *et al.*, 2025), (Yepes, 2021).

La Tabla 2 muestra un resumen de las principales características de los recientes métodos de mejoramiento de suelos, destaca los objetivos de cada método, los resultados esperados en su aplicación, así también destaca las principales ventajas de su aplicación como también las desventajas en el procedimiento de implementación.

Tabla 2. Resumen de los nuevos métodos de mejoramiento de suelos

Mét.	Objetivos	Resultados Esperados	Ventajas	Desventajas
1	Incrementar resistencia al corte, reducir plasticidad y compresibilidad	Suelos más rígidos, con mayor capacidad portante	Técnica reconocida, duradera y bien estudiada	Alta huella de carbono, consumo energético y posibles contaminantes asociados
2	Aumentar densidad relativa y reducir porosidad	Reducción de asentamientos, mejor capacidad de carga	Económico, sencillo y rápido	Limitado en suelos saturados y cohesivos profundos
3	Mejorar densidad y capacidad portante de suelos granulares	Suelos densificados, menor riesgo de licuación	Efectivo para suelos arenosos, mejora la permeabilidad	Costoso, equipos especializados, limitado en accesibilidad
4	Consolidar suelos blandos mediante carga previa para anticipar asentamientos	Disminución de asentamientos post-construcción	Método natural, probado e intuitivo	Lento, requiere espacio para colocar cargas
5	Acelerar consolidación extrayendo agua del suelo saturado	Incremento de resistencia y estabilidad, reducción de licuación	Acelera procesos naturales, mejora estabilidad rápidamente	Costoso, variable según tipo de suelo
6	Reforzar terreno para permitir cimentaciones superficiales en suelos de baja capacidad	Incremento de rigidez y capacidad portante	Reduce necesidad de pilotes profundos, método económico y rápido	Requiere equipo especializado, costo significativo
7	Mezclar suelo in situ con aglutinantes hidráulicos para mejorar propiedades	Formación de columnas con alta resistencia mecánica	Adaptable a zonas urbanas densas, menor impacto ambiental que excavación tradicional	Equipamiento complejo y costo elevado
8	Consolidar el suelo mediante inyección a alta presión de lechadas cementantes	Columnas de suelo-cemento impermeables y resistentes	Efícaz en suelos saturados y blandos, impermeabiliza el terreno	Técnica costosa y requiere maquinaria especializada
9	Fracturar y consolidar suelos con morteros o polímeros	Suelos con mayor cohesión y resistencia al corte	Aplicable a diversos tipos de suelo, rápida consolidación	Riesgo de fractura excesiva, costos de operación
10	Optimizar retención de agua y nutrientes, mejorar propiedades físicas del suelo	Suelos más fértiles, estables y sostenibles	Promueven la sustentabilidad ambiental, multifuncionales	Tecnología emergente con menor adopción industrial actual

Mét.	Objetivos	Resultados Esperados	Ventajas	Desventajas
11	Inducir precipitación microbiana de carbonato de calcio para consolidar suelos	Aumento significativo de resistencia y rigidez del suelo	Muy baja huella de carbono, técnica ecológica, adaptable a diferentes suelos	Tiempo de proceso variable (días a semanas), manejo especializado de microorganismos

Siendo, 1=Estabilización con cal y cemento, 2=Compactación mecánica, 3=Vibroflotación y columnas de grava, 4=Precarga o sobrecarga, 5=Drenaje vertical, 6=Columnas de módulo controlado e inclusiones rígidas, 7=Deep Soil Mixing (DSM), 8=Jet Grouting, 9=Inyecciones por fracturación hidráulica, 10=Mejoradores carbonosos y bioproductos, 11=Biocementación (*Microbiologically Induced Calcite Precipitation - MICP*).

3.1. La biocementación como nuevo método ecológico

La biocementación es una técnica innovadora para el mejoramiento de suelos que se basa en la precipitación microbiana de carbonato de calcio (CaCO₃), capaz de consolidar y mejorar las propiedades mecánicas del suelo sin el uso intensivo de materiales cementantes tradicionales ni métodos agresivos para el ambiente. Esta técnica utiliza principalmente la bacteria *Sporosarcina pasteurii*, la cual tiene características microbiológicas y bioquímicas que permiten la producción eficiente de biocemento mediante la hidrólisis de urea y la posterior precipitación química de carbonato de calcio.

El proceso bacteriano (Hogg, 2005) generalmente se presenta en forma exponencial hasta agotar los nutrientes presentes alrededor de las bacterias, generalmente se desarrollan las siguientes fases:

1. Fase I (latente) – la etapa en la cual se adaptan al ambiente. El tiempo de duración de esta fase dependerá de la edad y salud de las bacterias, en esta fase no existe aumento del número de bacterias, sin embargo, las células están activas.
2. Fase II (crecimiento logarítmico o exponencial) – se caracteriza por la multiplicación de las células causadas por la división por división binaria y como consecuencia habrá un crecimiento exponencial.
3. Fase III (estacionaria) – el aumento del número de bacterias es nivelado por la muerte de otras, en esta etapa existe una nivelación entre el incremento y muerte de células dejando neutro la variación de la población bacteriana.
4. Fase IV (muerte) – las bacterias comienzan a morir en mayor número debido a la falta de nutrientes y acumulación de restos tóxicos.

La Figura 1 muestra la curva de crecimiento bacteriano que siguen generalmente las bacterias.

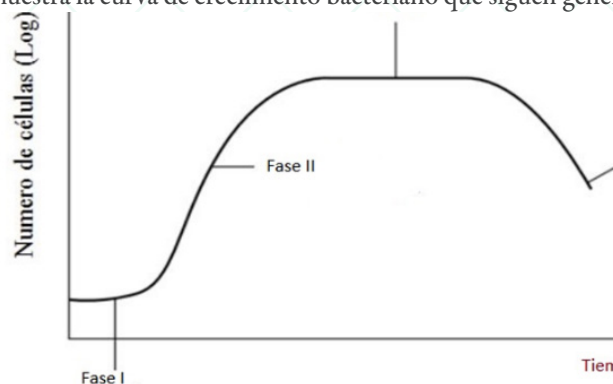
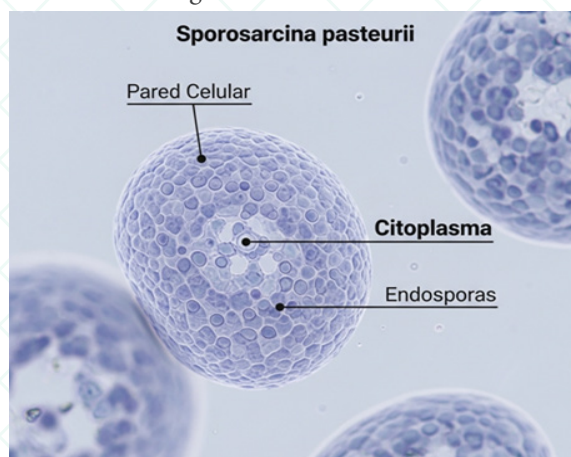


Fig. 1 Curva de crecimiento bacteriano (modificado de Hogg, 2005)

Sporosarcina pasteurii es una bacteria grampositiva, alcalófila y no patógena, residente natural en suelos y sedimentos alcalinos, con un rango óptimo de pH entre 8 y 10 y una temperatura de crecimiento preferida entre 25 °C y 37 °C (Bascauán, 2022), (Achal y Zhang, 2016). Su principal atributo es la producción de la enzima ureasa, que cataliza la descomposición de la urea en amoníaco (NH₃) y carbonato (CO₃²⁻), lo que incrementa el pH local y favorece la precipitación de CaCO₃ en presencia de iones calcio (Ca²⁺) (Achal y Zhang, 2016), (Santamaría *et al.*, 2024). El CaCO₃ actúa como un cemento natural que une las partículas del suelo, aumentando su resistencia y rigidez (DeJong *et al.*, 2006).

La Fig. 2 muestra a la bacteria y sus características principales, esta bacteria puede producir cantidades significativas de biocemento en tiempos relativamente cortos, y es adaptable a suelos granulares y mezclas tipo mortero, con cultivos que pueden ser optimizados bajo condiciones controladas en laboratorio (Gupta *et al.*, 2023).

Fig. 2 Bacteria de estudio.



3.2. Procedimiento del método de biocementación

Cultivo y preparación bacteriana: Se cultiva *Sporosarcina pasteurii* en medios nutritivos que contienen urea y fuentes de nitrógeno, bajo condiciones aeróbicas y temperatura controlada (alrededor de 30 °C), para obtener altas concentraciones celulares (Gupta *et al.*, 2025).

Preparación del medio de cementación: Se prepara una solución que contiene calcio (usualmente cloruro de calcio) y urea para proveer los sustratos necesarios para la actividad ureolítica (Santamaría *et al.*, 2024).

Aplicación en el suelo: Las soluciones bacterianas y el medio de cementación se inyectan o mezclan en el suelo, en aplicaciones in situ o en muestras experimentales, favoreciendo la interacción bacteriana con las partículas del terreno (DeJong *et al.*, 2024), (Vidal y Andreu, 2023).

Inducción de precipitación: La ureasa cataliza la descomposición de la urea, elevando el pH local y promoviendo la formación de cristales de carbonato de calcio que se depositan entre los granos del suelo, formando una matriz consolidada (Achal y Zhang, 2016), (Yépez, 2021).

Tiempo de reacción: Aunque la precipitación inicial comienza en cuestión de horas, la consolidación mecánica efectiva y la máxima producción de biocemento ocurre en un rango de 3 a 14 días, dependiendo de variables como concentración bacteriana, tipo de suelo, condiciones ambientales y dosis empleadas (Muyneck *et al.*, 2010).

Evaluación del mejoramiento: Se emplean ensayos mecánicos tales como compresión uniaxial, resistencia al corte y permeabilidad para medir las mejoras en las propiedades del suelo tratado.

La Tabla 3 muestra un resumen de las principales ventajas y desventajas del proceso de biocementación, claramente se destacan ventajas ambientales en su implementación, sin embargo, las limitaciones convertidas en desventajas radican principalmente en el tiempo requerido para obtener resultados, dependencia de condiciones ambientales, la necesidad de contar con personal especializado en el manejo microbiológico.

Tabla 3. Ventajas y desventajas del proceso de biocementación

Ventajas	Desventajas
Sostenibilidad ambiental	Tiempo para alcanzar resultados
Bajo impacto ambiental y químico	Necesidad de manejo microbiológico especializado
Adaptabilidad a varios tipos de suelos	Dependencia de condiciones ambientales
Durabilidad y mejora progresiva	Generación de amoniaco
Capacidad de auto regeneración	

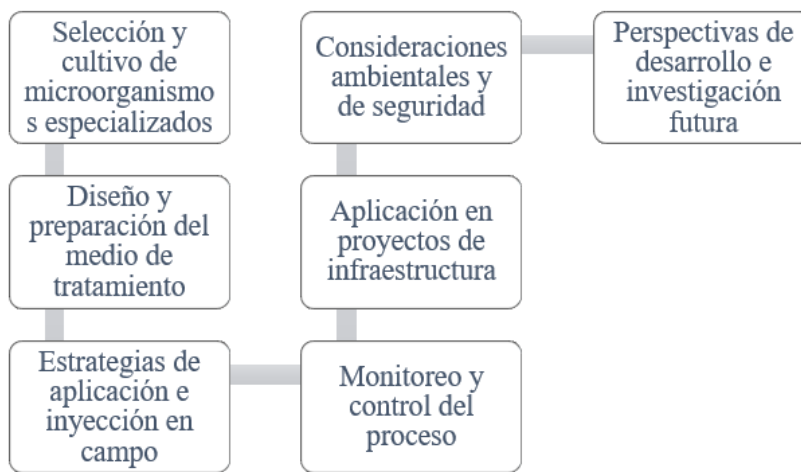
4. PROPUESTA PARA EL USO DE LA BIOTECNOLOGÍA EN EL MEJORAMIENTO DE SUELOS

La biotecnología aplicada al mejoramiento de suelos ofrece una alternativa eficiente, sostenible y ambientalmente amigable frente a métodos tradicionales. Su objetivo principal es emplear microorganismos, procesos metabólicos y productos biológicos para modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del terreno, aumentando la capacidad portante, estabilidad y fertilidad sin impactos ambientales adversos significativos. En el ámbito de la ingeniería civil, la propuesta para el

uso de la biotecnología se centra en la optimización y aplicación controlada de microorganismos, particularmente el método de biocementación mediado por bacterias ureolíticas, para incrementar la capacidad portante, reducir la deformabilidad y controlar la permeabilidad de diferentes tipos de suelos (DeJong *et al.*, 2010), (Aziz *et al.*, 2021), (Orozco, 2020).

La Figura 3 muestra las etapas consideradas para el uso de la biotecnología en el mejoramiento de suelos. Estas etapas comienzan con la selección de los cultivos y microorganismos, se prepara el medio y estrategias de inyección con las consideraciones ambientales y de seguridad respectivas.

Fig. 3 Etapas propuestas para el uso de la biotecnología como método alternativo



La propuesta consiste en el desarrollo de siete etapas:

- ▶ Selección y cultivo de microorganismos especializados

El primer eslabón del proceso es la selección de cepas bacterianas de alta eficiencia, fundamentalmente *Sporosarcina pasteurii*, reconocida por su capacidad de producir grandes cantidades de ureasa, catalizando la hidrólisis de urea e induciendo la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) (DeJong *et al.*, 2010), (Orozco, 2020), (Bahuguna, 2022). El cultivo de estas cepas a escala de laboratorio o bioreactores exige condiciones precisas de pH, temperatura (25–37°C) y nutrientes, con monitoreos periódicos para asegurar la viabilidad y actividad enzimática óptima (Orozco, 2020), (Zhang y Zhang, 2016).

- ▶ Diseño y preparación del medio de tratamiento

Los medios para la biocementación incluyen soluciones de urea y una fuente de calcio, generalmente cloruro de calcio. Es esencial el ajuste de concentraciones para maximizar la eficiencia y minimizar efectos secundarios como la acumulación de amoníaco, que puede convertirse en un desafío ambiental si no se gestiona cuidadosamente (Orozco, 2020), (Bang *et al.*, 2010), (Bahuguna, 2022). Se recomienda realizar pruebas piloto para definir las dosis y secuencias de aplicación óptimas conforme al tipo de suelo y condiciones locales (Orozco, 2020), (Roy *et al.*, 2025).

- ▶ Estrategias de aplicación e inyección en campo

La inoculación y tratamiento del suelo pueden realizarse mediante inyección directa de la suspensión bacteriana y el medio reactivo en sitios específicos o por mezclado *ex situ* seguido de compactación (Aziz *et al.*, 2021), (Orozco, 2020), (Bang *et al.*, 2010). El control de caudales y la distribución homogeneizada son factores críticos para asegurar la penetración y retención de bacterias activas, así como la uniformidad en la distribución del biocemento generado (Zhang y Zhang, 2016), (Ahmad *et al.*, 2025). Estudios recientes

demuestran factibilidad a escala de laboratorio y en columnas de hasta 1.5 m de altura, alcanzando resistencias suficientes para aplicaciones técnicas geotécnicas y viales (Zhang y Zhang, 2016).

- ▶ Monitoreo y control del proceso

El monitoreo constante de parámetros clave, como concentración bacteriana, pH, contenido de Ca^2 y avance de la cementación, es esencial para garantizar la eficiencia y reproducibilidad del proceso (Orozco, 2020), (Aziz *et al.*, 2021), (Zhang *et al.*, 2023), (Roy *et al.*, 2025). Se recomienda la integración de técnicas digitales y ensayos mecánicos posteriores, incluyendo pruebas de resistencia a compresión y permeabilidad, para validar la mejora lograda en el terreno tratado (Orozco, 2020), (Zhang y Zhang, 2016).

- ▶ Aplicación en proyectos de infraestructura

El uso de tecnologías de biocementación se presenta como una alternativa viable y sustentable en obras de infraestructura vial, estabilización de taludes, y refuerzo de cimentaciones superficiales, especialmente en suelos arenosos y susceptibles a licuación (Orozco, 2020), (Ahmad *et al.*, 2025), (Ben, 2024). La escalabilidad de la técnica es prometedora, con investigaciones recientes que aportan soluciones para la producción en lotes de hasta 900 L sin contaminación, y protocolos de inyección replicables para escalas de obra civil (Zhang y Zhang, 2016).

- ▶ Consideraciones ambientales y de seguridad

Es fundamental el diseño de protocolos orientados a la gestión adecuada del amoníaco generado y la evaluación de potenciales riesgos asociados a escapes bacterianos o impactos sobre acuíferos y ecosistemas circundantes (DeJong *et al.*, 2010), (Zhang y Zhang, 2016), (Roy *et al.*, 2025). La formación de personal técnico calificado en biotecnología de suelos es igualmente imperativa para la correcta implementación y seguimiento de los procesos.

► **Perspectivas de desarrollo e investigación futura**

Es necesario continuar explorando la integración de nuevos materiales bioactivos, el perfeccionamiento de cepas bacterianas mediante ingeniería genética y la automatización de procesos de monitoreo e inyección para lograr mayor eficiencia, control y reducción de costes. Además, el estudio de la durabilidad a largo plazo y la evaluación del desempeño en condiciones extremas seguirá siendo prioritario para la adopción generalizada de estas tecnologías en ingeniería civil y ambiental (DeJong *et al.*, 2010), (Orozco, 2020), (Zhang y Zhang, 2016), (Roy *et al.*, 2025).

5. RESULTADOS ESPERADOS

La aplicación de la biocementación como técnica ecológica para el mejoramiento de suelos genera resultados esperados que impactan significativamente las propiedades físicas, mecánicas y ambientales del terreno tratado. Diversos estudios experimentales y de campo indican que la incorporación de bacterias ureolíticas, principalmente *Sporosarcina pasteurii*, y la subsecuente precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) mejoran de forma considerable la estabilidad y funcionalidad del suelo.

En particular, se espera una disminución significativa de los espacios vacíos en suelos granulares no cohesivos, lo que conduce a un incremento del peso específico relativo del suelo tratado. Investigaciones reportan aumentos de hasta 13.6% en el peso específico relativo, asociado a la reducción de la porosidad y mayor compactación inducida por el biocemento generado (Lugreda *et al.*, 2020). Paralelamente, la precipitación microbiana de CaCO_3 incrementa la cohesión interna del suelo y el ángulo de fricción efectiva, elementos críticos para la resistencia al corte y la capacidad portante del terreno, con aumentos de cohesión que pueden alcanzar valores del orden de 0.17 MPa, según estudios en condiciones controladas (Lugreda *et al.*, 2020), (Achal *et al.*, 2016).

La permeabilidad del suelo tratado disminuye notablemente, en rangos reportados de reducción de entre un 9.5% a 22.7%, contribuyendo a la mejora en el comportamiento hidráulico, reducción de la erosión y mitigación de fenómenos como la licuación, especialmente en suelos arenosos saturados (Lugreda *et al.*, 2020), (Vidal *et al.*, 2023). Estas modificaciones físicas y químicas son acompañadas por un aumento del pH del suelo debido a la actividad bacteriana y la liberación de amoníaco, estabilizándose en rangos alcalinos óptimos para el proceso bioquímico (Lugreda *et al.*, 2020).

Además, el tratamiento biocementante conduce a incrementos en parámetros mecánicos medibles a corto y mediano plazo. Ensayos de resistencia a compresión simple y esfuerzos cortantes muestran mejoras significativas en comparación con muestras no tratadas, evidenciando mayor rigidez y resistencia estructural adecuada para aplicaciones en cimentaciones superficiales y estabilidad de taludes (Achal *et al.*, 2016), (Roy *et al.*, 2025). La durabilidad del efecto de la biocementación también ha sido evaluada, demostrando que el carbonato precipitado se conserva y mantiene la integridad estructural por períodos prolongados, compatible con las exigencias normales de obras civiles (Roy *et al.*, 2025).

En términos ambientales, la aplicación de la biocementación ofrece ventajas respecto a métodos convencionales, con una huella de carbono menor y reducción en residuos y contaminantes asociados a estabilizantes químicos. Si bien se observa la generación de amoníaco como producto metabólico del proceso, varias investigaciones apuntan que su manejo y dispersión son controlables mediante protocolos de inyección y ventilación adecuados, minimizando impactos negativos en el entorno (Achal *et al.*, 2016), (Gupta *et al.*, 2025).

Los resultados esperados posicionan a la biocementación como una técnica viable y prometedora para mejorar suelos en proyectos de ingeniería civil, con aplicaciones potenciales en:

- ▶ Fundaciones y subrasantes en infraestructuras viales, ofreciendo mayor capacidad portante y reducción de asentamientos diferenciales.
- ▶ Control y mitigación de la licuación en zonas sísmicas con suelos saturados.
- ▶ Estabilización y reforzamiento de taludes y superficies erosionadas.
- ▶ Reparación y protección ambiental en estructuras de concreto mediante procesos bioquímicos de autogeneración.

En resumen, la biocementación produce mejoras sustanciales y medibles en propiedades físicas, geotécnicas y ambientales del suelo, avaladas por estudios experimentales recientes. Sin embargo, el éxito práctico del método depende de un control riguroso en la dosificación bacteriana, las condiciones de aplicación y el monitoreo continuo, para alcanzar la eficiencia y durabilidad requeridas en obras civiles.

6. REFERENCIAS

- ▶ Achal B. y Y.-H. Pan, (2010). "Biocalcification by *Bacillus pasteurii* urease: a novel application in restoration of cement mortar," *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 242-247, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.08.003.
- ▶ Achal R., Y.-H. Pan, y J. Zhang, (2016). "Microbially induced calcite precipitation: a promising biotechnological method for soil improvement," *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 100, pp. 3563–3577, 2016.
- ▶ Ahmad S., M. N. Khan y T. K. Khan, (2025). "Assessing the effectiveness of microbial-induced calcite precipitation as a sustainable and eco-friendly ground improvement technique," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 22, pp. 309–321, 2025.
- ▶ Aziz S.S., A. H. Akbar y M. K. Hossain, (2021). "Microbial-induced calcite precipitation: A milestone towards soil improvement," *Malaysian Applied Biology*, vol. 50, no.1, pp. 11–27, 2021.
- ▶ Bahadori A. S. (2016), "Sustainable Construction Materials and Technologies", Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.
- ▶ Bahuguna, A. (2022). "The use of microbial technology to soil stabilization," *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, vol. 71, no. 2, pp. 609–616.
- ▶ Bang S., J. Galinat y V. Ramakrishnan, (2010). "Application of *Sporosarcina pasteurii* for Fugitive Dust Control," *Journal of Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, vol. 14, no. 2, pp. 81–89, 2010.
- ▶ Barrios M.A.S., D. R. Morales, y J. C. Alarcón, (2021). "Estabilización y mejoramiento de suelos con adición de cemento y cal: una revisión actualizada," *Revista Ingeniería y Desarrollo*, vol. 39, no. 2, pp. 45–59, 2021, doi: 10.19053/01211129.v39.n2.2021.11514.
- ▶ Barzegar M., S. Mostofinejad, y M. Khalili, (2020). "Controlled modulus columns for soil improvement: A state-of-the-art review," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 275-289, 2020, doi:10.1016/j.jrmge.2019.12.001.
- ▶ Bascuñán, A. (2022) "Estabilización de suelos con bacterias *Sporosarcina pasteurii*," Memoria de Título, Universidad Católica de Chile.
- ▶ Bell P.J., (2018). *Foundation Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill, 2018..
- ▶ Bem M.N., (2024). "Advancing slope stability and hydrological solutions through biocementation,"

- Hydrology, vol. 12, no. 1, pp. 14–27, 2024.
- ▶ De Muynck G., N. De Belie, y W. Verstraete, (2010). “Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review,” *Ecological Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 118–136, 2010.
 - ▶ DeJong A., M. Fritzges, y K. Nüsslein, (2006) “Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 11, pp. 1381–1392, 2006.
 - ▶ DeJong J.T., M. B. Fritzges, and K. Nüsslein, (2010). “Bio-mediated soil improvement,” *Ecological Engineering*, vol. 36, pp. 197–210, 2010.
 - ▶ DeJong S., M. Fritzges, y K. Nüsslein, (2006). “Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear,” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 132, no. 11, pp. 1381-1392, Nov. 2006, doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381).
 - ▶ Duque Escobar G., R. Hernández, y M. Parra, (2022). “Introducción a la mecánica de suelos”, 1ª ed. Lima, Perú: Universidad Tecnológica del Perú, 2022.
 - ▶ Gupta M. et al., (2025). “Innovative bacterial lyophilization for sustainable soil reinforcement and concrete repair,” *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 17, no. 9, pp. 12345–12356, 2025, doi:10.1021/acsami.5b00123.
 - ▶ Hogg, S. (2005). *Essential Microbiology*. Wiley. Inglaterra. 468 p.
 - ▶ Ishihara K., (2015). “Soil behavior in earthquake geotechnics,” Oxford University Press, 2015.
 - ▶ Leonards G.A., (2021). “Jet grouting: advancements and applications for soft soil stabilization,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 110, pp. 103813, 2021.
 - ▶ Lugreda A. et al., (2020). “Estabilización de suelos granulares no cohesivos aplicando bacterias calcificantes,” *Revista UCV HACER*, vol. 9, no. 2, pp. 37–43, Apr.-Jun. 2020.
 - ▶ Maxan, 2025. “Una nueva tecnología para el mejoramiento de los suelos agrícolas.” Congreso Aapresid. Disponible en: <https://www.aapresid.org.ar>.
 - ▶ Morrison V.L., M.T. Vance, M. L. M. Grogger, H. G. Grover y J. J. Steel, (2025). “Producción y análisis de ladrillos de biocemento con *Sporosarcina pasteurii*,” *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*, 2025.
 - ▶ Orozco N., (2020). “Estabilización de suelos con bacterias *Sporosarcina pasteurii*,” Tesis Doc., Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.
 - ▶ Roy S.S. et al., (2025). “Biocementation beyond the Petri dish, scaling up to 900 L batches for real-world geotechnical projects,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 2025, Art. no. 87074.
 - ▶ Roy S.S. et al., (2025). “Biocementation scaling up to 900 L batches for real-world geotechnical projects,” *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 2025, Art. no. 87074.
 - ▶ Santamaría G. D., J. C. Palacio, y A. Gutiérrez, (2024). “Aplicación de la biocementación en mejoramiento de suelos arenosos para fundaciones,” *Revista Ingeniería Civil*, vol. 45, no. 2, pp. 101–114, 2024.
 - ▶ Teneva E.I., (2020). “Estabilización de suelos con bacterias *Sporosarcina pasteurii*,” Tesis Digital, Universidad de Catalunya, 2020.
 - ▶ Terzaghi H.M., R. B. Peck, y G. Mesri, (1996). “Soil Mechanics in Engineering Practice”, 3rd ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 1996.

- ▶ Torres J.A., R. L. Martínez, y P. G. Sánchez, (2023). “Tecnologías tradicionales y contemporáneas para el mejoramiento de suelos granulares,” Ingeniería Civil, vol. 27, no. 1, pp. 15–26, 2023.
- ▶ Vidal J.F., R. Josa, y J. Andreu, (2023). “Deep soil mixing for ground improvement: state of the art and recent developments,” Geotechnical Engineering Journal, vol. 160, no. 3, pp. 1-12, 2023.
- ▶ Wang L., X. Zhang, y Z. Zhang, (2020). “Hydraulic fracturing grouting for soil improvement: mechanisms and applications,” Engineering Geology, vol. 275, pp. 105771, 2020.
- ▶ Yepes V., (2021). “Métodos biológicos como técnica de mejora de terrenos,” Universidad Politécnica de Valencia, 2021. Disponible en: <https://www.upv.es/blog/vyepes>
- ▶ Zhang M.X. et al., (2023). “Recent development on optimization of bio-cementation for soil stabilization and wind erosion control,” Sustainable Environment Research, vol. 33, no. 4, 2023.
- ▶ Zhang Z., J. Cui y Y. Zhang, (2016). “Biological process of soil improvement in civil engineering: A review,” Geotechnical Engineering, vol. 28, pp. 45–67, 2016.