
Técnicas actuales y tendencias para la mejora de la capacidad portante de suelos con aditivos

Current techniques and trends for improving the bearing capacity of soils with additives

Ronald Omar Collantes Díaz^{1*}  Luis Alberto Orbegoso Navarro¹ 

¹ Universidad Nacional Autónoma de Chota (UNACH), Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Ciudad Universitaria Colpamatara, 06120, Chota, Cajamarca, Perú.

*Autor de correspondencia: [email: 2013050133@unach.edu.pe]

RESUMEN

La capacidad de carga de los suelos de cimentación es de suma importancia en la construcción de cualquier estructura. En ese sentido, esta revisión de literatura da a conocer las técnicas actuales y tendencias emergentes para mejorar la capacidad portante mediante el uso de aditivos. Se describen prácticas convencionales respecto al empleo de aditivos químicos, como la cal y el cemento, y la utilización de residuos industriales como el caucho granular proveniente de neumáticos desechados. Se destacan los porcentajes típicos de aplicación de estos aditivos y los incrementos de la capacidad portante que pueden lograrse, con el cemento tipo I o tipo V aplicado en suelos finos y arenosos, con un aumento potencial de hasta un 350%. Asimismo, se explora el uso de la cal hidratada o viva en suelos arcillosos o limosos, y del caucho granular en suelos areno-limosos y arcillosos. Además, se analizan innovaciones que representan tendencias prometedoras en este campo, como el uso de nanomateriales, geosintéticos avanzados y aditivos específicos, presentando gran potencial para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación. De este modo, estas técnicas podrían permitir la construcción de estructuras más seguras y duraderas, evitando problemas geotécnicos y reduciendo costos de mantenimiento.

Palabras clave: capacidad de carga, suelos de cimentación, estabilización.

ABSTRACT

The bearing capacity of foundation soils is of utmost importance in the construction of any structure. In that sense, this literature review provides information on current techniques and emerging trends to improve bearing capacity through the use of admixtures. Conventional practices regarding the use of chemical admixtures, such as lime and cement, and the use of industrial wastes, such as granular rubber from discarded tires, are described. Typical application rates of these additives and the increases in bearing capacity that can be achieved are highlighted, with cement type I or type V applied in fine and sandy soils, with a potential

increase of up to 350%. The use of hydrated or quicklime in clayey or silty soils, and granular rubber in sandy-loamy and clayey soils are also explored. In addition, innovations that represent promising trends in this field are analyzed, such as the use of nanomaterials, advanced geosynthetics and specific additives, presenting great potential to improve the bearing capacity of foundation soils. In this way, these techniques could allow the construction of safer and more durable structures, avoiding geotechnical problems and reducing maintenance costs.

Keywords: bearing capacity, foundation soils, stabilization.

INTRODUCCIÓN

La capacidad portante de los suelos de cimentación es esencial para soportar las cargas de las estructuras sin deformaciones excesivas. Sin embargo, existen suelos de cimentación que presentan capacidad portante baja, lo que puede dar lugar a asentamientos diferenciales y fallas estructurales (Peralta, 2022). Por tanto, es necesario estabilizar el suelo debido a la variabilidad inherente de sus propiedades, las cuales pueden afectar significativamente la integridad de los cimientos. Factores como el tipo de suelo, contenido de humedad y densidad influyen en la capacidad de carga, por lo que es crucial desarrollar métodos efectivos para mejorar las propiedades del suelo (Hajitaheriha et al., 2021).

La mejora de la capacidad portante del suelo puede ser especialmente relevante en regiones donde existen limitaciones debido a la composición del suelo o su historia geológica (Peralta, 2022). Tradicionalmente, técnicas como la compactación y el reemplazo del suelo han sido ampliamente utilizadas, pero a menudo resultan costosas y laboriosas (Verma & Kumar, 2020). En este contexto, el uso de aditivos para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación ha surgido como una alternativa viable y menos invasiva (Sharma et al., 2021). El uso de aditivos ofrece un

enfoque prometedor para mejorar la capacidad de carga del suelo, ya que permite adaptarse a las condiciones específicas del suelo y a los requisitos del proyecto (Verma et al., 2021). En la actualidad, se emplean diversas técnicas para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación mediante el uso de aditivos (Barman & Dash, 2022). Algunas de las técnicas más utilizadas incluyen la estabilización con cal (Al-Gharbawi et al., 2023), cemento (Archibong et al., 2020) y geos sintéticos, como el caucho granular (Bustamante, 2023). Estas técnicas han demostrado ser efectivas en la mejora de las propiedades mecánicas de los suelos y en la prevención de problemas geotécnicos.

Los aditivos utilizados en la estabilización de suelos, como el cemento, la cal y geo sintéticos, pueden mejorar la capacidad de carga, reducir el asentamiento y aumentar la estabilidad general del suelo (Verma et al., 2021). En tal sentido, el objetivo de esta revisión fue dar a conocer las técnicas actuales y tendencias emergentes para mejorar la capacidad portante mediante el uso de aditivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para recopilar literatura relevante sobre técnicas de estabilización de suelos, se emplearon diversas bases científicas, como: Web of Science, Scopus, y Google Scholar,

utilizando palabras clave como “mejora de suelos”, “aditivos para suelos”, “capacidad portante” y “estabilización de suelos”. Se revisaron 94 estudios, de los cuales el 87.5% eran artículos y el 12.5% eran tesis referentes al tema, de las cuales finalmente se seleccionaron 26 estudios (en los mismos

porcentajes) correspondientes a los últimos cinco años (2020-2024), categorizados según el tipo de aditivo investigado, métodos de prueba empleados, y resultados más relevantes de acuerdo con las gráficas de Funnel (Figura 1).

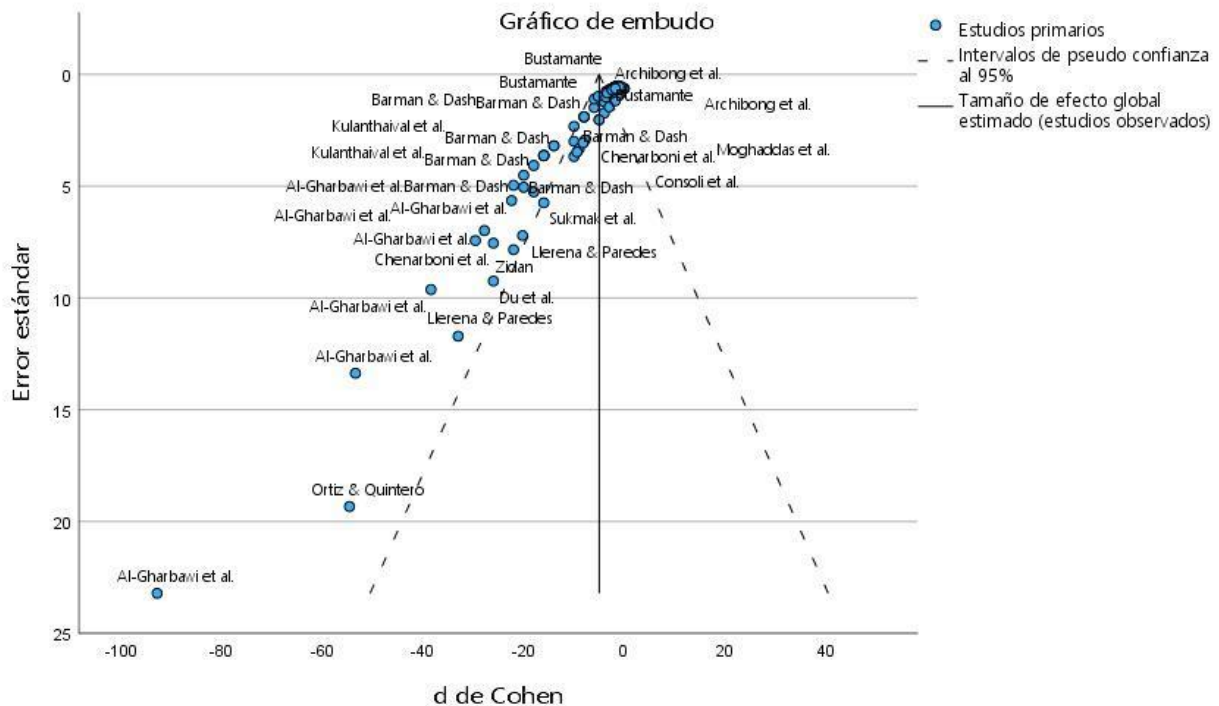


Figura 1. Gráfica de Funnel para verificar el sesgo de publicación de los artículos científicos revisados como parte de la revisión sistemática (Aquellos artículos alejados del triángulo fueron desestimados y no se tomaron en cuenta, por lo que, de 94 estudios, solamente se trabajó con 26 de ellos).

En los estudios se analizaron e identificaron los aditivos más usados, sus aplicaciones y resultados del uso en diferentes escenarios geotécnicos. La metodología implicó una revisión sistemática de la literatura, centrándose en los avances recientes y las tendencias emergentes en los métodos de mejora del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Técnicas actuales

Las técnicas actuales más utilizadas para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación con aditivos se presentan en la Tabla 1 y Tabla 2, así como los países donde se han aplicado.

Tabla 1. Técnicas actuales para el mejoramiento de la capacidad portante de los suelos de cimentación con aditivos.

Estabilizador	Número de estudios
Cemento	10
Cal	9
Geosintéticos (caucho granular)	6
Subproductos industriales	2

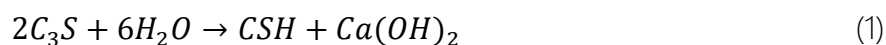
Tabla 2. Lugares donde se ha aplicado el mejoramiento de la capacidad portante del suelo.

Lugar	Número de estudios	Cita
Estados Unidos	5	(Barman & Dash, 2022; Archibong et al., 2020; Sukmak et al., 2023; Manzoor & Yousuf, 2020; Tasalloti et al., 2021)
Egipto	1	(Zidan, 2020)
Irak	1	(Al-Gharbawi et al., 2023)
India	1	(Kulanthaivel et al., 2021)
Irán, Asia	2	(Chenarboni et al., 2021; Moghaddas et al., 2019)
Bangladesh, Asia	1	(Islam et al., 2023)
Singapur	1	(Yu et al., 2022)
Pakistán	1	(Shah et al., 2020)
China	1	(Du et al., 2021)
Italia	1	(Barbero et al., 2021)
Paraguay	1	(Consoli et al., 2020)
Colombia	1	(Ortiz & Quintero, 2020)
Arequipa, Perú	1	(Llerena & Paredes, 2019)
Chota, Perú	2	(Bustamante, 2023; Peralta, 2022)

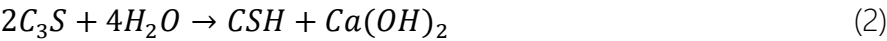
Estabilización con cemento

La adición de cemento al suelo de cimentación forma una matriz cementada que aumenta la resistencia y rigidez del suelo, mejorando su capacidad portante (Kulanthaivel et al., 2021). La adición de cemento es un método utilizado para mejorar la capacidad de carga de los suelos de cimentación. Estos aditivos cementosos reaccionan con el suelo para formar compuestos estables, lo que aumenta la resistencia y la durabilidad (Chenarboni et al., 2021).

Mecanismo de estabilización



El mecanismo consta de hidratación, intercambio catiónico, floculación y reacción puzolánica. Cuando la arcilla se mezcla con cemento y agua, la hidratación se produce inmediatamente; el cemento, reacciona con el agua y se liberan iones de calcio en la mezcla de arcilla y, por lo tanto, forman un compuesto cementoso como CSH (silicato cálcico hidratado de naturaleza amorfa), como se muestra en las ecuaciones 1 y 2 (Barman & Dash, 2022).



Efecto del tipo de suelo

Según, Barman & Dash (2022) todos los tipos de suelos son susceptibles de tratamiento con cemento. Sin embargo, los materiales granulares con suficientes finos y arcillas, con plasticidad baja a media, generalmente se consideran adecuados para la estabilización con cemento. Esto se debe principalmente a la facilidad de

mezcla. En cambio, el cemento se vuelve difícil de mezclar con arcilla altamente plástica debido a la formación de grumos y necesita una eficacia de mezcla específica. En otras palabras, puede ser utilizado en todo tipo de suelo, pero la mezcla en suelos altamente arcillosos puede ser más compleja (Tabla 3). Pero, para identificar el suelo que se puede utilizar la ecuación 3.

$$IP \leq 20 + \frac{50 - \% \text{ de finos tamiz } 75 \mu m}{4}$$

(3)

Tabla 3. Tipo de suelo en el que se ha aplicado cemento para mejorar la capacidad portante.

Tipo de suelo	Número de investigaciones	Citas
Arcilloso	6	(Al-Gharbawi et al., 2023; Kulanthaivel et al., 2021; Chenarboni et al., 2021; Sukmak et al., 2023; Zidan, 2020; Raja et al., 2021)
Arena	3	(Raja et al., 2021; Yu et al., 2022; Du et al., 2021)

Efecto del contenido de cemento

La cantidad adecuada de cemento que proporciona el máximo rendimiento de los suelos depende de varios factores (Tabla 4). Dependiendo del contenido de arcilla, el

requerimiento de cemento para una modificación significativa de suelos expansivos puede variar del 3% al 16% en masa (Barman & Dash, 2022).

Tabla 4. Porcentaje de contenido de cemento considerado como adecuado para la estabilización del suelo.

Porcentaje de cemento	Número de investigaciones	Citas
3%	2	(Barman & Dash, 2022; Kulanthaivel et al., 2021)
5%	1	(Kulanthaivel et al., 2021)
6%	3	(Barman & Dash, 2022; Kulanthaivel et al., 2021; Chenarboni et al., 2021)
7%	1	(Al-Gharbawi et al., 2023; Kulanthaivel et al., 2021)
9%	3	(Barman & Dash, 2022; Kulanthaivel et al., 2021; Chenarboni et al., 2021)
12%	2	(Barman & Dash, 2022; Chenarboni et al., 2021)

16%	1	(Barman & Dash, 2022)
20%	1	(Du et al., 2021)

Efecto del tipo de cemento

Si bien todos los tipos de cementos disponibles son beneficiosos para la

modificación/estabilización del suelo, el cemento Tipo I es el más utilizado debido a su disponibilidad y rentabilidad (Tabla 5).

Tabla 5. Tipo de cemento utilizado para el mejoramiento del suelo.

Tipo de cemento	Número de investigaciones	Citas
Tipo I	4	(Kulanthaivel et al., 2021; Chenarboni et al., 2021; Raja et al., 2021; Yu et al., 2022)
Tipo V	2	(Al-Gharbawi et al., 2023; Du et al., 2021)

Mejoramiento de la capacidad portante

Los resultados de la adición de cemento al suelo son notables. Se observa un aumento significativo en la capacidad portante del suelo, lo que permite la construcción de estructuras más grandes y pesadas sobre

terrenos previamente inestables. Además, la estabilización del suelo con cemento reduce el riesgo de asentamientos diferenciales y fallas estructurales, lo que contribuye a la seguridad y durabilidad de las obras civiles.

Tabla 6. Porcentaje de mejoramiento de la capacidad portante del suelo al adicionar cemento.

Capacidad portante del suelo natural	Porcentaje de adición (%)	Capacidad portante final	Porcentaje de mejora (%)	Citas
2.10 MPa	3%	2.80 MPa	25%	(Barman & Dash, 2022; Kulanthaivel et al., 2021)
56.5 kPa	5%	160.9 kPa	184.78%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
1 kg/cm ²	6%	1.5 kg/cm ²	50%	(Chenarboni et al., 2021)
56.5 kPa	7%	205.3 kPa	263.36%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
1 kg/cm ²	7%	1.25 kg/cm ²	25%	(Kulanthaivel et al., 2021)
56.5 kPa	9%	249.4 kPa	341.41%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
1 kg/cm ²	12%	2 kg/cm ²	100%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
2.9 MPa	20%	4.2 MPa	44.83%	(Du et al., 2021)
0.72 kg/cm ²	5%	0.77 kg/cm ²	6.94%	(Peralta, 2022)
0.72 kg/cm ²	10%	0.82 kg/cm ²	13.88%	(Peralta, 2022)
0.72 kg/cm ²	15%	0.88 kg/cm ²	22.22%	(Peralta, 2022)

Nota: de MPa a kg/cm² se multiplica por 10.1972. De KPa a kg/cm² se multiplica por 0.576139.

Tabla 7. Capacidad portante del suelo al adicionar 15% de cemento.

Calicata	Capacidad portante del suelo (kg/cm ²)		Porcentaje de mejora
	Suelo natural	Suelo con cemento	
1	0.72	0.88	22.22%
2	0.71	0.86	21.13%
3	0.70	0.85	21.43%
4	0.72	0.87	20.83%
5	0.80	0.89	11.25%
6	0.73	0.90	23.29%
7	0.75	0.83	10.67%

Fuente: Peralta (2022).

Tratamiento del suelo con inyecciones de cemento diluido

El proceso de estabilización del suelo con inyecciones de cemento diluido implica la inyección controlada de una mezcla de agua y cemento diluido en el suelo

mediante perforaciones (Figura 2). La reacción del cemento con el suelo forma una matriz cementada que mejora la capacidad portante y estabilidad del suelo (Archibong et al., 2020).

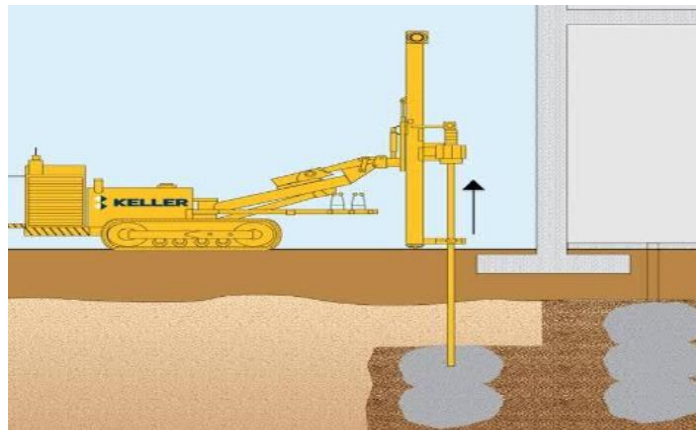


Figura 2. Proceso de inyección de cemento diluido al suelo de cimentación

Fuente: Archibong et al. (2020).

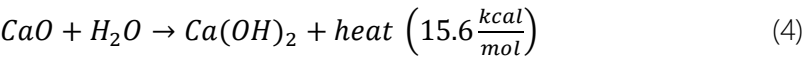
Estabilización con cal

La adición de cal al suelo de cimentación mejora la cohesión y reduce la plasticidad del suelo, aumentando su capacidad portante (Archibong et al., 2020).

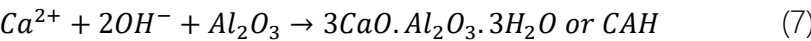
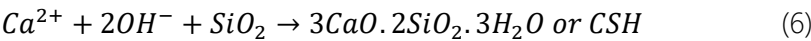
Mecanismo de estabilización

La adición de agua a la cal da como resultado una reacción exotérmica que

forma cal hidratada o $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La generación de calor adicional (15.6 kcal/mol) ayuda a reducir el contenido de agua natural del suelo. Además, cuando se disuelve en agua, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se descompone en iones OH^- y Ca^{2+} , como se ilustra en las ecuaciones 4, 5, 6 y 7: (Barman & Dash, 2022).



Las reacciones asociadas se denominan reacción puzolánica como se detalla a continuación:



Efecto del tipo de suelo

La estabilización con cal no se recomienda para todo tipo de suelos (Tabla 8). La adición de cal es beneficiosa cuando el suelo tiene un índice de plasticidad (IP) superior al 10% y al menos el 25% de sus partículas pasan a través de un tamiz de 74 μm. Un suelo que tenga al menos un 20% de arcilla es preferiblemente adecuado

para la estabilización con cal. Del mismo modo, un suelo arenoso y sin finos nunca debe considerarse como material activo para la estabilización con cal. Además, la cal no es eficiente para suelos limosos que tienen suelos francos y granulares, debido a la ausencia de puzolanas adecuadas (Barman & Dash, 2022).

Tabla 8. Número de investigaciones de acuerdo con el tipo de suelo en el que se ha aplicado cal para el mejoramiento de la capacidad portante.

Tipo de suelo	Número de investigaciones	Citas
Arcilloso	7	(Barman & Dash, 2022; Al-Gharbawi et al., 2023; Archibong et al., 2020; Manzoor & Yousuf, 2020; Consoli et al., 2020; Islam et al., 2023; Shah et al., 2020)]
Limo arcilloso	1	(Barbero et al., 2021)

Efecto del contenido de cal

En general, un contenido relativamente bajo de cal sólo produce una modificación del suelo. Sin embargo, a mayor contenido de cal, son posibles tanto la modificación como la solidificación. Además, un mayor contenido de cal proporciona una mejor

dispersión y, por tanto, una mejor mezcla de la misma en la matriz del suelo (Barman & Dash, 2022). Para determinar el mejor contenido de cal se puede usar la ecuación 8, pero, en la Tabla 9 se presentan los porcentajes de cal usuales utilizados en otros estudios.

$$Adecuado \text{ contenido de cal } (\%) = \frac{Arcilla (\%)}{35} + 1.25 \tag{8}$$

Tabla 9. Porcentaje de contenido de cal considerado como adecuado para la estabilización del suelo.

Porcentaje de cal	Número de investigaciones	Citas
1%	2	(Barman & Dash, 2022; Manzoor et al., 2020)
2%	1	(Barbero et al., 2021)
3%	3	(Barman & Dash, 2022; Islam et al., 2023; Barbero et al., 2021)
4%	1	(Barbero et al., 2021)
5%	2	(Al-Gharbawi et al., 2023; Barbero et al., 2021)
6%	3	(Islam et al., 2023; Shah et al., 2020; Barbero et al., 2021)
12%	1	(Islam et al., 2023)

Efecto del tipo de cal

Dos tipos de cal, es decir, la cal viva y la cal hidratada, son las más utilizadas para la estabilización del suelo (Tabla 10), principalmente debido a su capacidad de producir una cantidad adecuada de iones de calcio. En comparación con la cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), la cal viva (CaO), debido a su menor tamaño de cristal, menor densidad aparente, mayor área de superficie específica y poros aislados más

pequeños, es más reactivo. En vista de esto, el mejor requerimiento de cal para un suelo particular en el caso de la cal viva es relativamente menor que el de la cal hidratada. Además, el suelo tratado con cal viva generalmente exhibe menor plasticidad y mayor resistencia a la compresión libre (UCS), entre tanto, con cal hidratada, el suelo tratado exhibe mayor compresibilidad y máxima densidad seca (Barman & Dash, 2022).

Tabla 10. Tipo de cal utilizada para el mejoramiento del suelo.

Tipo de cal	Número de investigaciones	Citas
Cal viva	3	(Barman & Dash, 2022; Al-Gharbawi et al., 2023; Sah et al., 2020)
Cal hidratada	3	(Barman & Dash, 2022; Consoli et al., 2020; Islam et al., 2023)

Mejoramiento de la capacidad portante

Los efectos del tratamiento del suelo con cal son destacables, ya que se evidencia un

incremento considerable en su capacidad de carga (Tabla 11 y Tabla 12).

Tabla 11. Porcentaje de mejoramiento de la capacidad portante del suelo al adicionar cal.

Capacidad portante del suelo natural	Porcentaje de adición (%)	Capacidad portante final	Porcentaje de mejora (%)	Cita
--------------------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	------

56.5 kPa	5%	167.3 kPa	196.11%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
56.5 kPa	7%	239.8 kPa	324.42%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
56.5 kPa	9%	351.1 kPa	521.42%	(Al-Gharbawi et al., 2023)
0.70 kg/cm ²	1%	0.85 kg/cm ²	21.43%	(Manzoor & Yousuf, 2020)
10 Psi	3%	10.38 Psi	3.8%	(Islam et al., 2023)
10 Psi	6%	10.97 Psi	9.70%	(Islam et al., 2023)
10 Psi	12%	10.44 Psi	4.40%	(Islam et al., 2023)
49 kPa	6%	57.80 kPa	17.96%	(Shah et al., 2020)
0.72 kg/cm ²	5%	0.75 kg/cm ²	4.17%	(Peralta, 2022)
0.72 kg/cm ²	10%	0.79 kg/cm ²	9.72%	(Peralta, 2022)
0.72 kg/cm ²	15%	0.83 kg/cm ²	15.28%	(Peralta, 2022)

Nota: De KPa a kg/cm² se multiplica por 0.576139. De PSI a kg/cm² se multiplica por 0.0703.

Tabla 12. Comparación de la capacidad portante del suelo natural y al adicionar 15% de cal en la Urbanización Los Pinos de la ciudad de Chota.

Calicat a	Capacidad portante del suelo (kg/cm ²)		Porcentaje de mejora
	Suelo natural	Suelo con cal	
1	0.72	0.83	15.28%
2	0.71	0.82	15.49%
3	0.70	0.81	15.71%
4	0.72	0.84	16.67%
5	0.80	0.85	6.25%
6	0.73	0.85	16.44%
7	0.75	0.84	12.00%

Fuente: Peralta (2022).

Tratamiento de estabilización del suelo con cal

El tratamiento para estabilizar el suelo con inyección de lechada de cal y estabilización con pilas de cal son dos técnicas utilizadas

en ingeniería geotécnica para mejorar la capacidad portante y las propiedades mecánicas de suelos blandos (Figura 3).

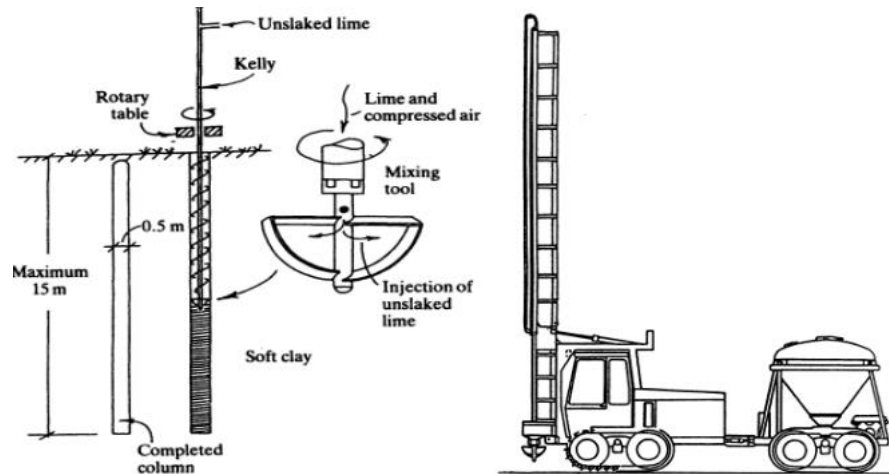


Figura 3. Tratamiento para estabilizar el suelo con cal: Inyección de lechada de cal y estabilización con pilas de cal, Fuente: Manzoor & Yousuf (2020).

La inyección de lechada de cal implica la introducción de una mezcla de cal y agua en el suelo a través de perforaciones. La lechada de cal actúa como agente estabilizante al reaccionar con los componentes del suelo, reduciendo su plasticidad y aumentando su cohesión y resistencia al corte, esta técnica es efectiva para suelos arcillosos y limosos con alto contenido de humedad (Manzoor & Yousuf, 2020).

Por otro lado, la estabilización con pilas de cal implica la construcción de pilotes o columnas de cal en el suelo. Estas pilas se forman mediante la excavación de pozos, la introducción de cal y la compactación de capas alternas de suelo y cal. Las pilas de cal proporcionan un refuerzo estructural al suelo al mejorar su capacidad portante y reducir la compresibilidad (Manzoor & Yousuf, 2020).

Estabilización con geosintéticos: Caucho granular. Los geosintéticos, como el caucho granular, se utilizan ampliamente en ingeniería geotécnica para la estabilización del suelo. El caucho granular es un material reciclado proveniente de neumáticos usados que se ha vuelto cada vez más popular debido a su eficacia y sostenibilidad ambiental en la estabilización del suelo (Bustamante, 2023).

Efecto del tipo de suelo

El efecto del caucho granular puede variar según el tipo de suelo (Tabla 13). Por lo general, se obtienen mejores resultados en suelos cohesivos, como arcillas y limos, donde el caucho granular puede mejorar la cohesión y reducir la plasticidad del suelo. Sin embargo, también se ha utilizado con éxito en suelos granulares, pero los efectos pueden ser menos pronunciados (Moghaddas et al., 2019).

Tabla 13. Número de investigaciones de acuerdo con el tipo de suelo en el que se ha aplicado caucho granular para el mejoramiento de la capacidad portante.

Tipo de suelo		Número de investigaciones	Citas
Suelos arenos	limosos o arcillosos	3	(Moghaddas et al., 2019; Tasalloti et al., 2021; Ortiz & Quintero, 2020)
Suelos arcillosos-limosos		2	(Bustamante, 2023; Llerena & Paredes, 2019)

Efecto del contenido de caucho granular

El contenido de caucho granular tiene un impacto significativo (Tabla 14). Un mayor contenido de caucho granular conduce a una mayor mejora en las propiedades del

suelo. Sin embargo, un exceso de caucho granular puede resultar en una pérdida de cohesión y una reducción en la capacidad de drenaje del suelo (Tasalloti et al., 2021).

Tabla 14. Porcentaje de contenido de caucho granular considerado como adecuado para la estabilización del suelo.

Caucho granular	Número de investigaciones	Citas
2%	1	(Llerena & Paredes, 2019)
3%	1	(Llerena & Paredes, 2019)
5%	1	(Bustamante, 2023)
10%	2	(Bustamante, 2023; Ortiz & Quintero, 2020)
15%	1	(Bustamante, 2023)
20%	1	(Tasalloti et al., 2021)
30%	1	(Tasalloti et al., 2021)

Efecto del diámetro del caucho granular

El tamaño de las partículas de caucho granular también puede influir en su efectividad (Tabla 15). Partículas de caucho más grandes tienden a proporcionar una

mayor resistencia y estabilidad al suelo, por el contrario, partículas más pequeñas pueden mejorar la capacidad de drenaje y la deformabilidad del suelo (Tasalloti et al., 2021).

Tabla 15. Diámetro de caucho granular utilizado para el mejoramiento del suelo.

Caucho granular	Número de investigaciones	Citas
2 a 10 mm	1	(Tasalloti et al., 2021)
50 a 100 mm	1	(Bustamante, 2023; Tasalloti et al., 2021)

Mejoramiento de la capacidad portante

La estabilización con caucho granular puede resultar en un significativo mejoramiento de la capacidad portante del suelo (Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18). Al

distribuir las cargas de manera más uniforme y mejorar las propiedades mecánicas del suelo, el caucho granular aumenta la resistencia del suelo a las cargas aplicadas, reduciendo así el riesgo de asentamientos y fallas en las cimentaciones.

Tabla 16. Porcentaje de mejoramiento de la capacidad portante del suelo al adicionar caucho granular.

Capacidad portante del suelo natural	Porcentaje de adición (%)	Capacidad portante final	Porcentaje de mejora (%)	Cita
8.1 kPa	20%	12 kPa		(Tasalloti et al., 2021)
1.57 kg/cm ²	10%	4.3 kg/cm ²		(Ortiz & Quintero, 2020)
0.49 kg/cm ²	3%	2.14 kg/cm ²		(Llerena & Paredes, 2019)
0.60 kg/cm ²	5%	0.60-0.78 kg/cm ²	3.61% a 11.67%	(Bustamante, 2023)
0.60 kg/cm ²	10%	0.68-0.90 kg/cm ²	8.4% a 23.33%	(Bustamante, 2023)
0.60 kg/cm ²	15%	0.64-0.86 kg/cm ²	2.60% a 11.5%	(Bustamante, 2023)

Tabla 17. Capacidad portante del suelo con 10% de caucho granular, cimentación corrida.

Calicata	Capacidad portante (kg/cm ²)		Porcentaje de mejora
	Suelo natural	Suelo con caucho	
C1	0.6	0.74	23.33
C2	0.78	0.87	11.54
C3	0.62	0.68	9.68
C4	0.74	0.81	9.46
C5	0.62	0.69	11.29
C6	0.83	0.9	8.43
C7	0.76	0.83	9.21
C8	0.6	0.69	15.00
C9	0.61	0.72	18.03

Fuente: Bustamante (2023).

Tabla 18. Capacidad portante del suelo con 10% de caucho granular, cimentación cuadrada.

Calicata	Capacidad portante (kg/cm ²)		Porcentaje de mejora
	Suelo natural	Suelo con caucho	
C1	0.7	0.85	21.43

C2	0.87	0.95	9.20
C3	0.73	0.8	9.59
C4	0.85	0.92	8.24
C5	0.74	0.8	8.11
C6	0.91	0.98	7.69
C7	0.86	0.93	8.14
C8	0.71	0.8	12.68
C9	0.73	0.84	15.07

Fuente: Bustamante (2023)

Tratamiento del suelo con caucho granular

En el campo de la estabilización de cimentaciones, el caucho granular se utiliza para reforzar y mejorar las condiciones del suelo bajo las cimentaciones de edificios, carreteras, puentes y otras estructuras. Su aplicación se realiza generalmente colocando capas de caucho granular entre las capas de suelo existentes o mezclándolo directamente con el suelo in situ, dependiendo de las necesidades del proyecto y las características del suelo (Llerena & Paredes, 2019).

Subproductos industriales

La incorporación de subproductos industriales como cenizas volantes, escoria y pavimento asfáltico reciclado se ha mostrado prometedora en la estabilización del suelo (Tabla 19). Estos materiales pueden sustituir parcialmente al cemento o la cal, aportando beneficios económicos y medioambientales. Se ha descubierto que las mezclas de cenizas volantes y cal son efectivas para mejorar la resistencia y rigidez de suelos expansivos.

Tabla 19. Investigaciones en las que utilizan subproductos industriales para estabilizar el suelo.

Subproductos industriales	Número de investigaciones	Citas
Cenizas volantes	2	(Moghaddas et al., 2019; Yazici & Unsever, 2024)
Escoria	2	(Barman & Dash, 2022; Mohammadizadeh et al., 2024)
Polvo de horno	1	(Barman & Dash, 2022)

Técnicas prometedoras para el mejoramiento de la capacidad portante del suelo

Además, de las técnicas actuales, se han propuesto varias técnicas prometedoras

para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación con aditivos (Geotechnical Engineering Consultancy, 2023). Algunas de estas técnicas incluyen:

Tabla 20. Técnicas prometedoras para el mejoramiento de la capacidad portante de los suelos de cimentación con aditivos.

Estabilizador	Número de investigaciones	Citas
Uso de nanomateriales	1	(Geotechnical Engineering Consultancy, 2023)
Aplicación de geosintéticos avanzados	1	(Al-Salamy et al., 2024)
Desarrollo de aditivos específicos	3	(Barman & Dash, 2022; Geotechnical Engineering Consultancy, 2023; Kitazume, 2021)

Uso de nanomateriales

Se está investigando el uso de nanomateriales para mejorar las propiedades del suelo de cimentación, como la resistencia y la estabilidad (Geotechnical Engineering Consultancy, 2023). El uso de nanomateriales, como la nanosílice y la nanoarcilla, es un área emergente en la investigación sobre la estabilización del suelo. Estas partículas ultrafinas pueden llenar microhuecos y formar fuertes enlaces con las partículas del suelo, mejorando significativamente la resistencia y la durabilidad. Los estudios en curso están explorando el potencial de los nanomateriales para mejorar la capacidad de carga de suelos problemáticos como las arcillas expansivas y los suelos orgánicos (Geotechnical Engineering Consultancy, 2023).

Aplicación de geosintéticos avanzados

Los geosintéticos avanzados, como las geomembranas y los geotextiles se están utilizando para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación (Al-Salamy et al., 2024). El desarrollo de nuevos materiales geosintéticos, como: geomallas y geotextiles de alta resistencia, ofrece

oportunidades para mejorar la capacidad de carga del suelo. Estos materiales se pueden utilizar como refuerzo dentro de la masa del suelo, aumentando su resistencia a la tracción y reduciendo el asentamiento. Los geosintéticos avanzados también se pueden combinar con otras técnicas de estabilización, como lechada o clavado en el suelo, para crear sistemas compuestos con un rendimiento mejorado (Al-Salamy et al., 2024).

Desarrollo de Aditivos Específicos

Se vienen desarrollando aditivos específicos para suelos de cimentación, con propiedades mejoradas que permitan una mayor capacidad portante (Kitazume, 2021). Los investigadores están desarrollando aditivos especializados adaptados a tipos de suelo específicos y requisitos de proyectos. Por ejemplo, el uso de DuraCrete, un aditivo sostenible para el cemento se ha mostrado prometedor para estabilizar los suelos blandos de los estuarios. De manera similar, se ha explorado la incorporación de desechos de fibra de coco y bassanita reciclada para mejorar la resistencia y la estabilidad del volumen de suelos expansivos (Barman & Dash, 2022).

CONCLUSIONES

La mejora de la capacidad portante de los suelos de cimentación con aditivos es un campo en constante evolución. Las técnicas actuales, como la estabilización con cal, cemento y caucho granular, han demostrado ser efectivas en la mejora de las propiedades mecánicas de los suelos. Sin embargo, se requiere una investigación continua para desarrollar técnicas prometedoras que permitan una mayor capacidad portante.

Técnicas prometedoras, como el uso de nanomateriales, geosintéticos avanzados y aditivos específicos, presentan gran potencial para mejorar la capacidad portante de los suelos de cimentación. Estas técnicas podrían permitir la construcción de estructuras más seguras y duraderas, evitando problemas geotécnicos y reduciendo los costos de mantenimiento.

La mejora de la capacidad portante de los suelos de cimentación con aditivos es un área de investigación activa en la ingeniería geotécnica. Se requiere una estrecha colaboración entre investigadores, ingenieros y constructores para desarrollar y aplicar de manera efectiva las técnicas actuales y tendencias en la práctica de la construcción.

Conflicto de intereses

No existe ningún tipo de interés con los contenidos del artículo científico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbero, D., Serraiocco, L., Maroni, A., & Peyrot, S. (2021). A laboratory methodological proposal for "geotechnical lime stabilization of A-

4 soils". *Journal of Geotechnical Engineering*, 8(1), 1-11p. 10.37591/JoGE

Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319-1342. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>

Bustamante, M.H. (2023). *Mejoramiento de la capacidad portante del suelo natural de cimentación adicionando residuos triturados de neumáticos, sector 3 de la ciudad de Chota*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Chota].

Chenarboni, H. A., Lajevardi, S. H., MolaAbasi, H., & Zeighami, E. (2021). The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils. *Construction and Building Materials*, 272, 121630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121630>

Consoli, N. C., Bittar Marin, E. J., Quiñónez Samaniego, R. A., Scheuermann Filho, H. C., & Cristelo, N. M. C. (2020). Field and laboratory behaviour of fine-grained soil stabilized with lime. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(6), 933-938. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0271>

Du, J., Zheng, G., Liu, B., Jiang, N. J., & Hu, J. (2021). Triaxial behavior of cement-stabilized organic matter-disseminated sand. *Acta Geotechnica*, 16, 211-220.

- <https://doi.org/10.1007/s11440-020-00992-y>
- Geotechnical Engineering Consultancy. (2023, 25 de marzo). *Methods of Improving Bearing Capacity of Soil | Soil/Ground Improvement |* Geotechnical Engineering. <https://www.youtube.com/watch?v=SJRmXYvBq3o>
- Hajitaheriha, M. M., Akbarimehr, D., Hasani Motlagh, A., & Damerchilou, H. (2021). Bearing capacity improvement of shallow foundations using a trench filled with granular materials and reinforced with geogrids. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07679-y>
- Islam, M. M., Zahid, C. Z. B., Umama, M. A., Tareque, T., & Mirmotalebi, S. (2023). Influence of salt-lime stabilization on soil strength for construction on soft clay. *Open Journal of Civil Engineering*, 13(3), 528-539. 10.4236/ojce.2023.133038
- Kitazume, M. (2021). Recent development and future perspectives of quality control and assurance for the deep mixing method. *Applied Sciences*, 11(19), 9155. <https://doi.org/10.3390/app11199155>
- Kulanthaivel, P., Soundara, B., Velmurugan, S., & Naveenraj, V. (2021). Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement. *Materials Today: Proceedings*, 45, 507-511.
- <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.107>
- Llerena, G.A., & Paredes, M.V. (2019). *Reforzamiento de Suelo Arcilloso con Caucho Reciclado para Fines de Cimentación en el Distrito de Yarabamba en la Ciudad de Arequipa*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9102>
- Manzoor, S. O., & Yousuf, A. (2020). Stabilisation of Soils with Lime: A Review. *J. Mater. Environ. Sci*, 11(10), 1538-1551. https://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol11/vol11_N9/JMES-2020-11133-Manzoor.pdf
- Moghaddas Tafreshi, S. N., Joz Darabi, N., Tavakoli Mehrjardi, G., & Dawson, A. (2019). Experimental and numerical investigation of footing behaviour on multi-layered rubber-reinforced soil. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 23(1), 29-52. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1262288>
- Mohammadizadeh, M., Nadi, B., Hajiannia, A., & Mahmoudi, E. (2024). Experimental and Numerical Evaluation Performance of Strip Foundation Reinforced with Steel Slag Columns Compared to Skirted Foundation. *Indian Geotechnical Journal*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-00921-w>

Ortiz, N.E. & Quintero, E.J. (2020). *Uso de geosintéticos para el mejoramiento de la capacidad portante de suelos bajo cimentaciones superficiales*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena].

<https://hdl.handle.net/11227/13514>

Peralta, L. (2022). *Mejoramiento de la capacidad portante del suelo aplicando distintas dosis de residuos triturados de ladrillo, lechada de cal y cemento diluido: Caso urbanización "Los Pinos", Chota-2020*. [Tesis de grado, Universidad Nacional Autónoma de Chota].

Raja, K., Elakkya, E., Manikandan, A. T., Surya, B., & Nekila, M. (2021, February). Strength characteristics developed in cement stabilized soil. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1055, No. 1, p. 012039). IOP Publishing. DOI 10.1088/1757-899X/1055/1/012039

Shah, S. H. A., Arif, M., Sabir, M. A., & Iqbal, J. (2020). In-situ stabilization of clays with lime, dolerite and quartzite powders. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(3). DOI: 10.13168/AGG.2020.0025

Recibido: 13-06-2024

Aceptado: 02-07-2024

Publicado: 31-07-2024

Contribución de autoría

1. Ronald Collantes: Concepción y elaboración de manuscrito.
2. Luis Alberto Orbegoso Navarro: Elaboración y revisión de manuscrito.