

Estado del arte, técnicas de mejoramiento y estabilización para rellenos antrópicos

State of the art, enhancement and stabilization techniques for anthropic fillers

CARDONA, Edward J.¹

JIMENEZ, Jhonny A.²

OSPINA, Sandra³

Resumen

En ocasiones, el suelo para la construcción de proyectos de ingeniería puede llegar a requerir un tratamiento que modifique o mejore sus propiedades con el propósito de garantizar un comportamiento adecuado. Por esta razón, el presente artículo ofrece una revisión bibliográfica acerca de las diversas técnicas empleadas para la estabilización y mejoramiento de suelos con calificativo de rellenos antrópicos no controlados; de modo que permitan posicionarlos como una alternativa sostenible en procesos geotécnicos.

Palabras clave: técnicas, rellenos antropicos, estabilización, mejoramiento

Abstract

Sometimes, the soil for the construction of engineering projects may require a treatment that modifies or improves its properties in order to guarantee an adequate behavior. For this reason, this article offers a bibliographic review of the different techniques used for the stabilization and improvement of soils with the qualification of uncontrolled anthropic fills, in order to position them as a sustainable alternative in geotechnical processes.

Key words: techniques, anthropic fills, stabilization, improvement.

1. Introducción

Las técnicas para la mejora o estabilización de un suelo pueden aumentar la capacidad de soporte, mejorar la resistencia al corte y a la compresión, aumentar la resistencia al ablandamiento por acción del agua, proporcionar estabilidad volumétrica ya que se puede minimizar la permeabilidad del agua, disminuir la plasticidad y aumentar la masa unitaria de los suelos (Goran Vukotic 2016).

En ese sentido, es preciso entender la diferencia entre el mejoramiento y estabilización de un suelo. Por un lado, se tiene el mejoramiento, el cual tiene por objetivo intensificar o fortalecer las propiedades físicas o mecánicas de un suelo sin necesidad de alterar su composición; mientras que, en el caso de la estabilización, se requiere de

¹ Ingeniero civil. Cundinamarca. Universidad Santo Tomás. Colombia. E-mail: edward.cardona@usantoto.edu.co

² Ingeniero civil. Cundinamarca. Universidad Santo Tomás. Colombia. E-mail: jhonny.jimenez@usantoto.edu.co

³ Docente, Magister en ingeniería geotécnica. Cundinamarca. Universidad Santo Tomás. Colombia. E-mail: sandra.ospina@usantoto.edu.co

una mezcla de materiales o aditivos que permitan mejorar algunas propiedades del suelo mediante la adición de productos químicos en la mayoría de los casos (Behnood 2018).

Desde el punto de vista de la ingeniería civil el suelo es considerado como el material de construcción más antiguo y complejo debido a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas (Braja 2001); que son atribuibles al esqueleto mineral compuesto por las partículas sólidas y los espacios que existen entre ellas (Martínez 2010). Sin embargo, no solo está conformado por minerales, también contiene materia orgánica, agua y aire; elementos que se encuentran en diferentes proporciones, comúnmente conocidas como relaciones de fase, donde se distingue tres fases: sólida, líquida y gaseosa (Calle, Orozco, and García 2013), y varían según el origen, formación y clasificación del suelo (Duque Escobar and Escobar Potes 2016). Por esta razón, es imprescindible establecer el tipo de mejoramiento o estabilización del suelo, ya que a partir de ahí se puede abordar de forma adecuada la distribución de esfuerzos y deformaciones ocasionados por la presencia de cargas externas impuestas por diferentes tipos de estructuras (Javier García García and Gustavo Páez 2019).

En general, para la mayoría de los proyectos de ingeniería el suelo no presenta la capacidad de soporte suficiente para la estabilidad de una estructura, dado que en ocasiones estos suelos pueden estar contaminados principalmente por acción antrópica (Henao Gallego and Marulanda Rivas 2013), desencadenando en asentamientos mayores a los admisibles que requieren de algún tipo de cimentación que no sea superficial, pero donde diseñar un tipo de cimentación profunda puede resultar sobredimensionada en comparación con los que sería estrictamente necesario. Por consiguiente, es ineludible realizar procesos de modificación o mejora para proporcionar a la obra un suelo de cimentación adecuado.

Por lo anterior, la implementación de una técnica de mejoramiento o estabilización surge a partir de la necesidad de construir sobre un suelo que en la mayoría de las ocasiones es deformable y puede suscitar daños en la estructura allí establecida (Dobrescu, Calarasu, and Craifaleanu 2017), además, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, puede llegar a presentar inconvenientes en su remoción, según sea su naturaleza, espesor y ubicación geográfica en la que se desarrolle el proyecto. Sin embargo, la elección del tipo de técnica dependerá exclusivamente de las circunstancias a enfrentar y aspectos como: tipo de estructura, tipo de suelo, costo y tiempo de ejecución de la técnica.

El presente artículo lleva a cabo una revisión bibliográfica acerca de las distintas técnicas utilizadas para aumentar o mejorar las características de resistencia, deformación y permeabilidad de los suelos; brindando herramientas que permitan al lector tener un horizonte de posibilidades frente a la necesidad de mejorar o estabilizar zonas donde por causa de la creciente demanda en la construcción de proyectos, es necesario reducir costos derivados de cimentaciones profundas.

2. Metodología

Partiendo de la premisa de que el artículo es una revisión bibliográfica de las técnicas de mejoramiento y estabilización utilizadas en la actualidad para rellenos antrópicos no controlados, se propuso en primera instancia repasar el contexto histórico de las técnicas utilizadas por antiguas civilizaciones para la construcción de caminos y edificaciones; posteriormente, analizar cada uno de los procedimientos utilizados a nivel mundial, para tener claridad frente a los procesos y tecnologías que puedan ser implementados en los lugares que los requieran. Finalmente, como resultado de la investigación, se procederá con la elaboración de comentarios y sugerencias consideradas relevantes que fueron observadas durante la consulta de información.

A continuación, se presenta de manera gráfica el proceso utilizado para el desarrollo del artículo:

Figura 1
Metodología



Fuente: Elaboración propia (2023)

3. Resultados y discusión

3.1. Contexto histórico

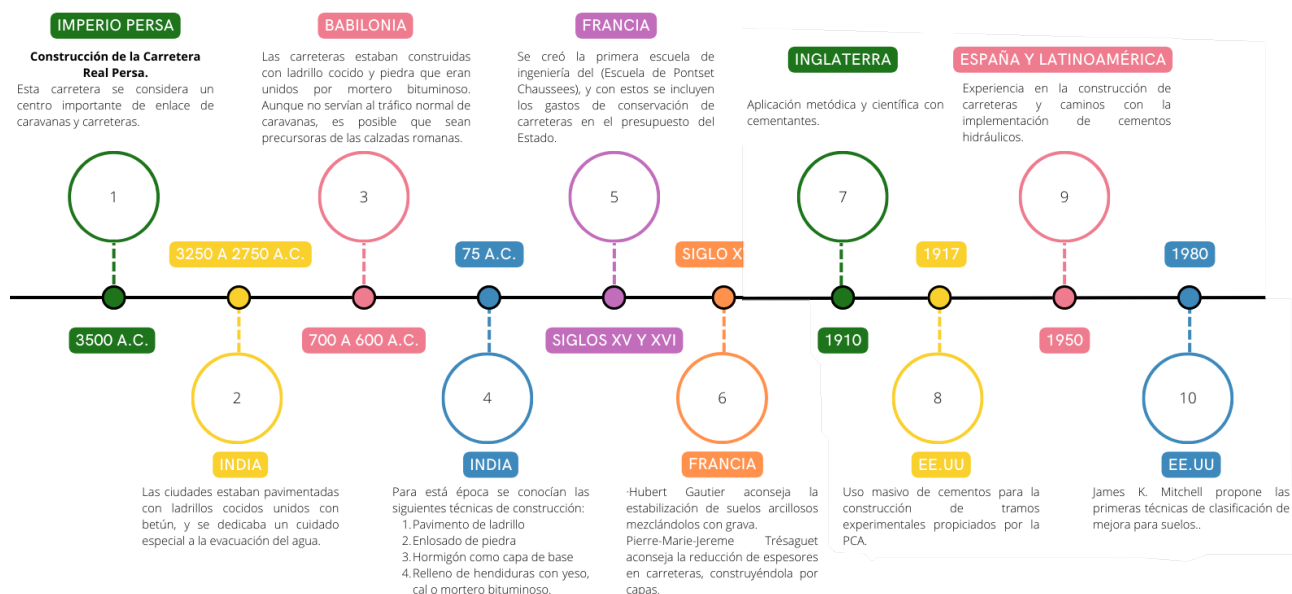
Los mesopotámicos fueron los primeros constructores de caminos en aplicar técnicas de mejoramiento en el suelo, probablemente, en las mismas regiones de oriente medio donde se dieron las primeras apariciones de la rueda y del animal de tiro. La carretera más antigua “carretera Real Persa” data del año 3500 al 300 a.C. cuya longitud registrada es de 2970 km aproximadamente. (Jhon Beens 2019).

La construcción del Camino Real fue la precursora para que otras civilizaciones como el Imperio Romano, optarán por implementar sus técnicas, métodos y materiales para el desarrollo de su economía. Dichos caminos solían ser de tierra y los baches se rellenaban con ramas, arena o broza, además, tenían la ventaja de que resultaban menos vulnerables a las heladas y eran menos resbaladizos para los cascos de las caballerías (Molina 1999).

Desde tiempos remotos se ha registrado el uso de técnicas para mejorar la calidad del suelo (Figura 2). Por ejemplo, uno de los primeros usos del cemento fue durante la construcción de las Pirámides de Xi’An, provincia de Shaanxi en China, construidas hace más de 5000 años (Huecas 2011). También se ha constatado el uso de bambú en las murallas de Agar Quf, ubicadas en Mesopotamia y construidas cerca del año 1400 A.C. Otro ejemplo interesante es la mezcla de suelo y lana de llama para construir las calles de acceso al templo de La Luna, ubicado en el antiguo Perú.

En el siglo XVII, para la construcción del Taj Mahal (India), fue utilizada por primera vez la técnica de columnas de grava; las cuales fueron excavadas y compactadas a mano, donde se observó un buen comportamiento para suelos compuestos por arcillas medias, limos, limos arenosos, arenas limosas y rellenos. (HOLCIM 2016)

Figura 2
Línea de tiempo



Fuente: Elaboración propia (2023)

Ya en la época moderna se dió la aplicación metódica y científica de suelos mejorados con cementantes en Inglaterra para la década de 1910. En América del norte, se procedió con el uso masivo de cementos para la construcción de gran cantidad de tramos experimentales promovidos por la Asociación de Cementos Portland (PCA por sus siglas en ingles), a partir de 1917. En España y Latinoamérica, las primeras experiencias se dieron después de la Segunda Guerra Mundial; países como Colombia, Argentina y El Salvador tienen más de 50 años de experiencia en la construcción masiva de caminos con el uso de cementos hidráulicos.(HOLCIM 2016)

Las primeras técnicas estudiadas de clasificación de mejora para suelos las propuso James K. Mitchell³ de la Universidad de Virginia Tech, a finales de la década del 70 e inicios de 1980. Habitualmente, las empresas se han fundamentado en estos métodos para presentar u organizar una clasificación de acuerdo con su necesidad. (Anon 2018).

3.2. Técnicas utilizadas

3.2.1. Mejoramiento

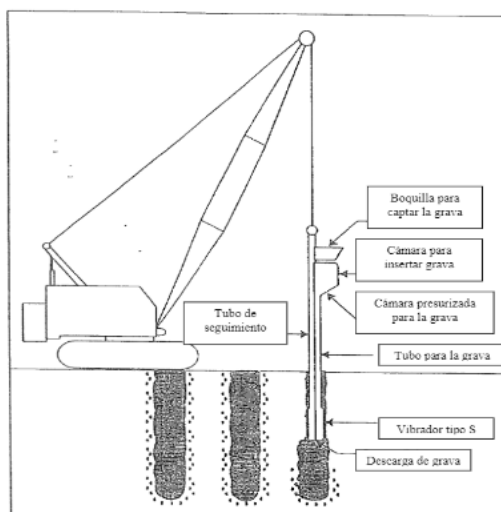
Columnas de grava

Esta técnica consta de perforaciones verticales que se rellenan con grava (Castro 2020a) (Figura 3), ofreciendo confinamiento lateral al suelo contiguo y actuando como drenaje para acelerar la consolidación (Patel 2019). Puede ser empleada para reforzar cualquier tipo de suelo blando a profundidades menores de 20 m (Alonso Burgos 2002), brindando un refuerzo sobre el cual se puede cimentar directamente sin necesidad de conectar las columnas entre sí (Castillo Trejo 2015). También, brinda estabilidad al deslizamiento, reduce los

³ James K. Mitchell, ingeniero civil con títulos de Máster y Doctor en Ciencias por el Instituto Tecnológico de Massachusetts en 1953 y 1956. Decano de la facultad de ingeniería de la Universidad de California de 1979 a 1985. Sus actividades docentes, de investigación y de consultoría se centraron en el comportamiento del suelo, la estabilización del suelo, la mejora del terreno, los suelos lunares, la geotecnia medioambiental, la ingeniería geotécnica de terremotos y la mitigación del riesgo sísmico.

asentamientos totales y diferenciales y el tiempo para que ocurran; así como el potencial de licuefacción (INVIAS 2012)-(Castro 2020b). Según Alonso Pollán, esta técnica también puede ser utilizada en rellenos antrópicos. (Alonso Pollán 2014).

Figura 3
Proceso para la construcción de columnas de grava



Fuente: (Milián Gutiérrez 2005)

Kumar, Dutta, and Nainegali (2018), proponen la implementación de columnas en concreto demolido para reducir los asentamientos en minas rellenas con desechos mineros heterogéneos (India). La propuesta precisa la construcción de columnas para profundidades de 8 a 12 m. Sin embargo, se debe tener en cuenta la gradación del material para facilitar el paso de agua entre las partículas de concreto triturado.

Otros estudios acerca del uso y comportamiento de geosintéticos muestran una mejora sustancial de la capacidad de soporte del suelo (Rowe, Liu, and Taechakumthorn 2015), planteando que este tipo de materiales se pueden implementar por separado o combinado con otras técnicas, como es el caso del uso de geotextil en la construcción de columnas de grava, donde se utiliza un revestimiento que mejora la capacidad de soporte aproximadamente 1.7 en comparación con las columnas sin revestir (Miranda et al. 2017).

Para Jain S, Nusari M, Acharya I (2020) la combinación de geomallas y columnas de grava son una solución efectiva para reducir los asentamientos y aumentar la capacidad de carga en los suelos blandos del valle de Katmandú. Sin embargo, se debe tener presente que el refuerzo del suelo con geomallas está en función del tamaño de las partículas y la geometría de la carga, estableciendo que el tamaño nominal óptimo de la geocelda debe ser 15 veces el tamaño de la partícula media del material utilizado como relleno y el ancho del elemento de cimentación debe estar entre 13 a 27 veces el tamaño del grano (Tavakoli Mehrjardi, Behrad, and Moghaddas Tafreshi 2019).

Precarga y compactación dinámica

La combinación de técnicas de precarga y compactación dinámica (Figura 4) es ampliamente utilizada. Se demostró (Kumar et al. 2018) que la compactación dinámica, realizada desde una altura de 20 m con un elemento de 0.4 m² y una carga de 15 t, es efectiva a profundidades de 0 m a 2.5 m, sin embargo, funciona hasta los 7.5 m de profundidad, aunque no con la misma eficiencia. Caso contrario ocurre con la precarga, realizada con un elemento de 4.65 m² y 7 m de altura, donde se encontró que funcionó hasta una profundidad de 10 m.

Figura 4

Procedimiento de compactación dinámica



Fuente: (Serrano, Cruz, and Martin-Schmädke 2020)

Hamidi y Varaksin (2015) informan acerca del uso de estas técnicas para la construcción de las plantas de tratamiento de aguas residuales en Palm Jumeira, Dubai. Un grupo de islas creadas por el hombre con la implementación de arena carbonatada que fue dragada del golfo pérsico y dispuesta en barcasas de vertido de fondo sin ningún tipo de tratamiento adicional. Allí se encontró que el uso de la compactación dinámica periférica a un relleno de 4 m de altura realizado para sobrecargar la zona por varios días aumentaba entre 1.3 y 5 veces la magnitud del asentamiento, en comparación con los asentamientos causados por una precarga (Hamidi and Varaksin 2015).

Compactación profunda

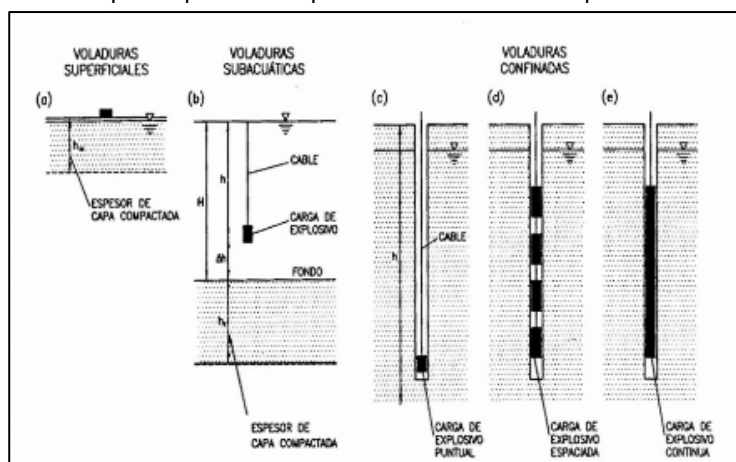
Cuno and Carrasco (2021) desarrollaron pruebas de desempeño de compactación con vibrocompactación profunda a los rellenos realizados en la ampliación del muelle del Puerto Caucedo, Republica Dominicana y encontraron que este tipo de técnica está restringido a suelos compuestos por grava y arena con cierto patrón o grilla de vibrado, pero mejora la densidad relativa de los rellenos (Cuno and Carrasco 2021).

Compactación mediante explosivos

Esta técnica (Figura 5) se ha utilizado en el puerto de Valencia, España, para consolidar rellenos hidráulicos (Romana y Ronda, 1997) y en Colombia, en la cantera Buenavista ubicada a las afueras de la sabana de Bogotá (Martínez Mendoza and Yepes Suica n.d.). Esta técnica consiste en colocar cargas explosivas en suelos granulares poco densos para conseguir asentamientos uniformes, por tanto, un aumento de su peso específico (Yepes Piqueras 2021). Los resultados son buenos considerando que se puede incrementar la densidad relativa de una arena floja de un 15-30%. Se trata de un procedimiento rápido y económico, no siendo necesario el empleo de una maquinaria especial. Suele terminarse el tratamiento con una compactación final de tipo superficial mediante rodillos vibrantes. La profundidad efectiva suele ser alrededor del 75% del espesor del estrato a compactar con intervalos de carga entre 5 y 15 m. (Laporte 2009)

Como desventaja a este método se le otorga el efecto de las explosiones sobre estructuras próximas al radio de acción, el factor psicológico negativo asociado al uso de explosivos y el cumplimiento de la normativa relacionada con los explosivos, especialmente en áreas pobladas. Por otra parte, el control de resultados requiere una exploración geotécnica posterior para evaluar el efecto del tratamiento (Arriaga 2006).

Figura 5
Esquema para la compactación del suelo con explosivos



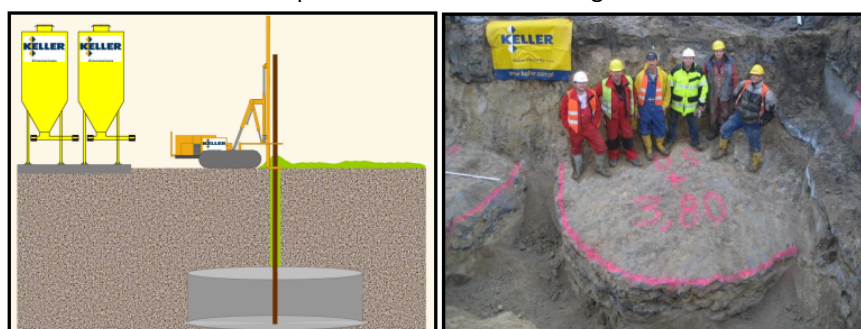
Fuente: (Gastón 2009)

Jet Grouting

Según Essler & Yoshida (2004), la primera patente de esta técnica se aplicó en Reino Unido (Inglaterra) en los años 50, sin embargo, su primer desarrollo práctico se llevó a cabo en Japón a principios de los años 70, y a mediados de estos tiempos (años 70) se introdujo en Europa y desde entonces se ha ido implementando en todo el mundo (Vukotić 2019).

Esta técnica (Figura 6) tiene múltiples aplicaciones como: Mejora del terreno, impermeabilización, obras auxiliares para construcción de túneles, recalces, estabilización de laderas, entre otras. Dentro de sus principales ventajas se tiene su aplicabilidad, pues es recomendable para casi todos los tipos de terreno (desde arcillas hasta rocas débiles). Y su versatilidad y flexibilidad, ya que se puede realizar en espacios reducidos y alcanzando grandes profundidades sin tener que descubrir el terreno hasta la superficie.

Figura 6
Implementación de Jet Grouting



Fuente: (Díaz n.d.)

3.2.2. Estabilización

El proceso de estabilización es considerado como un tratamiento a poca profundidad (Roshan et al. 2022) que busca modificar y controlar algunas características del suelo de modo que el cambio en su comportamiento ante factores externos no sea tan abrupto; brindando un elemento de soporte estable para cimentar y construir en el lugar. Se ha observado que durante este proceso se involucra reacciones de hidratación, intercambio catiónico,

floculación y puzolánicas (Barman and Dash 2022). Para (Rosales, 2014) el suelo puede ser estabilizado con aditivos como cal, cemento, ceniza volante, entre otros (Hurtado 2018), cuya función es reorganizar la macroestructura del suelo uniendo las partículas (Parthiban et al. 2022). No obstante, el éxito de la técnica depende en gran parte de la dosificación, el proceso de homogeneizado y el tiempo de curado.

Cemento

El uso de cemento hace parte de una de las técnicas más convencionales para estabilizar suelos blandos (Figura 7), además, se puede combinar con cenizas volantes, yeso y fibras (Alam, Naseer, and Shah 2015; Burroughs 2010; Zak et al. 2016).

Mezclando cemento con polvo de horno de cemento se ha implementado para estabilizar suelos con estratos salinos conocidos como sabkha hallados en el medio oriente (Shuja et al. 2022), donde su principal desventaja es poseer una baja resistencia al corte. Los resultados permitieron establecer que las cualidades de durabilidad y resistencia con esta adición de cemento y polvo de horno de cemento se dan a corto plazo.

Figura 7
Estabilización con cemento



Fuente: (Argos n.d.; Díaz 2008)

Cal

Utilizar cal como agente estabilizador también es otra de las técnicas mas conocidas en la construcción (Figura 8). La estabilización con cal de un suelo de sedimento dragado (Sundary et al. 2022), en Lam Glumpang, Banda Aceh⁴, aumentó la resistencia al corte y la compresibilidad en una proporción de 6%.

Sin embargo, algunos estudios demuestran que adicionar otro tipo de elementos como fibras de coco ayudan a mejorar la resistencia al corte y aumentar el CBR de la subrasante.

Las fibras de coco son ricas en lignina, lo que ayuda a mantener la resistencia a la tracción, incluso en condiciones saturadas, brindando así, un aumento del CBR y de la resistencia al corte (Boobalan and Sivakami Devi 2022).

⁴ Lam Glumpang, es una aldea ubicada en el subdistrito de Ulee Kareng, ciudad de Banda Aceh, provincia de Nanggroe Aceh Darussalam, Indonesia.

Figura 8
Estabilización con cal



Fuente: (Association 2004; Garcia Restrepo n.d.)

Subproductos

La estabilización con residuos de mármol (Pateriya et al. 2022), en los acopios clandestinos en caminos o terrenos abandonados, permitió observar el funcionamiento de los aditivos mezclados con cenizas volantes y nanomateriales de polvo de óxido de grafeno (rGO), para esta investigación se demostró una mejora en el CBR hasta en 800%, y una resistencia a la compresión no confinada de 3 MPa.

El uso de latex de caucho natural (Tran et al. 2022) es utilizado para mejorar la resistencia a la fatiga del suelo estabilizado con cemento y mezclar cenizas de aserrín a un suelo estabilizado con cemento (James 2019), presenta un aumento en la resistencia aproximadamente 8%.

Atahu, Saathoff, and Gebissa (2019) estudiaron la posibilidad de utilizar ceniza de cascarilla de café (CHA) para el mejoramiento de suelos; cuyos resultados permitieron mostrar que el suelo tratado con una adición del 20% de CHA aumenta su capacidad de carga en tres veces, además de cementar las partículas que componen el suelo.

La quema de carbón en centrales carboeléctricas proporciona partículas vítreas silíceas aluminosas redondas de grano fino no plásticas, que según Barman & Dash (2022) pueden usarse como agente secante para suelos húmedos, control volumétrico y mejora de la resistencia.

Polímeros y Geopolímeros

Los geopolímeros son materiales inorgánicos activados con aluminosilicatos que son utilizados en la construcción gracias a sus propiedades de resistencia mecánica, química y térmica (Provis and Bernal 2014).

Una revisión bibliográfica realizada (Huang et al. 2021) para uso de polímeros en la estabilización de suelos, analizó las propiedades que influyen en la efectividad de la técnica, entre las que resaltan el tamaño de las partículas, la solubilidad, la conformación y el comportamiento ante la humedad. También mencionan los mecanismos clave de la interacción de los polímeros con suelos arcillosos (fuerzas electroestáticas y aumento de entropía) y la formación de lazos poliméricos en suelos granulares que ocasionan una adherencia entre las partículas (Figura 9).

La utilización de acetato de polivinilo (PVA) para estabilizar y mejorar los suelos; demostró que el contenido óptimo de este material es de 3% para lograr una mayor retención de agua, resistencia a la erosión y crecimiento de plantas (Wang et al. 2022). Además, incrementó la cohesión de las partículas en un 50% y su ángulo de fricción interna en 3.5°.

Figura 9
Estabilización con polímeros



Fuente: (Aguilar Castañeda and Borda Riveros 2015)

Nanopartículas

El uso de nanosílice y cemento blanco se ha estudiado para ser utilizados como aditivos estabilizantes (Kulanthaivel et al. 2021); con una dosificación óptima en peso del suelo corresponde a 2% de nanosílice y 3% de cemento blanco, siendo mezclados con el suelo de igual forma que los geopolímeros, por riego (Figura 10). Mostrando mejora en la resistencia del suelo, reduciendo la compresibilidad y la conductividad hidráulica del suelo (Kannan and Sujatha 2022).

Figura 10
Estabilización con nanopartículas



Fuente: (Eslava Colmenares 2021)

3.2. Analisis de las técnicas

Como resultado de la consulta bibliográfica realizada, se encontró que existen múltiples técnicas de tratamiento para reforzar y aumentar las características del suelo; técnicas que se clasifican en mejoramiento y estabilización y las cuales garantizan un mejor comportamiento frente a las necesidades particulares de las distintas estructuras.

En la Tabla 1, se analizan cada una de las técnicas consultadas, indicando los tipos de suelo en los que mejor comportamiento tiene cada una de ellas y las propiedades mejoradas. Sin embargo, es importante resaltar que la elección de la técnica depende de la composición de estrato, puesto que al ser un relleno antrópico no controlado, una de sus principales características es la heterogeneidad en los materiales que lo conforman.

Como es preciso observar, las técnicas de mejoramiento presentan un mejor desempeño a profundidades que oscilan entre los 10 y 20 m, mientras que las técnicas de estabilización son para tratamientos superficiales. Además, es importante definir los parámetros que se requieren mejorar, ya que no todas las técnicas ofrecen el mismo potencial de reforzamiento a la hora de tratar el suelo.

Por otro lado, la técnica de Jet Grouting es considerada una de las mejores técnicas para el tratamiento de suelos, debido a que puede ser utilizada tanto en suelos granulares como cohesivos, además de mejorar la resistencia,

deformabilidad y permeabilidad del terreno. Asimismo, su proceso constructivo permite alcanzar grandes profundidades sin necesidad de intervenir grandes áreas.

Cuadro 1
Resumen de las técnicas consultadas

Técnica		Tipo de terreno		Mejora			Profundidad efectiva
		Granulares	Cohesivos	Resistencia	Deformabilidad	Permeabilidad	
Mejoramiento	Columnas de grava	✗	✓	✓	✓	✓	No mayor a 20 m
	Precarga y compactación dinámica	✓	✓	✓	✓	✗	Hasta los 10 m
	Compactación profunda	✗	✓	✓	✓	✗	Usualmente no mayores a 15 m
	Compactación mediante explosivos	✓	✗	✓	✓	✓	75% del estrato a compactar
	Jet Grouting	✓	✓	✓	✓	✓	No mayor a 20 m
Estabilización	Cemento	✓	✓	✓	✗	✗	Superficial
	Subproductos	Depende del subproducto utilizado		✓	✗	✓	Superficial
	Polímeros y Geopolímeros	✓	✓	✓	✗	✓	Superficial
	Nanopartículas	✗	✓	✓	✓	✓	Superficial

Fuente: Adaptado de (INVIAS 2012)

También es posible deducir que independientemente de la técnica escogida para tratar el suelo, tanto el mejoramiento como la estabilización brindan resistencia a la capa de suelo. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, las técnicas de estabilización son para tratamientos superficiales, situación que debe ser analizada en función del tipo de estructura y la resistencia requerida para que los elementos que componen la estructura no se vean afectados.

Finalmente, una técnica efectiva pero poco recomendable es la compactación con explosivos, dado que puede representar un riesgo desde el punto de vista de seguridad y salud en el trabajo, además, su desarrollo e implementación requiere de equipos y personal calificado, lo que deriva en un aumento económico significativo.

4. Conclusiones

De la bibliografía consultada se puede concluir que los procedimientos de mejoramiento son más efectivos que las estabilizaciones, tomando en cuenta que aumentan la resistencia y disminuyen las posibilidades de que el suelo se deforme con la aplicación de cargas. Sin embargo, para la elección de la técnica se debe tener en cuenta la incidencia del nivel freático, ya que no todas aumentan la permeabilidad.

En el caso de las técnicas de estabilización, por ser en su mayoría procedimientos que contemplan el uso de agentes químicos; se recomienda adelantar ensayos de laboratorio o ensayos en el sitio de trabajo que permitan establecer una dosificación o fórmula de trabajo óptima para la intervención del suelo. Asimismo, establecer el

tiempo de curado y todas las variables a tener en cuenta para ser implementadas durante el proceso constructivo. Por otra parte, es importante por resaltar que las técnicas de estabilización son de bajo costo y fácil implementación. Sin embargo, presentan una limitante y es que solo pueden ser utilizadas para tratamientos superficiales, de lo contrario, sería necesario remover gran cantidad del suelo para realizar la mezcla derivando en costos adicionales.

Teniendo en cuenta la información presentada en la Tabla 1, las técnicas de mejoramiento de Jet Grouting y Columnas de Grava son las que garantizan un mejor comportamiento frente a la interacción suelo-estructura, además, representan una ventaja técnica, económica y constructiva en comparación con cimentaciones profundas, ya que garantiza el aumento de la resistencia del suelo, la disminución de asentamientos y según el material empleado, aumento de la permeabilidad. Adicionalmente, su proceso constructivo no requiere de equipos y mano de obra con alto grado de formación o complejidad.

Finalmente, a lo largo de la investigación se constató que no existe mucha investigación relacionada con los rellenos antropicos no controlados. Aún así, este trabajo puede ser el punto de partida para desarrollar diferentes estudios acerca del uso y comportamiento de nuevas técnicas para mejorar la calidad de los suelos objeto de este documento.

Referencias bibliográficas

- Aguilar Castañeda, Catherine Gisella, and Yeraldin Borda Riveros. 2015. "Revisión Del Estado Del Arte Del Uso de Polímeros En La Estabilización de Suelos."
- Alam, I., A. Naseer, and A. A. Shah. 2015. "Economical Stabilization of Clay for Earth Buildings Construction in Rainy and Flood Prone Areas." *Construction and Building Materials* 77:154–59. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046.
- Alonso Burgos, A. 2002. "Guía de Cimentaciones En Obra de Carreteras." *Madrid, España*.
- Alonso Pollán, José Antonio. 2014. "Diseño Basado En Técnicas de Fiabilidad Del Tratamiento de Mejora Del Terreno Mediante Columnas de Grava." Universidad Politécnica de Madrid.
- Anon. 2018. "Recomendaciones tecnicas para el mejoramiento de suelo."
- Argos. n.d. "Suelo Cemento, Una Alternativa Para La Construcción de Vías Terciarias."
- Arriaga, D. 2006. "Aspectos Constructivos de La Técnica de Compactación Dinámica Para Mejoramiento Masivo de Suelos." *Trabajo Final de Graduación, Universidad Autónoma de México, Ciudad de México*.
- Association, Nacional Lime. 2004. "Manual de Estabilización de Suelo Tratado Con Cal." *Nacional Lime Association*.
- Atahu, M. K., F. Saathoff, and A. Gebissa. 2019. "Strength and Compressibility Behaviors of Expansive Soil Treated with Coffee Husk Ash." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 11(2):337–48. doi: 10.1016/j.jrmge.2018.11.004.
- Barman, Dharmendra, and Sujit Kumar Dash. 2022. "Stabilization of Expansive Soils Using Chemical Additives: A Review." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 14(4):1319–42. doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.011.
- Behnood, Ali. 2018. "Soil and Clay Stabilization with Calcium- and Non-Calcium-Based Additives: A State-of-the-Art Review of Challenges, Approaches and Techniques." *Transportation Geotechnics* 17:14–32. doi: 10.1016/j.trgeo.2018.08.002.

- Braja, M. das. 2001. "Fundamentos de Ingeniería Geotécnica." *Thomson y Learning* 580.
- Burroughs, Steve. 2010. "Recommendations for the Selection, Stabilization, and Compaction of Soil for Rammed Earth Wall Construction." *Journal of Green Building* 5(1):101–14. doi: 10.3992/jgb.5.1.101.
- Calle, Oscar Correa, Francisco Javier García Orozco, and Diego Alexander Escobar García. 2013. "Representación de Estados y Trayectorias Volumétricas y Gravimétricas En Suelos." *Avances: Investigacion En Ingenieria* 10(1):20–26.
- Castillo Trejo, Francis Víctor. 2015. "Construcción de Columnas de Grava Para Aumentar La Capacidad Portante de Suelos Blandos."
- Castro, Jorge. 2020a. "Avances En El Diseño y Cálculo de Columnas de Grava. Parte I: Ejemplo de Cálculo." *Informes de La Construcción* 72(560):e362. doi: 10.3989/ic.71911.
- Castro, Jorge. 2020b. "Avances En El Diseño y Cálculo de Columnas de Grava. Parte I: Ejemplo de Cálculo." *Informes de La Construcción* 72(560):e362. doi: 10.3989/ic.71911.
- Cuno, Rubén D., and Aristides Carrasco. 2021. "Pruebas de Desempeño de Compactación Como Validación Del Diseño Del Mejoramiento de Terreno Usando Vibrocompactación Profunda En La Ampliación Del Puerto Caucedo–Republica Dominicana."
- Díaz, Enmanuel Carvajal. n.d. *Avances en la ejecución y control de: jet grouting y columnas de grava off-shore*.
- Díaz, Manuel Atienza. 2008. *Manual de Estabilización de Suelos Con Cemento o Cal*. Instituto Español del cemento y sus aplicaciones.
- Dobrescu, Cornelia-Florentina, Elena-Andreea Calarasu, and Iolanda-Gabriela Craifaleanu. 2017. "Ground Settlement in Urban Structures Exposed to Geo-Environmental and Anthropic Hazards: A Case Study for Galati." *Procedia Engineering* 190:611–18. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.387.
- Duque Escobar, Gonzalo, and Carlos Enrique Escobar Potes. 2016. "Geomecánica." *Ingeniería Civil*.
- Eslava Colmenares, Wilmar Antonio. 2021. "Revisión Documental: La Nanotecnología y Su Influencia En La Construcción de La Vía Terciaria Que Conduce a La Vereda La Balsita, Sector Diamante Del Municipio de Agua de Dios, Cundinamarca." Corporación Universitaria Minuto de Dios, Girardot.
- Garcia Restrepo, Angie Lorena. n.d. "Estabilización de Suelos Con Cal Como Una Alternativa Viable Para La Construcción y Rehabilitación de Caminos Rurales En Colombia."
- Gastón. 2009. *Mejoramiento de suelos usando explosivos*.
- Goran Vukotic, T. K. 2016. *JET GROUTING - UNA SOLUCION A LOS PROBLEMAS EN LOS TUNELES URBANOS*.
- Hamidi, Babak, and Serge Varaksin. 2015. "Dynamic Compaction and Dynamic Surcharging at Dubai's Palm Jumeira Sewage Treatment Plants." Pp. 309–35 in *Ground Improvement Case Histories*. Elsevier.
- Henao Gallego, Jairo Alonso, and Carlos Andrés Marulanda Rivas. 2013. "Evaluación de Asentamientos y de Las Propiedades Físico-Mecánicas Del Relleno Antrópico Localizado En El Sector de Villa Verde, de Pereira, Risaralda."
- HOLCIM. 2016. *Soluciones En Cemento*.

- Huang, Jianxin, Reginald B. Kogbara, Narain Hariharan, Eyad A. Masad, and Dallas N. Little. 2021. "A State-of-the-Art Review of Polymers Used in Soil Stabilization." *Construction and Building Materials* 305:124685. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124685.
- Huecas, Gregorio Doval. 2011. *Breve Historia de La China Milenaria*. Nowtilus.
- Hurtado, David Rosales. 2018. "Mejoramiento de Suelos Expansivos Mediante Inclusiones de Fibras."
- INVIAS. 2012. "Manual de Diseño de Cimentaciones Superficiales y Profundas Para Carreteras." *INVIAS* 775–85.
- Jain, Sanjaya Kumar, Mohammed Saleh Nusari, and Indra Prasad Acharya. 2020. "Use of Geo-Grid Reinforcement and Stone Column for Strengthening of Mat Foundation Base." *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.757.
- James, Jijo. 2019. "Strength Benefit of Sawdust/Wood Ash Amendment in Cement Stabilization of an Expansive Soil." *Revista Facultad de Ingeniería* 28(50):44–61. doi: 10.19053/01211129.v28.n50.2019.8790.
- Javier García García, and Gustavo Páez. 2019. *El suelo como elemento portante de las fundaciones / cimentaciones*.
- Jhon Beens. 2019. "El Camino Real Persa: El Primer Sistema de Rutas Integradas En El Mundo."
- Kannan, G., and E. R. Sujatha. 2022. "A Review on the Choice of Nano-Silica as Soil Stabilizer." *Silicon* 14(12):6477–92. doi: 10.1007/s12633-021-01455-z.
- Kulanthaivel, P., B. Soundara, S. Velmurugan, and V. Naveenraj. 2021. "Experimental Investigation on Stabilization of Clay Soil Using Nano-Materials and White Cement." *Materials Today: Proceedings* 45:507–11. doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.107.
- Kumar, Sumit, Sekhar Chandra Dutta, and Lohitkumar Nainegali. 2018. "Constructing Structures on Backfilled Opencast Mine Spoil for Better Sustainability." *Current Science* 114(10):2053–62.
- Laporte, Gaston. 2009. *Mejoramiento de suelos usando explosivos*.
- Martínez Mendoza, Henry Giovanni, and Hugo Yepes Suica. n.d. "Densificación de Suelos Granulares Con Explosivos."
- Martínez, Pedro J. Olmos. 2010. "El Terreno Como Material Constructivo En La Ingeniería Civil Desde La Perspectiva de La Arquitectura de Tierra." Pp. 267–80 in *La arquitectura construida en tierra: tradición e innovación: Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos 2004/09*. Cátedra Juan de Villanueva.
- Milián Gutiérrez, F. J. 2005. "Columnas de Grava Para El Mejoramiento de Suelos." *Doctoral Dissertation, Universidad Del Valle de Guatemala*.
- Miranda, Marina, Almudena da Costa, Jorge Castro, and César Sagaseta. 2017. "Influence of Geotextile Encasement on the Behaviour of Stone Columns: Laboratory Study." *Geotextiles and Geomembranes* 45(1):14–22. doi: 10.1016/j.geotexmem.2016.08.004.
- Molina, Ángel Luis Molina. 1999. "Viajeros y Caminos Medievales." *Cuadernos de Turismo* (4):111–26.
- Parthiban, Devarajan, Dhanasingh Sivalinga Vijayan, Eugeniusz Koda, Magdalena Daria Vaverkova, Konrad Piechowicz, Piotr Osinski, and Bui van Duc. 2022. "Role of Industrial Based Precursors in the Stabilization of

- Weak Soils with Geopolymer – A Review.” *Case Studies in Construction Materials* 16:e00886. doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00886.
- Patel, Anjan. 2019. “Stone Column Method.” Pp. 49–60 in *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*. Elsevier.
- Pateriya, A. S., D. J. Robert, K. Dharavath, and S. K. Soni. 2022. “Stabilization of Marble Wastes Using Cement and Nano Materials for Subgrade Applications.” *Construction and Building Materials* 326:126865. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126865.
- Provis, John L., and Susan A. Bernal. 2014. “Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials.” *Annual Review of Materials Research* 44(1):299–327. doi: 10.1146/annurev-matsci-070813-113515.
- Roshan, Mohammad Jawed, Ahmad Safuan A Rashid, Norshakila Abdul Wahab, Sakina Tamassoki, Siti Norafida Jusoh, Muhammad Azril Hezmi, Nik Norsyahariati Nik Daud, Nazirah Mohd Apandi, and Mastura Azmi. 2022. “Improved Methods to Prevent Railway Embankment Failure and Subgrade Degradation: A Review.” *Transportation Geotechnics* 37:100834. doi: 10.1016/j.trgeo.2022.100834.
- Rowe, R. Kerry, Kaiwen Liu, and Chalermphol Taechakumthorn. 2015. “Use of Geosynthetics to Aid Construction over Soft Soils1.” Pp. 559–82 in *Ground Improvement Case Histories*. Elsevier.
- Serrano, Carlos Herminio, María Pía Cruz, and Italo Federico Martin-Schmädke. 2020. “Aplicación de Compactación Dinámica Para Estructuras de Gran Impronta En Córdoba, Argentina.” *Revista Facultad de Ingeniería* 29(54):e10861. doi: 10.19053/01211129.v29.n54.2020.10861.
- Shuja, Danish, Chiranjeevi Rahul Rollakanti, Kiran Kumar Poloju, and Adams Joe. 2022. “An Experimental Investigation on -Stabilization of Sabkha Soils with Cement and Cement Kiln Dust (CKD) in Sultanate of Oman.” *Materials Today: Proceedings* 65:1033–39. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.127.
- Sundary, Devi, Reza Pahlevi Munirwan, Nafisah Al-Huda, Munirwansyah, Munira Sungkar, and Ramadhansyah Putra Jaya. 2022. “Shear Strength Performance of Dredged Sediment Soil Stabilized with Lime.” *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 128:103299. doi: 10.1016/j.pce.2022.103299.
- Tavakoli Mehrjardi, Gh, R. Behrad, and S. N. Moghaddas Tafreshi. 2019. “Scale Effect on the Behavior of Geocell-Reinforced Soil.” *Geotextiles and Geomembranes* 47(2):154–63. doi: 10.1016/j.geotexmem.2018.12.003.
- Tran, Ngoc Quynh, Menglim Hoy, Apichat Suddeepong, Suksun Horpibulsuk, Karn Kantathum, and Arul Arulrajah. 2022. “Improved Mechanical and Microstructure of Cement-Stabilized Lateritic Soil Using Recycled Materials Replacement and Natural Rubber Latex for Pavement Applications.” *Construction and Building Materials* 347:128547. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128547.
- Vukotić, Goran. 2019. “SOIL IMPROVEMENT BY JET GROUTING FOR THE CONSTRUCTION OF THE ACCESS TO THE BARCELONA AIRPORT APPLICATION OF THE RECENT TECHNOLOGIES.” *SOIL IMPROVEMENT CHALLENGES ON ALLUVIAL ZONES* 41.
- Wang, Ying, Jin Liu, Cheng Lin, Xiao-fan Ma, Ze-zhuo Song, Zhi-hao Chen, Can-hui Jiang, and Chang-qing Qi. 2022. “Polyvinyl Acetate-Based Soil Stabilization for Rock Slope Ecological Restoration.” *Journal of Environmental Management* 324:116209. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116209.
- Yepes Piqueras, Víctor. 2021. “Procedimientos de Construcción Para La Compactación y Mejora Del Terreno.” *Colección Manual de Referencia*.

Zak, Philip, Taha Ashour, Azra Korjenic, Sinan Korjenic, and Wei Wu. 2016. "The Influence of Natural Reinforcement Fibers, Gypsum and Cement on Compressive Strength of Earth Bricks Materials." *Construction and Building Materials* 106:179–88. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.031.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial 4.0 Internacional