

CAPÍTULO - 15

Análisis del comportamiento mecánico de suelos de subrasante estabilizados con aditivos no tradicionales

Analysis of the mechanical behavior of subgrade soils stabilized with non-traditional additives

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.c.04.15>

Jorge Castro

 Universidad de Antioquia, Medellín - Antioquia, Colombia

✉ armando.castro@udea.edu.co

 <https://orcid.org/0009-0005-3790-7567>

Gloria Restrepo

 Universidad de Antioquia, Medellín - Antioquia, Colombia

✉ gloria.restrepo1@udea.edu.co

 <https://orcid.org/0000-0001-6716-8834>

Resumen

El uso de aditivos químicos no tradicionales ha ganado creciente atención en la ingeniería geotécnica debido a su potencial para mejorar las propiedades mecánicas y la estabilidad de suelos con bajas prestaciones ingenieriles. En este estudio se evaluó el efecto de la adición de geomateriales comúnmente presentes en subrasantes de vías no pavimentadas, específicamente limo y arena, sobre el comportamiento de una caolinita y una bentonita cálcica, representativas de suelos típicos de los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca, Colombia. Asimismo, se investigó la influencia de dos estabilizantes no tradicionales: nanosílice y un aditivo a base de organosilanos (Terrasil), sobre la respuesta mecánica de estos suelos. Las mezclas se prepararon con diferentes concentraciones de geomateriales y aditivos, y se evaluaron mediante ensayos de compactación, límites de consistencia, resistencia a la compresión no confinada y capacidad de soporte. Adicionalmente, se realizó caracterización mineralógica y fisicoquímica mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS), difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (XRF). Los resultados mostraron que la incorporación de limo y arena en la matriz arcillosa produjo mejoras más significativas en la resistencia a la compresión no confinada y en las propiedades índice, en comparación con los aditivos químicos en ausencia de activadores alcalinos y para un periodo de curado de siete días. Estas mejoras se atribuyen a la optimización de la gradación y a interacciones fisicoquímicas que favorecen una estructura más densa y cohesionada.

Palabras clave: aditivos no tradicionales, caolinita, bentonita cálcica, estabilización de suelos, geomateriales.



Abstract

The use of non-traditional chemical additives has gained increasing attention in geotechnical engineering due to their potential to improve the mechanical properties and stability of soils with low engineering performance. In this study, the effect of adding geomaterials commonly present in the subgrades of unpaved roads, specifically silt and sand, was evaluated on the behavior of a kaolinite and a calcium bentonite, representative of typical soils from the departments of Antioquia and Valle del Cauca, Colombia. Likewise, the influence of two non-traditional stabilizers, nanosilica and an organosilane-based additive (Terrasil), on the mechanical response of these soils was investigated. The mixtures were prepared with different concentrations of geomaterials and additives and evaluated through compaction tests, consistency limits, unconfined compressive strength, and bearing capacity. Additionally, mineralogical and physicochemical characterization was carried out using scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), X-ray diffraction (XRD), and X-ray fluorescence (XRF). The results showed that the incorporation of silt and sand into the clay matrix produced more significant improvements in unconfined compressive strength and index properties compared to chemical additives in the absence of alkaline activators and for a curing period of seven days. These improvements are attributed to the optimization of gradation and to physicochemical interactions that favor a denser and more cohesive structure.

Keywords: *non-traditional additives, kaolinite, calcium bentonite, soil stabilization, geomaterials.*

INTRODUCCIÓN

Los suelos arcillosos expansivos representan uno de los principales retos para la ingeniería geotécnica y vial en regiones tropicales y subtropicales, debido a su elevada susceptibilidad a cambios volumétricos inducidos por variaciones en el contenido de humedad. Este comportamiento genera pérdidas significativas de capacidad portante, agrietamiento prematuro de pavimentos, deformaciones diferenciales y elevados costos de mantenimiento de la infraestructura vial. Esta problemática está estrechamente relacionada con la presencia de minerales arcillosos del grupo de las esmectitas, caracterizados por su alta superficie específica y elevada capacidad de intercambio catiónico, propiedades que favorecen procesos intensos de hinchamiento y contracción (Mitchell & Soga, 2005; Nelson & Miller, 1992).

En Colombia, y particularmente en el departamento de Antioquia, la presencia de suelos arcillosos expansivos es frecuente en zonas influenciadas por depósitos residuales y transportados, derivados de rocas volcánicas y sedimentarias, donde las condiciones climáticas de alta pluviosidad y ciclos de humedecimiento-secado intensifican los problemas de estabilidad en obras viales y de infraestructura. Estas condiciones geotécnicas han motivado la búsqueda de soluciones de mejoramiento de suelos que permitan mitigar la expansividad y mejorar el desempeño mecánico de las capas de subrasante y terraplén.

La estabilización tradicional de suelos expansivos se ha realizado mediante el uso de aditivos convencionales como la cal y el cemento, los cuales inducen procesos de floculación, intercambio catiónico y reacciones puzolánicas que contribuyen a la mejora de la resistencia y la reducción de la plasticidad del suelo (Bell, 1996; Little, 1995). Sin embargo, la eficacia de estos métodos puede verse limitada en suelos altamente plásticos, además de presentar desventajas asociadas al elevado consumo de materiales; al impacto ambiental derivado de la producción de conglomerantes y a la necesidad de dosificaciones relativamente altas (Sherwood, 1993).

En este contexto, el uso de materiales granulares finos, como el limo y la arena, ha sido identificado como una alternativa eficaz para modificar la estructura del suelo y mejorar sus propiedades físicas, además es indispensable entender el efecto de estos geomateriales comúnmente presentes en las subrasantes de los suelos viales. Estudios experimentales han demostrado que la adición controlada de limo puede incrementar significativamente la resistencia no drenada y la cohesión del suelo, alcanzando valores óptimos para contenidos de finos entre el 10 % y el 20 %, dependiendo del estado de densificación, mientras que contenidos excesivos pueden producir efectos adversos sobre el esfuerzo desviador, tales como el incremento de la compresibilidad del material (Georgiannou et al, 1990). De manera similar, la incorporación de arena en suelos arcillosos expansivos ha mostrado mejoras notables en la compactación, la permeabilidad y la consistencia, favoreciendo una matriz suelo más estable y menos susceptible a la expansión volumétrica.

De otra parte, el desarrollo de aditivos no tradicionales, como compuestos orgánicos a base de silanos y el surgimiento de los nanomateriales, ha cobrado relevancia como alternativas más sostenibles para la estabilización de suelos. Los aditivos a base de organosilanos actúan principalmente mediante la formación de enlaces con las partículas del suelo; los nanoaditivos como la nanosílice y la nanoalúmina, actúan mediante la modificación de poros y reacciones de cementación en presencia de calcio y activadores alcalinos, reduciendo la plasticidad y aumentando la resistencia mecánica. Se caracterizan además por su elevada reactividad y alta superficie específica, lo que favorece el desarrollo de reacciones puzolánicas más intensas y homogéneas, incluso a bajas dosificaciones, por lo que generan menores impactos ambientales en comparación con los estabilizadores convencionales. En este sentido, la nanotecnología se presenta como una herramienta innovadora en la ingeniería geotécnica, debido a la capacidad de los nanomateriales para interactuar con el suelo a escala micro y nanoestructural, alterando de manera significativa sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas (Almajed et al., 2019; Choobbasti et al., 2017). Diversos estudios han evidenciado que la incorporación de nanomateriales, en combinación con pequeñas cantidades de agentes cementantes o estabilizantes químicos, permite incrementar la resistencia a compresión y el CBR, además de generar microestructuras más densas y estables, tal como se observa mediante análisis microestructurales (SEM) y químicos (FTIR).

En este trabajo se estudia el comportamiento de suelos arcillosos expansivos representativos del departamento de Antioquia y el Valle del Cauca, Colombia, mediante la adición de geomateriales como limo y arena a las matrices arcillosas caolinita y bentónica cálcica, y dos aditivos no tradicionales: un organosilano y una nanosílice, evaluando su efecto sobre las propiedades mecánicas, físicas y microestructurales del suelo. El uso combinado de limo, arena y aditivos químicos se justifica por la necesidad de abordar el problema de la expansividad del suelo desde un enfoque integral, actuando simultáneamente sobre la estructura granulométrica, las interacciones fisicoquímicas y los mecanismos de resistencia del suelo.

El estudio busca identificar combinaciones óptimas de materiales que permitan mejorar el desempeño geotécnico de estos suelos de subrasantes, reducir su expansividad y ofrecer alternativas técnicas y ambientalmente sostenibles para el diseño y construcción de infraestructuras viales en contextos geotécnicos complejos del territorio colombiano.

MÉTODO

Materiales

Suelos

Las muestras de suelo arcilloso evaluados en este estudio corresponden a dos arcillas comerciales no procesadas, una caolinita y una bentonita cálcica suministradas por las empresas Corona y Bentocol S.A.S respectivamente.

La caracterización de los suelos se realizó mediante procedimientos estándar ASTM e INVIAS; el suelo base fue analizado para determinar sus propiedades físicas y de índice, mientras que su composición química se determinó mediante análisis por difracción de rayos X (XRD) y fluorescencia de rayos X (XRF). La curva de distribución de tamaño de partículas del suelo se determinó de acuerdo con la norma ASTM D422-63 o INV E-123-13. En la Tabla 1 se presentan las propiedades físicas/de índice y químicas.

Tabla 1

Propiedades físicas/de índice y químicas de las arcillas y los geomateriales

Propiedades		Caolinita (K)	Bentonita Cálcica (BC)	Arena (A)	Limo (L)
Gravedad (g/cm ³)	específica	2,65	2,76		2,77
Porcentaje de grava (%)		0,5	0	1,9	-
Porcentaje de arena (%)		44,4	2,9	90,2	-
Porcentaje de finos (%)		55,1	97,1	7,9	
Límite líquido (%)		57	105	NL	32

CAPÍTULO 15
Jorge Castro; Gloria Restrepo

Límite plástico (%)	44	22	NP	33
Límite de contracción (%)	37	10	-	-
Índice de plasticidad (%)	13	83	NP	NP
Sistema de clasificación del suelo	MH	CH	SP-SM	-
Contenido óptimo de humedad (%)	11,5	24,7	8,3	-
Densidad seca máxima (kN/m³)	1827,3	1615,2	2195,7	-
Valor CBR sumergido (%)	1,5	1,2	16,6	-
Expansión (%)	9,73	7,19	1,48	
Materia Orgánica	4.29	3.10		4
pH	4.76	9.73	7.49	4.00
Conductividad (uS/cm)	29.40	1468.00	167.10	18.50

Los materiales empleados para la estabilización del suelo arcilloso incluyen adiciones minerales y aditivos químicos de naturaleza convencional y no tradicional. El limo y la arena utilizados corresponden a materiales naturales locales proporcionados por la empresa Pavimentar S.A.

La composición mineralógica del suelo se estableció mediante difracción de rayos X (DRX), identificándose la presencia predominante de minerales arcillosos expansivos, principalmente esmectitas, responsables del elevado potencial de hinchamiento del material. Complementariamente, se empleó microscopía electrónica de barrido acoplada a espectrometría de dispersión de energía (SEM-EDS) para analizar la morfología de las partículas y la composición elemental del suelo. Con base en los resultados de la gradación de los suelos y propiedades índice, las arcillas limo arena y combinaciones fueron clasificados de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Aditivos

Como aditivo químico se utilizó el producto comercial Terrasil, compuesto orgánico a base de organosilanos fabricado por Zydex y distribuido en Colombia por la empresa Optimasoil. Se empleó una nanosílice de la empresa Corona como nanoaditivo, caracterizada por su elevada superficie específica y alta reactividad. Las propiedades y la composición química de los aditivos se presentan en la Tabla 2, según la información proporcionada por los fabricantes.

Tabla 2

Propiedades de los aditivos químicos Terrasil y nanosílice

Propiedad	Terrasil	Nanosílice
Apariencia	Líquido marrón dorado	Blanco
Contenido de sólidos (%)	72 ± 2	100
Viscosidad a 25 C (centipoise)	100–500	-
Gravedad específica	1,01	2.3
Densidad (g/ml)	1,01	-
Solubilidad	Soluble en agua	NO
Punto de inflamación (C)	> 80	-
Punto de congelación (C)	5	-
pH	6,5–7,5 (neutral o ligeramente ácido)	-
Tamaño medio de partícula (nm)	-	15-60

Diseño experimental

Los ensayos de laboratorio fueron realizados siguiendo los procedimientos normalizados establecidos por las normas ASTM e INVIAS. Se empleó nanosílice (NS) en dosificaciones de 0,5 % y 1.0 % respecto al peso seco del suelo; Terrasil en dosis de 1 kg/m³, 1.5 kg/m³ y 2 kg/m³. Adicionalmente, las fracciones de arena y limo fueron incorporadas al suelo mediante incrementos graduales del 5 %, 10 % y 20 %, respectivamente, hasta alcanzar el mayor valor de resistencia mecánica. En la Tabla 3 se presentan las distintas mezclas de suelo estabilizado investigadas y las designaciones empleadas en este estudio.

Tabla 3

Mezclas de suelo estabilizado y designaciones empleadas

Mezclas de suelo estabilizado	Designación
Caolinita	K
Bentonita Cálcica	BC
Arena	A
Limo	L

CAPÍTULO 15
Jorge Castro; Gloria Restrepo

Caolinita +5% Arena	k+5A
Caolinita +10% Arena	k+10A
Caolinita +15% Arena	k+15A
Caolinita +20% Arena	k+20A
Caolinita +25% Arena	k+25A
Caolinita +30% Arena	k+30A
Caolinita +35% Arena	k+35A
Caolinita +40% Arena	k+40A
Caolinita +45% Arena	k+45A
Caolinita +50% Arena	k+50A
Caolinita +55% Arena	k+55A
Caolinita +60% Arena	k+60A
Caolinita +65% Arena	k+65A
Caolinita +70% Arena	k+70A
Caolinita +75% Arena	k+75A
Caolinita +80% Arena	k+80A
Bentonita cálcica +5% Arena	BC+5A
Bentonita cálcica +10% Arena	BC+10A
Bentonita cálcica +15% Arena	BC+15A
Bentonita cálcica +20% Arena	BC+20A
Bentonita cálcica +25% Arena	BC+25A
Bentonita cálcica +30% Arena	BC+30A
Bentonita cálcica +35% Arena	BC+35A
Bentonita cálcica +40% Arena	BC+40A
Bentonita cálcica +45% Arena	BC+45A
Bentonita cálcica +50% Arena	BC+50A
Bentonita cálcica +55% Arena	BC+55A
Bentonita cálcica +60% Arena	BC+60A
Bentonita cálcica +65% Arena	BC+65A
Bentonita cálcica +70% Arena	BC+70A
Bentonita cálcica +75% Arena	BC+75A
Bentonita cálcica +80% Arena	BC+80A
Caolinita + 20% Limo	K+20L
Caolinita + 40% Limo	K+40L

Caolinita + 60% Limo	K+60L
Caolinita + 80% Limo	K+80L
Bentónica Cálcica + 10% Limo	BC+10L
Bentónica Cálcica + 20% Limo	BC+20L
Bentónica Cálcica + 30% Limo	BC+30L
Bentónica Cálcica + 40% Limo	BC+40L
Bentónica Cálcica + 50% Limo	BC+50L
Bentónica Cálcica + 60% Limo	BC+60L
Bentónica Cálcica + 70% Limo	BC+70L
Bentónica Cálcica + 80% Limo	BC+80L
Caolinita con adición de 0.1% de Nanosílice	K + 0.1NS
Caolinita con adición de 0.5 % de Nanosílice	K+0.5NS
Caolinita con adición de 1% de Nanosílice	K+1NS
Caolinita + Terrasil 1kg/m ³	K+1T
Caolinita + Terrasil 1,5 kg/m ³	K+1,5T
Caolinita + Terrasil 2 kg/m ³	K+2T
Bentonita cálcica + 0,5% Nanosílice	BC+0.5NS
Bentonita cálcica + 1,0% Nanosílice	BC+1.0NS
Bentonita cálcica + Terrasil 1kg/m ³	BC+1T
Bentonita cálcica + Terrasil 1,5 kg/m ³	BC+1.5T
Bentonita cálcica + Terrasil 2 kg/m ³	BC+2TS

Para la selección del rango óptimo de nanosílice NS se realizó una revisión bibliográfica en la que se encontraron tres estudios que evaluaron las propiedades de suelos clasificados como arcillas de baja plasticidad. En el primer estudio se evaluó el rango efectivo de la adición de NS a partir del ensayo de compresión triaxial en condiciones no consolidada no drenada (UU) bajo una presión de confinamiento de 30 kPa y dosificaciones del 1 %, 2 %, 3 % y 4 %. Se encontró que con la adición de hasta un 2 % la resistencia de la muestra incrementa, al igual que la cohesión y el ángulo de fricción, lo cual se atribuye a las reacciones químicas que se presentan en el suelo tratado entre el agua, NS y óxido de calcio (Kalhor et al., 2022). En otro estudio se encontró que el porcentaje óptimo de NS fue del 3 %, (Sharma & Singh, 2023). No obstante, estos resultados, por el costo de los nanomateriales y la viabilidad de su uso en la nanotecnología, se estableció el valor obtenido en el estudio de los autores Gizem Aksu y Tugba Eskisar, quienes encontraron que el porcentaje óptimo de NS era del 0.5 % (Aksu & Eskisar, 2023).

En el caso del producto Terrasil, se emplearon las dosificaciones recomendadas por los fabricantes y se aumentó su dosis para evaluar el efecto a mayores concentraciones.

Se encontraron varios métodos de mezclado utilizados en investigaciones previas, tales como el método manual, agitación mecánica, agitación magnética, mezcla por fluidización, entre otros (Kitazume & Terashi, 2013). Sin embargo, a pesar de la disponibilidad de estas alternativas, en este estudio se optó específicamente por el método de mezclado "Layer cake". Esta elección se basó en su capacidad para simular de manera efectiva el proceso constructivo y producir una mezcla más homogénea del suelo, lo que lo hace particularmente adecuado para los objetivos y el alcance de nuestra investigación. Este método se basa en la idea de construir la mezcla de suelo en capas, similar al proceso de construcción de una lasaña. Al alternar capas de suelo con capas de aditivos o materiales complementarios, este enfoque permite una distribución más uniforme de los componentes en toda la muestra.

Antes de realizar los ensayos de resistencia a la compresión no confinada y CBR en las mezclas de suelo tratadas con los aditivos, se llevaron a cabo ensayos de compactación Proctor modificado (PM) con el fin de investigar el efecto de los aditivos sobre la densidad de compactación y el contenido óptimo de humedad de los suelos arcillosos. Tras un día de curado, los resultados del PM para las muestras tratadas indicaron que no existían diferencias significativas en la densidad seca máxima ni en el contenido óptimo de humedad (OMC) en comparación con los suelos arcillosos sin tratar. Por lo tanto, las probetas de suelo tratadas destinadas a los ensayos de compresión no confinada y CBR se prepararon a la densidad seca máxima del suelo original, con el fin de permitir la comparación con el suelo arcilloso sin tratar y mantener la uniformidad. Adicionalmente, las probetas preparadas para los ensayos de compresión no confinada y CBR fueron curadas hasta el período de 7 días.

El desempeño ingenieril de los suelos o arcillas sin aditivos fue evaluado mediante un programa de ensayos que incluyó la determinación de los límites de consistencia, ensayos de compactación Proctor modificado (PM) y resistencia a la compresión no confinada (UC). La compactación de las probetas se realizó mediante el valor obtenido en el Proctor modificado en materiales procurados 1 día después del premezclado y posteriormente se conservaron durante 7 días a 24 °C de acuerdo con la norma ASTM D698-12 e INV E-141-13. Los ensayos de resistencia a la compresión no confinada se efectuaron conforme a la norma ASTM D2166 e INV E-152-13. El ensayo de Relación de Soporte California (CBR) se realizó de acuerdo con la norma INV E – 148 – 13 aplicada a suelos alterados en condición saturada. Las muestras fueron compactadas siguiendo el procedimiento establecido por la norma y posteriormente sometidas a inmersión en agua para garantizar la condición de saturación, permitiendo así evaluar la capacidad de soporte del suelo.

Caracterización fisicoquímica y microestructural

La caracterización fisicoquímica y microestructural mediante difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) y microscopía electrónica de barrido acoplada con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS), permitió analizar en detalle la composición mineralógica, la morfología, la textura, el tamaño y el arreglo de las partículas con alta resolución. En las arcillas y el limo, la técnica SEM resulta fundamental para identificar las morfologías típicas de cada material —estructuras laminares en la caolinita y agregados con láminas apiladas en la bentonita cálcica—, así como para evaluar la distribución de vacíos, el grado de agregación o compactación y los cambios microestructurales inducidos por la incorporación de aditivos, tales como procesos de densificación, relleno de poros, floculación o dispersión.

De manera complementaria, la espectroscopía de dispersión de energía (EDS) permitió determinar la composición química elemental de las muestras, en complemento con la espectroscopía de Fluorescencia de rayos X, facilitando la confirmación de las fases minerales identificadas y la correlación entre los cambios químicos y la microestructura observada.

Estas técnicas se emplearon para caracterizar las arcillas, el limo y evaluar el efecto de la nanosílice en la bentonita cálcica, así como para identificar las fases minerales presentes y analizar posibles modificaciones mineralógicas inducidas por los procesos de estabilización. En particular, la DRX se utilizó para la identificación mineralógica y la evaluación de cambios estructurales asociados a la adición de los estabilizantes.

RESULTADOS

Inicialmente, se presenta la caracterización de las arcillas y la influencia del contenido de arena y limo en el desarrollo de la resistencia de los suelos arcillosos. Posteriormente se analiza el impacto de los aditivos Terrasil y Nanosílice, sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión de los suelos arcillosos y los límites de consistencia. Las mezclas de suelo tratadas fueron curadas durante periodos de 7 días, con el fin de facilitar las interacciones químicas antes de la realización de los ensayos experimentales. Finalmente, se discuten las variaciones microestructurales y las condiciones óptimas para mejorar las subrasantes.

Compactación de las probetas

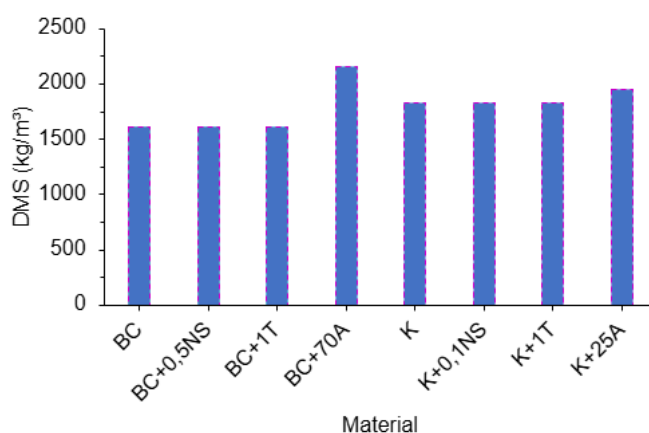
En la bentonita cálcica (BC), los resultados del Proctor modificado muestran que la adición de nanosílice (0,5 %) y Terrasil (1T) no genera cambios apreciables ni en la densidad seca máxima (DMS) ni en la humedad óptima, manteniéndose constantes en 1615,2 kg/m³ y 24,7 %, respectivamente. Este comportamiento indica que estos aditivos, a las dosificaciones evaluadas, no modifican de manera significativa la estructura granulométrica ni la demanda de agua del suelo. En contraste, la adición de 70 % de arena produce un efecto marcado, incrementando la DMS hasta 2152,1 kg/m³ (aumento aproximado del 33 %) y reduciendo la humedad óptima a 9,9 % (disminución cercana al 60 %), lo que

refleja una transición hacia un comportamiento dominado por partículas gruesas, con menor superficie específica y menor necesidad de agua para alcanzar la compactación máxima.

En la caolinita (K) se observa una tendencia similar. La incorporación de 0,1 % de nanosílice y 1T de Terrasil no altera los valores del material de control, manteniéndose la DMS en 1827,3 kg/m³ y la humedad óptima en 11,5 %, lo que sugiere una influencia limitada de estos aditivos sobre las condiciones de compactación. Sin embargo, la adición de 25 % de arena incrementa la DMS hasta 1945,1 kg/m³ (≈ 6 % de aumento) y reduce la humedad óptima a 8,8 % (≈ 23 % de reducción), evidenciando que la arena mejora el empaquetamiento de partículas y disminuye la afinidad del sistema por el agua, Figura 1.

Figura 1

Ensayo Proctor modificado



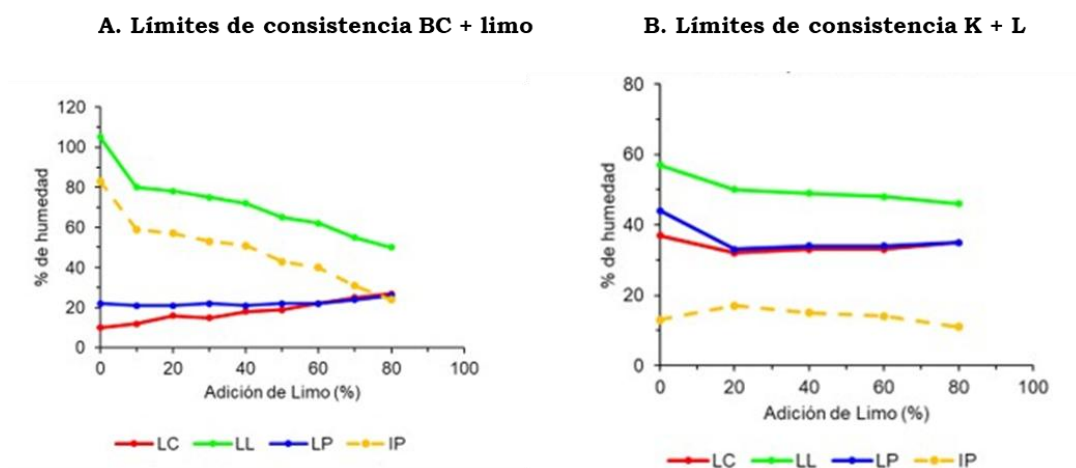
Estos resultados confirman que los cambios más significativos en las propiedades de compactación se logran mediante la modificación física de la matriz del suelo, particularmente con la adición de arena, mientras que los aditivos no tradicionales evaluados tienen un efecto limitado sobre los parámetros del Proctor modificado a corto plazo.

Límites de consistencia

Se evaluó la variación de los límites de consistencia de las arcillas activadas con el limo. En la Figura se observa cómo la adición progresiva de limo produce una modificación sistemática del comportamiento plástico tanto en la bentonita cálcica (BC) como en la caolinita (K), con una tendencia general hacia la reducción de la plasticidad del sistema.

Figura 2

Límites de consistencia para las mezclas arcilla-limo

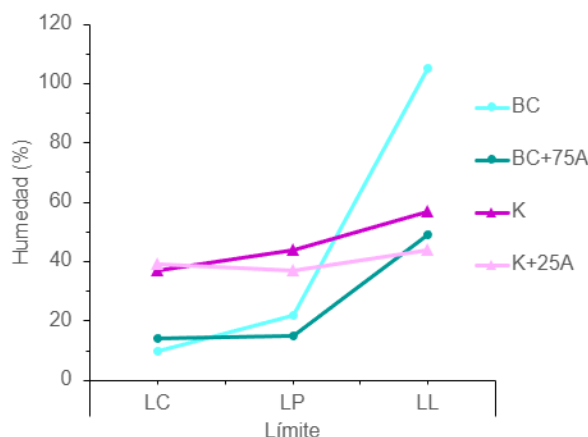


En la bentonita cálcica, el límite líquido (LL) disminuye de valores elevados propios del material control hasta 50 % con una adición del 80 % de limo, lo que representa una reducción aproximada del 38 %, mientras que el índice de plasticidad (IP) se reduce de 59 % a 24 %, equivalente a una disminución cercana al 59 %, evidenciando una pérdida significativa del carácter altamente plástico de la bentonita. Paralelamente, el límite plástico (LP) se mantiene relativamente constante, variando ligeramente entre 21 % y 26 %, mientras que el límite de contracción (LC) aumenta de 12 % a 27 % (incremento aproximado del 125 %), indicando una menor susceptibilidad a cambios volumétricos por pérdida de humedad. En la caolinita, la adición de limo genera cambios más moderados: el LL disminuye de 50 a 46 % al incrementar el contenido de limo hasta 80 %; el LP aumenta ligeramente de 33 a 35 %, y el IP se reduce de 17 a 11 %. El LC también muestra un aumento gradual de 32 % a 35 %, reflejando una mayor estabilidad volumétrica. Estos resultados indican que el limo actúa como una fracción no plástica que diluye el contenido arcilloso activo; reduce la adsorción de agua y limita la deformabilidad del suelo, siendo este efecto más pronunciado en la bentonita cálcica debido a su mayor plasticidad y mineralogía expansiva, mientras que en la caolinita el impacto es menor por su estructura más estable y menor afinidad por el agua.

El segundo geomaterial que se agregó a las dos arcillas o matrices arcillosas, caolinita y bentonita cálcica fue una arena de gradación media, para la cual se evaluó la variación de los límites de consistencia para los porcentajes de arena donde se obtuvo mayor resistencia a la compresión simple, Figura 3.

Figura 3

Límites de consistencia arcillas + arena



En la bentonita cálcica (BC), la adición de 70 % de arena produce una modificación sustancial de los límites de consistencia, reflejando una marcada reducción de su carácter altamente plástico. El límite líquido disminuye desde 105 a 49 % y el índice de plasticidad se reduce de 83 a 34 %, mientras que el límite plástico desciende de 22 a 15 %; y el límite de contracción aumenta de 10 a 14 %. Estos cambios indican que la incorporación de arena diluye la fracción arcillosa activa, reduce la capacidad de retención de agua y limita la deformabilidad, transformando la bentonita en un material significativamente menos expansivo y más estable desde el punto de vista geotécnico.

En la caolinita (K), la adición de 25 % de arena genera cambios más moderados, pero igualmente favorables. El límite líquido disminuye de 57 a 44 %; el índice de plasticidad se reduce de 13 a 7 %; mientras que el límite plástico baja de 44 a 37 %; el límite de contracción aumenta ligeramente de 37 a 39 %. Estos resultados evidencian que, aunque la caolinita es menos sensible a la adición de arena que la bentonita, la mejora en la gradación y la reducción del contenido cohesivo contribuyen a un comportamiento menos plástico y más adecuado para aplicaciones como subrasante.

En ambos suelos, la adición de arena generó reducciones apreciables en LL, LP e IP, con un efecto más marcado en la bentonita que en la caolinita, coherente con la mayor plasticidad inherente de la bentonita (Mitchell & Soga, 2005; Skempton, 1953). La reducción del IP indica una transición hacia un comportamiento menos plástico y más estable frente a variaciones de humedad, lo cual es beneficioso desde el punto de vista geotécnico, ya que suelos de menor plasticidad tienden a exhibir menor deformación volumétrica y mejor desempeño en subrasantes (Holtz & Kovacs, 1981). El incremento del LC sugiere que la mezcla puede tolerar mejor la contracción al secado, lo cual puede favorecer una respuesta más predecible en condiciones de campo.

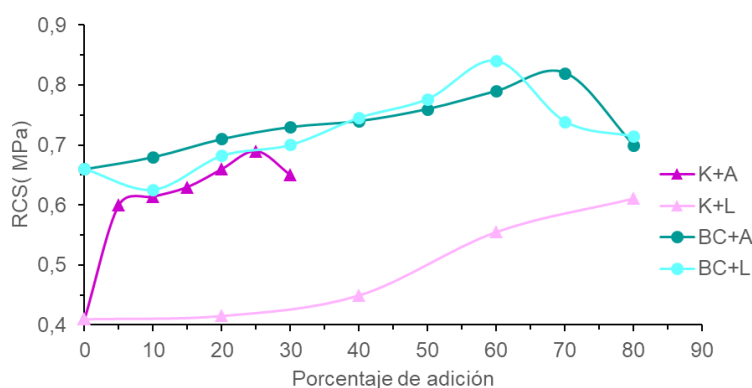
Estos resultados son consistentes con la literatura que indica que la mejora en la gradación y reducción de finos plásticos tiende a disminuir la reactividad higromecánica de los suelos, aumentando su estabilidad estructural e idoneidad como material de subrasante o soporte (Bell, 1996; Das & Ramana, 2010). Estos cambios sugieren que la inclusión de arena puede ser una estrategia efectiva para mitigar problemas asociados con altos contenidos de finos plásticos, especialmente en suelos bentónicos altamente expansivos.

Resistencia a la compresión no confinada

La Figura 4 muestra los resultados de resistencia a la compresión no confinada (RCS) de las arcillas aditivadas con limo y arena.

Figura 4

RCS de arcillas aditivadas con limo y arena



Se observa cómo la adición de arena (A) y limo (L) modifica la resistencia mecánica de las arcillas de forma significativa. Para la caolinita con arena (K+A), la resistencia a compresión no confinada (RCS) aumenta de 0,41 MPa en el estado sin adición hasta aproximadamente 0,69 MPa con alrededor de 25 % de arena, lo que corresponde a un incremento absoluto de 0,28 MPa. Este aumento representa una mejora aproximada del 68 % respecto al valor inicial, evidenciando que la incorporación de arena es altamente efectiva para incrementar la resistencia mecánica de la caolinita debido a la mejora en la gradación y al aumento del contacto friccional entre partículas. En comparación, la bentonita cálcica con arena (BC+A) presenta un incremento de la resistencia a compresión no confinada desde aproximadamente 0,66 MPa en el estado sin adición hasta cerca de 0,82 MPa con alrededor de 70 % de arena, lo que corresponde a una mejora absoluta de 0,16 MPa. Este incremento representa un aumento aproximado del 24 % respecto al valor inicial, indicando que, aunque la adición de arena mejora la resistencia de la bentonita cálcica, el efecto es más moderado que en la caolinita, debido a la mayor plasticidad y comportamiento expansivo característico de este tipo de arcilla. Evidenciando que la bentonita requiere mayores proporciones de arena para acercarse a la misma resistencia debido a su mayor plasticidad y estructura más expansiva, lo cual dificulta el refinamiento de su red de partículas sin suficientes fracciones gruesas (arena) que faciliten el empaquetamiento efectivo. Por otra parte, la

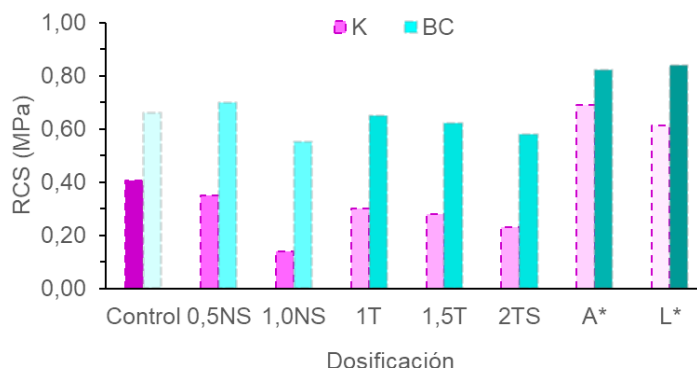
adición de limo (L) mejora la RCS de ambas arcillas, pero de forma menos eficiente: en K+L, la resistencia crece gradualmente desde aproximadamente 0,41 MPa hasta 0,61 MPa con un 80 % de limo, lo que corresponde a un incremento absoluto de 0,20 MPa y a una mejora relativa cercana al 49 % respecto al valor inicial, mientras que BC+L aumenta desde aproximadamente 0,66 MPa hasta 0,71 MPa, lo que corresponde a un incremento absoluto de 0,05 MPa con 60 % de limo y a una mejora relativa cercana al 8 % respecto al valor inicial., indicando que cantidades elevadas de limo son necesarias para observar mejoras significativas. Este comportamiento concuerda con la literatura que señala que el limo actúa principalmente como relleno que mejora la gradación y reduce vacíos, pero no contribuye tanto como la arena a la estructura portante del suelo, y que las arcillas altamente plásticas (como las esmectíticas en bentonita) demandan una mayor fracción de partículas gruesas para optimizar su resistencia mecánica. (Chan et al., 2022; Nagaraj, 2016).

Evaluación de efectos combinados sobre la RCS

Se evaluó el efecto de la adición de 0.5 de Nanosílice (0.5NS), 1.0% de nanosílice (1.0%NS), 1 kg/m³ de Terrasil (1T), 1.5 Kg/m³ de Terrasil (1.5T), 2 Kg/m³ de Terrasil (2T), adición del 25 % de arena a la caolinita A* y 70 % arena a la bentonita cálcica A*, así como un 80 % de limo a la caolinita (L*) y un 60 % de limo a la bentonita cálcica. Los resultados de esta evaluación se muestran en la Figura 5.

Figura 5

Evaluación de efectos combinados sobre la RCS



La adición de nanosílice muestra un efecto negativo sobre la resistencia a compresión no confinada en ambas arcillas, siendo este más pronunciado en la caolinita (K). En comparación con el material de control ($\approx 0,41$ MPa), la incorporación de 0,5 % de nanosílice reduce la RCS hasta aproximadamente 0,35 MPa, lo que representa una disminución de 0,06 MPa ($-14,6$ %), mientras que con 1,0 % de nanosílice la resistencia desciende a cerca de 0,14 MPa, correspondiente a una reducción de 0,27 MPa ($-65,8$ %). En la bentonita cálcica (BC), aunque el efecto es menos severo, también se observa un leve aumento de resistencia, pasando de un valor inicial cercano a 0,66 MPa a 0,70 MPa con 0,5 % de nanosílice (aumento de aproximadamente 0,04 MPa, 6%) y una caída a

0,55 MPa con 1,0 % de nanosílice (reducción de 0,11 MPa, -16 %), lo que indica que, a las dosificaciones evaluadas, la nanosílice contribuye al desarrollo de una microestructura más resistente solo al 0.5% de NS en la BC, en la K el efecto es negativo si se emplea sin aditivos que permitan una mejor interacción entre el nanoaditivo y la matriz arcillosa.

La adición de nanosílice reduce la RCS en ambas arcillas, con mayores descensos en la caolinita. Esto indica que la nanosílice, a esas dosificaciones, no está favoreciendo una red de contactos resistiva entre partículas, y puede estar introduciendo exceso de finos sin una interacción química significativa capaz de generar aglomeración estructural.

La nanosílice puede mejorar propiedades cuando actúa como aglutinante o reactivo cementante con álcalis, pero en suelos altamente plásticos sin fuente alcalina activa, su efecto puede ser mínimo o negativo ya que no se forman suficientes geles silico-alumínicos estables. Esto ha sido observado en estabilización con sílice en arcillas sin activador alcalino (Šavija & Luković, 2016).

La incorporación de Terrasil también evidencia una reducción progresiva de la resistencia a compresión no confinada en ambas arcillas a medida que aumenta la dosificación. En la caolinita (K), la RCS disminuye desde el valor de referencia del material control hasta aproximadamente 0,30 MPa con 1T, lo que corresponde a una reducción cercana al (-26.8 %), y continúa descendiendo a 0,28 MPa con 1,5T (-32 %) y a 0,23 MPa con 2T, alcanzando una disminución aproximada del (-44 %). En la bentonita cálcica (BC), el efecto es menos pronunciado, pero igualmente negativo, ya que la resistencia se reduce a cerca de 0,65 MPa con 1T (-1.5 %), a 0,62 MPa con 1,5T (-6 %) y a 0,58 MPa con 2T (-12.2 %), lo que indica que, en el rango de dosificaciones evaluado, el Terrasil no contribuye a la mejora mecánica de las arcillas y su efecto resulta más desfavorable en la caolinita que en la bentonita cálcica.

El Terrasil también tiende a disminuir la resistencia comparado con el control, con un efecto más pronunciado en caolinita. Las pequeñas partículas de Terrasil pueden ocupar espacios, pero sin una reacción química de endurecimiento significativa, es importante considerar que estos productos por sus mecanismos de acción en el suelo pueden requerir mayor tiempo de curado, a 7 días, no de evidencia una mejora, al igual que la NS es recomendado combinar este producto con otros aditivos que generen una mayor interacción del producto con la matriz arcillosa a edades tempranas. Modificadores inertes de fractura pueden reducir la resistencia mecánica si no contribuyen significativamente a la fricción interna o cohesión del suelo (Mitchell & Soga, 2005).

La adición de arena (A) produce un incremento significativo en la resistencia a compresión no confinada de ambas arcillas, siendo más pronunciado en la caolinita (K). En este material, la RCS aumenta desde un valor inicial cercano a 0,41 MPa hasta 0,69 MPa, lo que representa un incremento absoluto de 0,29 MPa y una mejora relativa del 71 %. En la bentonita cálcica (BC), la resistencia se incrementa desde alrededor de 0,61 MPa hasta 0,82 MPa, correspondiente a

una mejora absoluta de 0,41 MPa y un aumento relativo del 100.00 %. Estos resultados evidencian que la arena actúa como un material estructural eficiente, mejorando la gradación del suelo y aumentando el contacto friccional entre partículas, con un efecto más notable en la caolinita debido a su menor plasticidad y comportamiento menos expansivo en comparación con la bentonita cálcica.

La adición de arena mejora claramente la RCS en ambas arcillas, con un efecto más marcado en la caolinita. La arena genera una mejor gradación y estructura portante, con mayor contacto friccional entre partículas gruesas, lo que eleva la resistencia.

La mejora por arena se explica porque los agregados gruesos reducen vacíos e incrementan la fricción interna, lo que aumenta la resistencia al corte y a compresión en suelos arcillosos (Holtz & Kovacs, 1981).

La adición de limo (L) genera el mayor incremento en la resistencia a compresión no confinada en ambas arcillas, evidenciando su efectividad como material de mejora física. En la caolinita (K), la RCS alcanza un valor cercano a 0,61 MPa, lo que representa un incremento aproximado del 48.78 % respecto al material de control, duplicando prácticamente su resistencia inicial. De manera similar, en la bentonita cálcica (BC) la resistencia aumenta hasta alrededor de 0,84 MPa, correspondiente a una mejora cercana al 104.84 % en comparación con el valor inicial. Estos resultados indican que el limo actúa como una fracción intermedia eficiente que optimiza la gradación del suelo, reduce los vacíos y favorece un empaquetamiento más denso, contribuyendo de forma significativa al aumento de la resistencia mecánica en ambos sistemas arcillosos.

Las mezclas con 80 % de limo en K y 60 % de limo en BC dan las mayores resistencias observadas. El limo actúa como un relleno mejorador de gradación entre la fracción fina original y las partículas gruesas, reduciendo vacíos de forma más exitosa que nanosílice o Terrasil.

Mejoras en la resistencia usando proporciones altas de limo, se han reportado cuando el limo actúa como partícula intermedia que optimiza la gradación y reduce vacíos (Skempton, 1953).

La arena y el limo muestran una mayor efectividad en la mejora de la resistencia a compresión no confinada (RCS) en comparación con la nanosílice y el Terrasil debido a que actúan principalmente a través de mecanismos físicos. La incorporación de estas fracciones incrementa la proporción de partículas gruesas o intermedias, lo que favorece un mayor contacto friccional entre partículas, mejora la gradación global del suelo y reduce los vacíos estructurales, dando lugar a una red granular más densa y mecánicamente estable sin necesidad de activación química. En contraste, la nanosílice y el Terrasil no generan mejoras significativas porque, en ausencia de un medio activador adecuado, no forman enlaces resistentes ni productos cementantes duraderos; específicamente, sin la presencia de álcalis o hidróxidos liberados durante el tratamiento, la sílice no desarrolla reacciones puzolánicas efectivas capaces de producir geles cementantes estables. Además, estos aditivos pueden

incrementar la cantidad de finos no estructurales, lo que debilita los contactos entre partículas y reduce la resistencia global del sistema. Este comportamiento es coherente con lo reportado en la literatura, donde se señala que la nanosílice solo resulta beneficiosa bajo condiciones de activación alcalina que promuevan reacciones puzolánicas (Bernal et al., 2017), y que la estabilización física de suelos depende en gran medida de una gradación adecuada y de una mayor fracción gruesa para el desarrollo de resistencia mecánica (Das & Ramana, 2010.)

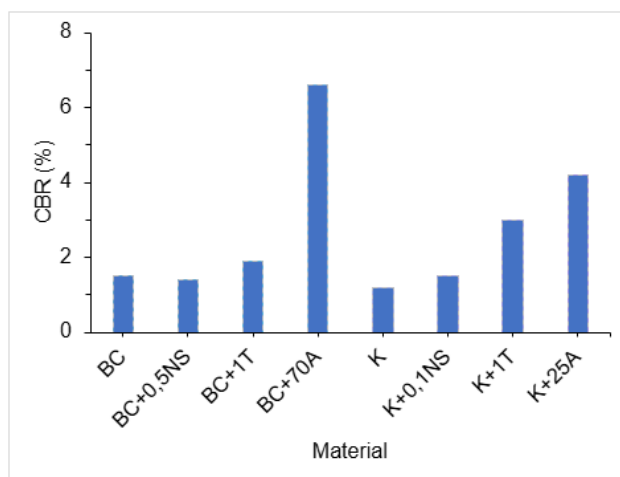
Capacidad de soporte CBR

Los ensayos de índice CBR reflejan la capacidad de soporte de los suelos cuando se adicionan distintos modificadores. En el caso de la bentonita cálcica (BC), el suelo de control registró un valor de CBR = 1,5 %, lo que indica una capacidad portante muy baja, típica de suelos finos altamente plásticos con pobre gradación y alta retención de agua (Holtz & Kovacs, 1981). La incorporación de nanosílice (0,5 % NS) no mejoró significativamente la resistencia (1,4 %), y la adición de Terrasil (1T) produjo una mejora marginal a 1,9 %, lo cual evidencia que estos aditivos no tradicionales, en las dosis evaluadas, no generan una estructura portante efectiva por sí solos. Sin embargo, al adicionar 70 % de arena (BC+70A), la resistencia aumentó drásticamente hasta 6,6 %, lo que representa una mejora absoluta de +5,1 puntos porcentuales y un incremento relativo de ≈ 340 % respecto al suelo control. Esta mejora se explica principalmente por la mejora de la gradación y del contacto friccional entre partículas, reduciendo vacíos y permitiendo que el material soporte mayores cargas (Das, 2010; Skempton, 1953). Para la bentonita, debido a su alta plasticidad y capacidad expansiva, se requieren porcentajes altos de arena para contrarrestar la dominancia de finos y construir una matriz más competente (Mitchell & Soga, 2005).

En el caso de la caolinita (K), el suelo de control registró un CBR de 1,2 %. La adición de 0,1 % de nanosílice generó una mejora moderada a 1,5 %, y Terrasil (1T) aumentó la resistencia a 3,0 %, mostrando que algunos aditivos pueden ser más efectivos en suelos con menor plasticidad inicial. Con la adición de 25 % de arena (K+25A), la resistencia aumentó hasta 4,2 %, lo que representa una mejora de este parámetro. Estos resultados confirman que, aunque la caolinita responde positivamente a la adición de arena, requiere menores porcentajes que la bentonita para lograr mejoras similares, lo cual se debe a su menor plasticidad y tendencia expansiva, lo que facilita el establecimiento de contactos sólidos y friccionales entre partículas agregadas.

Figura 6

Resultados de CBR



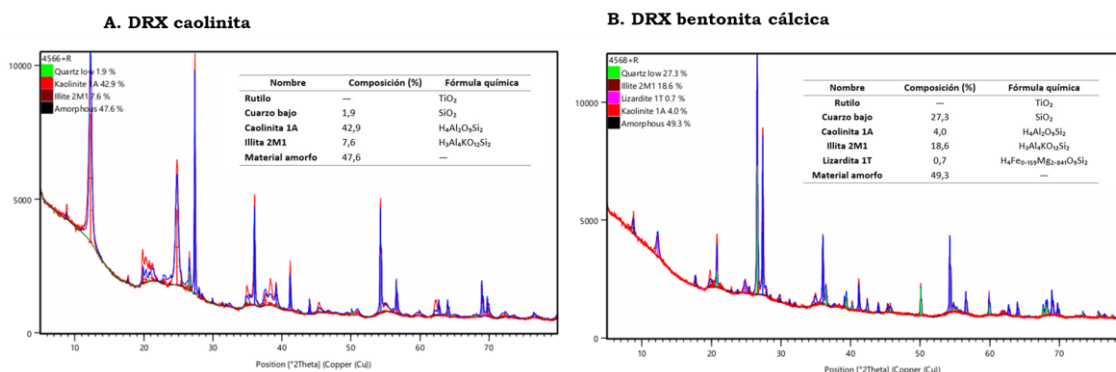
Difracción de rayos X (DRX)

Los ensayos se realizaron en Difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empeyan 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu ($\lambda=1.541874 \text{ \AA}$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Reflexión Transmisión Spinner con giros de 4s. El paso fue de $0,02^\circ$ y un tiempo por paso de 52 s. La cuantificación se realizó usando el software High Score Plus mediante el método Rietveld y la base de datos: ICSD FIZ Karlsruhe 2012-1.

A partir del análisis de los difractogramas de rayos X (DRX) y de las composiciones químicas obtenidas para cada material, se confirma la presencia de caolinita, bentonita cálcica y limo como fases dominantes en los suelos estudiados. Los patrones de DRX asociados a la caolinita muestran picos característicos bien definidos, típicamente alrededor de $2\theta \approx 12^\circ$ y 25° , los cuales se correlacionan con su estructura cristalina ordenada y con las altas proporciones de SiO_2 y Al_2O_3 reportadas en su composición, lo que es consistente con filosilicatos del tipo 1:1. Para el caso de la bentonita cálcica, los difractogramas evidencian reflexiones basales de baja intensidad y mayor anchura, asociadas a minerales del grupo de las esmectitas, junto con la presencia significativa de CaO , lo que confirma su naturaleza cálcica y su estructura expansiva, en concordancia con las composiciones químicas ricas en sílice y alúmina pero con mayor contenido de óxidos alcalinotérreos.

Figura 7

Difractogramas para la caolinita y la bentonita cálcica

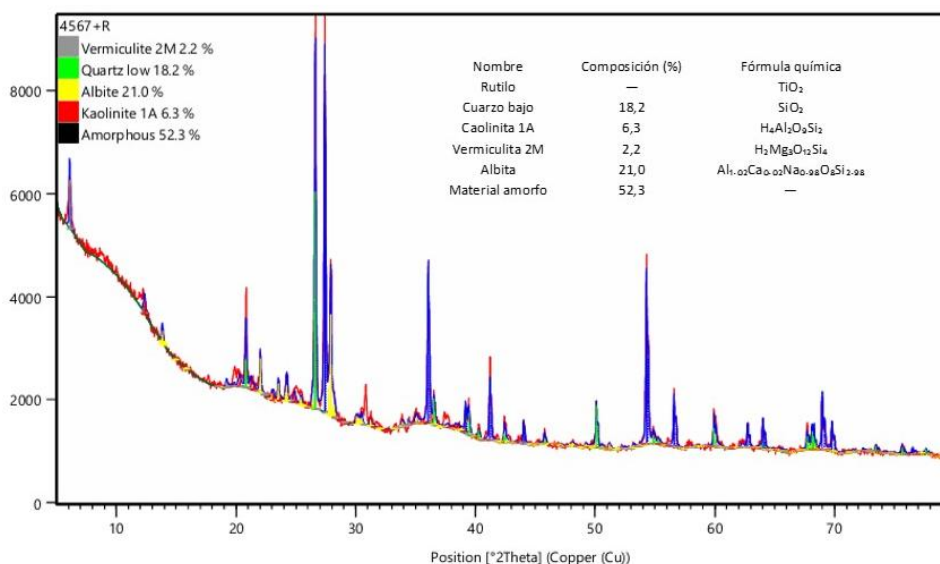


Por su parte, el limo presenta difractogramas más complejos y menos definidos, reflejando una mezcla mineralógica dominada por cuarzo y fases accesorias, lo cual se ve respaldado por el elevado contenido de SiO₂ en las tablas composicionales, característico de materiales detríticos con menor grado de orden cristalino.

Los resultados de la caracterización mineralógica, y la correlación entre los picos de DRX y las composiciones químicas confirma de manera consistente la identificación de los tres materiales y sustenta las diferencias estructurales y fisicoquímicas observadas entre ellos.

Figura 8

Difractograma para el limo



Espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF)

El análisis químico del material se llevó a cabo mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X (XRF), utilizando un equipo Thermo ARL Optim'X WDXRF. El estudio se realizó bajo un enfoque semicuantitativo, empleando el software Optiquant para la interpretación de los resultados. Las condiciones de análisis consideraron una humedad del 22 % en la muestra y una temperatura de 23,2 C, garantizando la reproducibilidad y confiabilidad de los datos obtenidos, Tabla 4.

Tabla 4

Composición química por XRF

Bentonita Cálcica				Caolinita				Limo			
Óxido	%	Óxido	%	Óxido	%	Óxido	%	Óxido	%	Óxido	%
	p/p		p/p		p/p		p/p		p/p		p/p
Al₂O₃	41.70	V ₂ O ₅	0.066	SiO ₂	49.94	PbO	0.021	SiO ₂	45.87	BaO	0.024
SiO₂	41.49	MnO	0.005	Al ₂ O ₃	27.53	Cr ₂ O ₃	0.017	Al ₂ O ₃	27.86	CuO	0.024
Fe₂O₃	1.76	ZnO	0.005	Fe ₂ O ₃	7.92	SrO	0.013	Fe ₂ O ₃	9.21	Cr ₂ O ₃	0.013
K₂O	0.610	La ₂ O ₃	0.004	K ₂ O	2.39	ZnO	0.01	CaO	3.44	ZnO	0.013
TiO₂	0.432	NiO	0.004	CaO	1.40	CuO	0.013	MgO	3.02	WO ₃	0.010
ZrO₂	0.046	Cr ₂ O ₃	0.003	Na ₂ O	1.05	NiO	0.012	Na ₂ O	1.53	ZrO ₂	0.009
CaO	0.038	SO ₃	0.003	TiO ₂	1.00	WO ₃	0.008	TiO ₂	0.791	SrO	0.007
P₂O₅	0.028	WO ₃	0.031	MgO	0.917	Ag ₂ O	0.007	P ₂ O ₅	0.180	NiO	0.007
I	0.0077	SrO	0.001	MnO	0.092	La ₂ O ₃	0.007	MnO	0.164	Sc ₂ O ₃	0.028
LOI	13.85	—	—	P ₂ O ₅	0.060	Sc ₂ O ₃	0.001	K ₂ O	0.121	La ₂ O ₃	0.002
—	—	—	—	BaO	0.058	Nb ₂ O	0.001	V ₂ O ₅	0.054	LOI	7.64
—	—	—	—	ZrO ₂	0.049	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	V ₂ O ₅	0.044	LOI	7.44	—	—	—	—

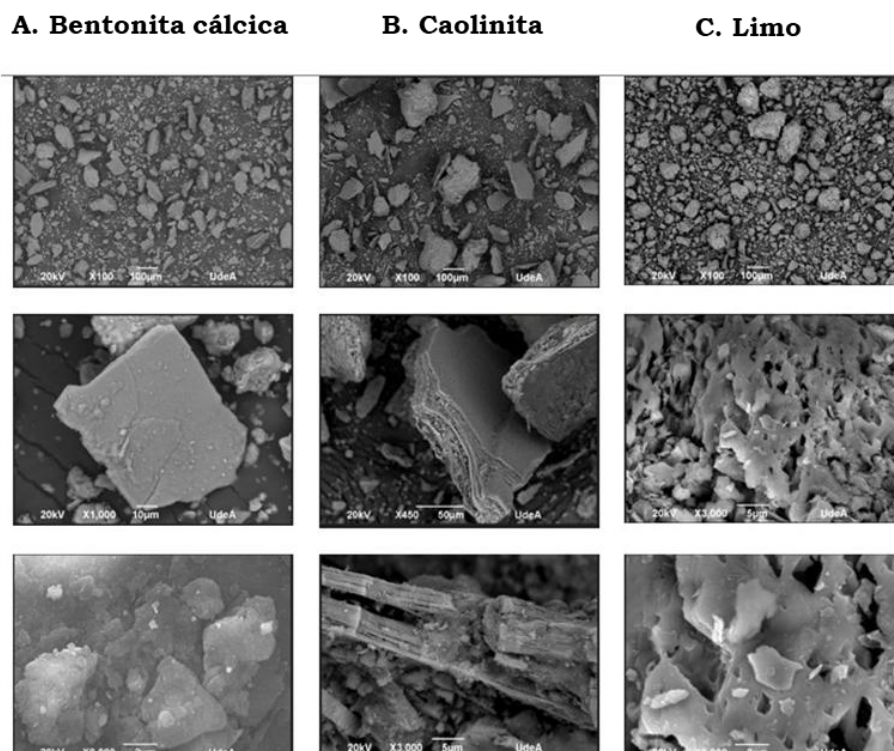
La composición que muestra el XRF, revela perfiles elementales distintivos para cada material.

Microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (SEM-EDS)

En la Figura 9 se muestran micrografías SEM de los materiales estudiados. A partir de las micrografías SEM se puede identificar claramente el grado de densidad y la estructura interna de cada material en función de sus morfologías, vacíos y arreglos de partículas.

Figura 9

Micrografías SEM de los materiales estudiados

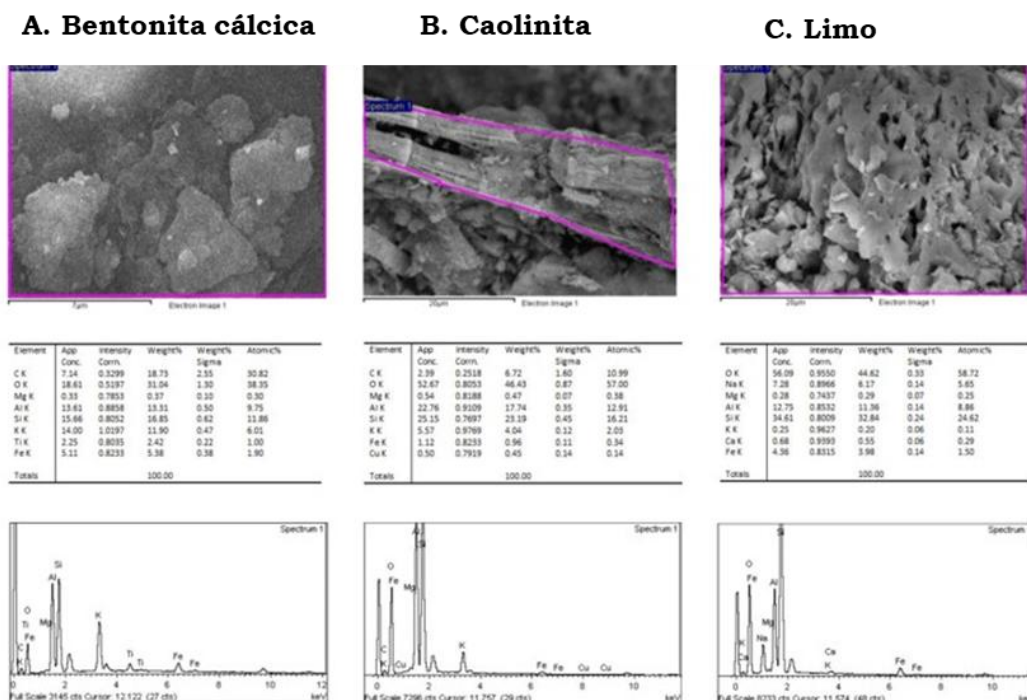


En el limo, observado a aumentos de aproximadamente $\times 100$ ($100\ \mu\text{m}$), $\times 3\ 500$ – $\times 5\ 000$ ($5\ \mu\text{m}$) y hasta $\times 8\ 000$ ($2\ \mu\text{m}$), se evidencia una estructura heterogénea con granos irregulares y abundantes vacíos intergranulares, lo que indica un empaquetamiento poco eficiente y, por tanto, una menor densidad relativa. La bentonita cálcica, analizada a $\times 100$ ($100\ \mu\text{m}$), $\times 1\ 000$ ($10\ \mu\text{m}$) y $\times 8\ 000$ ($2\ \mu\text{m}$), muestra partículas laminares y agregados dispersos con espacios internos significativos, asociados a su alta capacidad de hinchamiento, lo que se traduce en una densidad intermedia, menor que la de la caolinita pero mayor que la del limo. En contraste, la caolinita, observada a $\times 100$ ($100\ \mu\text{m}$), $\times 450$ – $\times 3\ 000$ (50 – $5\ \mu\text{m}$) y $\times 8\ 000$ ($2\ \mu\text{m}$), presenta partículas más compactas, láminas bien definidas y un menor volumen de vacíos, evidenciando un mayor grado de compactación y densidad, lo que confirma que las caolinitas son más densas que las bentonitas y considerablemente más densas que el limo, coherente con sus formas cristalinas y su menor capacidad de expansión.

La Figura 10 muestra micrografías SEM combinadas con el análisis químico elemental de los materiales obtenido por EDS.

Figura 10

Micrografías SEM/EDS de los materiales estudiados



En el caso de la bentonita cálcica, las partículas irregulares y agregadas en forma de láminas delgadas o fibras son típicas de este material, con tendencia a formar redes floculadas. La tabla EDS revela altos niveles de Si, O, Al, junto con Ca significativo (alrededor de 5-10%), consistente con su composición esméctica cálcica. Esto indica presencia confirmada del material.

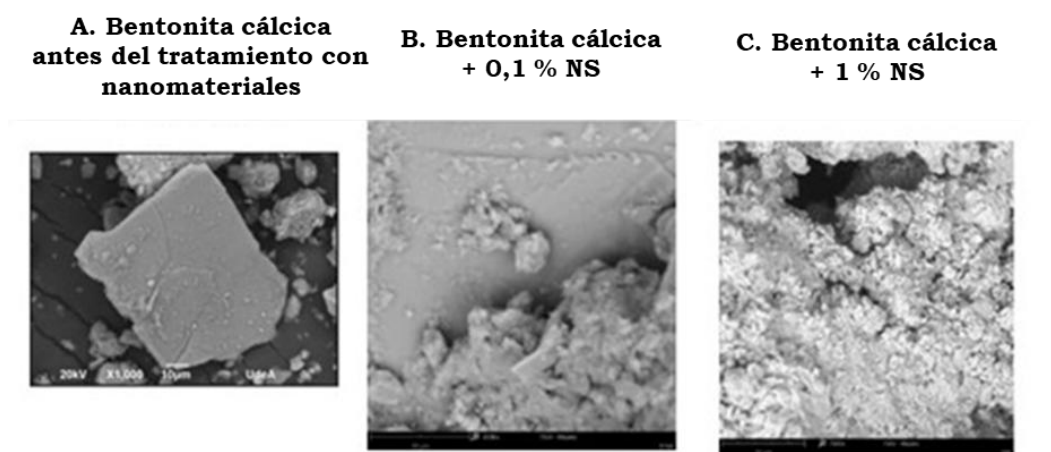
De otra parte, se pueden observar partículas pseudo hexagonales planas y cristalinas de tamaño nanométrico (laminares, 2-5 nm de espesor), morfología característica de la caolinita. La composición EDS destaca SiO₂ (~50-60%) y Al₂O₃ (~30-40%), con bajos cationes intercambiables, diferenciándola de esméctitas. La presencia de caolinita está claramente identificada

Por su parte, las partículas amorfas, granulares e irregulares, sin estructura cristalina laminar, son típicas de la fracción limo derivada de alteración física (tamaños <50 µm). EDS muestra Si elevado con menor Al y posibles impurezas como Fe o Ca, reflejando baja actividad superficial. Confirma presencia de limo como componente no arcilloso fino. Los espectros EDS corroboran las asignaciones morfológicas, con picos dominantes de Si y O en todos, modulados por Al y Ca

Se realizaron estudios SEM a muestras aditivadas con el fin de evidenciar cambios texturales y morfológicos en los materiales estudiados. La Figura 11 muestra micrografías SEM de muestras de bentonita cálcica antes y después de ser aditivadas con nanosílice al 0.1 y 1 %.

Figura 11

Micrografías SEM de bentonita cálcica antes y después de aditivar con NS



El análisis comparativo de las micrografías SEM evidencia cambios significativos en la morfología y en la distribución de vacíos de la bentonita cálcica tras la adición de nanosílice. En la muestra sin adición, se observa una estructura laminar característica; con partículas relativamente bien definidas y la presencia de vacíos interparticulares amplios, lo que refleja un arreglo poco compacto típico de este tipo de arcillas. En contraste, las muestras con nanosílice muestran una evolución progresiva hacia una microestructura más densa y homogénea: con 0,1 % de nanosílice se aprecia el recubrimiento parcial de las láminas de bentonita y la reducción de los vacíos, atribuible al efecto de relleno de las nanopartículas; mientras que con 1 % de nanosílice se evidencia una aglomeración más marcada y una matriz continua, con vacíos significativamente menores y un empaquetamiento más compacto. Estos cambios sugieren que la nanosílice actúa como agente cementante y de relleno a escala nanométrica, favoreciendo la densificación de la bentonita cálcica y la mejora potencial de sus propiedades mecánicas.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian que el comportamiento mecánico y físico de las arcillas caolíníticas (K) y las bentoníticas cálcica (BC) está fuertemente condicionado por la naturaleza del material añadido, así como por los mecanismos de interacción que se desarrollan a escala micro y macroestructural. La adición de arena y limo produjo incrementos sustanciales en la resistencia a compresión no confinada y reducciones significativas en la plasticidad, lo cual concuerda con estudios previos que destacan la importancia de la gradación granulométrica y del contacto friccional en el desarrollo de resistencia en suelos finos modificados (Das & Ramana, 2010; Holtz & Kovacs, 1981; Mitchell & Soga, 2005).

En particular, la respuesta diferenciada entre la caolinita y la bentonita cálcica frente a la adición de arena confirma el papel determinante de la mineralogía y la plasticidad. La caolinita, caracterizada por una estructura 1:1 y baja

expansividad, alcanza incrementos significativos de resistencia con contenidos relativamente bajos de arena, mientras que la bentonita, dominada por esmectitas altamente expansivas, requiere porcentajes considerablemente mayores para contrarrestar los efectos negativos asociados a su elevada superficie específica y capacidad de intercambio catiónico. Este comportamiento ha sido ampliamente documentado en mezclas arcilla-arena, donde se establece la existencia de un contenido crítico de fracción gruesa necesario para conformar una estructura portante estable (Choobbasti et al., 2017; Georgiannou et al., 1990; Skempton, 1953).

La adición de limo mostró ser particularmente efectiva en la mejora de la resistencia mecánica, especialmente cuando se incorporó en proporciones elevadas, lo que sugiere que este material actúa como una fracción intermedia capaz de optimizar la gradación total del sistema. Este efecto ha sido reportado por estudios que señalan que el limo puede reducir vacíos y mejorar la densificación cuando se encuentra en rangos óptimos, aunque su contribución es principalmente física y no cementante (Kaothon et al., 2016; Lee et al., 2018). La reducción observada en los límites de plasticidad y el incremento del límite de contracción respaldan esta interpretación, indicando una menor susceptibilidad a cambios volumétricos inducidos por humedad.

En contraste, los aditivos no tradicionales evaluados (nanosílice y Terrasil) no mostraron mejoras consistentes en la resistencia mecánica a edades tempranas, e incluso generaron reducciones en algunos casos, particularmente en la caolinita. Este comportamiento puede explicarse por la ausencia de condiciones favorables para el desarrollo de reacciones puzolánicas o procesos de cementación efectivos, como la disponibilidad de calcio libre o un ambiente alcalino adecuado, tal como lo señalan Šavija y Luković (2016). Si bien las micrografías SEM evidencian una densificación local y reducción de vacíos en la bentonita tratada con nanosílice, estos cambios no se traducen necesariamente en una mejora mecánica macroscópica, lo que sugiere que los mecanismos de interacción observados son insuficientes para generar una red estructural resistente sin un sistema activador complementario.

Desde el punto de vista microestructural y fisicoquímico, los resultados de DRX, XRF y SEM-EDS confirman que los cambios mecánicos observados están estrechamente vinculados con la distribución de fases minerales, la morfología de las partículas y la proporción relativa de finos activos. La correlación entre la reducción del índice de plasticidad y el incremento de la resistencia refuerza la relación inversa ampliamente reportada entre plasticidad y capacidad portante en suelos arcillosos tratados (Bell, 1996).

En síntesis, los hallazgos de este estudio concuerdan con la literatura existente en cuanto a la eficacia de la estabilización física mediante adición de materiales granulares, al tiempo que evidencian las limitaciones de los aditivos químicos y nanoaditivos cuando no se combinan con condiciones reactivas adecuadas. Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra la evaluación a un único tiempo de curado, lo cual abre la posibilidad de que los aditivos químicos muestren un desempeño diferente a edades mayores. Futuras investigaciones

deberían explorar combinaciones híbridas de aditivos físicos y químicos, evaluar tiempos de curado prolongados y analizar el comportamiento bajo condiciones cíclicas de humedad y carga, más representativas del desempeño en campo.

En la ingeniería geotécnica de pavimentos, las subrasantes suelen estar conformadas por una mezcla compleja de arcillas, limos, arenas y gravas, cuyas proporciones y características mineralógicas determinan de manera crítica su comportamiento mecánico y su respuesta ante cualquier tratamiento de mejoramiento (Holtz & Kovacs, 1981). Entender el efecto de aditivos no tradicionales en este tipo de materiales requiere no solo evaluar la respuesta global de resistencia, sino también comprender cómo cada componente de la matriz del suelo interactúa con el aditivo. Por ejemplo, la presencia de arcillas altamente plásticas y expansivas puede atenuar o incluso revertir los efectos beneficiosos de ciertos modificadores que, en suelos menos plásticos, muestran mejoras mecánicas significativas (Mitchell & Soga, 2005). Además, para que aditivos como la nanosílice o los organosilanos (p. ej., Terrasil) contribuyan efectivamente, se requiere propiciar un ambiente fisicoquímico adecuado en la matriz del suelo, incluyendo la presencia de activadores químicos (como álcalis o calcio libre), que permitan el desarrollo de reacciones puzolánicas o la formación de productos cementantes duraderos (Šavija & Luković, 2016). De lo contrario, estos aditivos pueden actuar principalmente como finos adicionales que, lejos de mejorar la resistencia, reducen los contactos eficaces entre partículas, debilitando la estructura micro y macro del suelo. Este enfoque integrado —que considera la mineralogía, la gradación, la química del suelo y la naturaleza del aditivo— es esencial para diseñar tratamientos de estabilización efectivos en subrasantes compuestas por mezclas heterogéneas de granos finos y gruesos.

CONCLUSIÓN

Se evaluó de manera integral el efecto de la adición de limo, arena y aditivos no tradicionales sobre el comportamiento mecánico y físico de arcillas caoliníticas y bentoníticas representativas de suelos de subrasante en Colombia. Los resultados evidencian que la respuesta del suelo estabilizado depende fuertemente de su mineralogía y plasticidad inicial. La caolinita presentó mejoras significativas con contenidos moderados de arena y limo, mientras que la bentonita cálcica requirió proporciones mayores de estos materiales para contrarrestar su carácter expansivo y altamente plástico, lo que confirma la necesidad de enfoques de estabilización diferenciados según el tipo de arcilla.

Los aditivos evaluados, nanosílice y el Terrasil, no generaron mejoras mecánicas consistentes a corto plazo cuando se emplearon de forma aislada. Este comportamiento sugiere que su eficacia está condicionada a la existencia de mecanismos de activación fisicoquímica adecuados y a estrategias de combinación con otros estabilizantes, así como a mayores periodos de curado que permitan el desarrollo de interacciones químicas más efectivas dentro de la matriz del suelo.

Una comprensión robusta de la matriz arcillosa de las subrasantes es indispensable para el diseño de tratamientos de mejoramiento eficientes. El desempeño de los aditivos depende no solo de su naturaleza fisicoquímica, sino también de su interacción con los distintos componentes del suelo. En este sentido, la generación de un ambiente fisicoquímico favorable, tal como la presencia de activadores alcalinos o calcio libre en combinación con nanoaditivos, resulta clave para potenciar su efectividad.

Rol de contribución

Jorge Castro: Conceptualización, análisis formal, investigación, escritura-borrador original, escritura-revisión y edición, visualización.

Gloria Restrepo: Análisis formal, investigación, escritura revisión y edición, recursos, visualización, supervisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aksu, G., & Eskisar, T. (2023). The geomechanical properties of soils treated with nanosilica particles. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(4), 954–969. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.06.013>
- Almajed, A., Tirkolaei, H. K., Kavazanjian, E., & Hamdan, N. (2019). Enzyme Induced Biocementated Sand with High Strength at Low Carbonate Content. *Scientific Reports*, 9(1), 1135-. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38361-1>
- ASTM D422-63. Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (2007). <https://doi.org/10.1520/D0422-63R07>
- ASTM D698-12 Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 Ft-Lbf/Ft³ (600 KN-m/M³)) (2021). <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>
- ASTM D2166. Método de Prueba Estándar Para La Resistencia a La Compresión Sin Confinar Del Suelo Cohesivo (2006). <https://doi.org/10.1520/D2166-06>
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, 42(4), 223–237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Chan, A. P. C., Perera, S., Amaratunga, D., Hastak, M., Lombardi, P., Senaratne, S., Jin, X., & Sawhney, A. (2022). The Effect of Fines Content on Compressional Behavior When Using Sand-Kaolinite Mixtures as Embankment Materials. *Applied Sciences*, 12(12), 6050. <https://doi.org/10.3390/app12126050>
- Choobbasti, A. J., Ghasabkolaei, N., Roshan, N., & Ghasemi, S. E. (2017). Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3), 639–650. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.01.010>

- Das, B., & Ramana, G. (2010). *Principles of soil dynamics* (2nd ed.). Cengage Learning.
- Georgiannou, V. N., Burland, J. B., & Hight, D. W. (1990). The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension. *Géotechnique*, 40(3), 431–449. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.3.431>
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice-Hall. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/CI4401/1/material_docente/detalle?id=391831
- Instituto Nacional de Vías. (2013). *Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (INV E – 123 – 13)*. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada (INV- E – 148 – 13). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Relaciones humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación) (INV-E-141-13). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras.
- Instituto Nacional de Vías. (2013). Compresión inconfiada en muestras de suelos (INV-E-152-13). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras.
- Kalhor, A., Ghazavi, M., & Roustaei, M. (2022). Impacts of Nano-silica on Physical Properties and Shear Strength of Clayey Soil. *Arabian Journal for Science and Engineering* 47(4), 5271–5279. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06453-2>
- Kaothon, P., Lee, S.-H., Choi, Y.-T., & Yune, C.-Y. (2022). The Effect of Fines Content on Compressional Behavior When Using Sand-Kaolinite Mixtures as Embankment Materials. *Applied Sciences*, 12(12), 6050. <https://doi.org/10.3390/app12126050>
- Kitazume, M., & Terashi, M. (2013). *The Deep Mixing Method*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13873>
- Little, D. N. (1995). *Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime* (Kendall Hunt Pub Co, Ed.).
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). Fundamentals of Soil Behavior. *Journal of Hazardous Materials*, 125(1–3), 275–276. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.06.004>
- Nagaraj, H. B. (2016). Influence of gradation and proportion of sand on stress-strain behavior of clay-sand mixtures. *International Journal of Geo-Engineering*, 7(1), article 19. <https://doi.org/10.1186/s40703-016-0033-8>

- Nelson, J. D., & Miller, D. J. (1992). Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nag.1610171006>
- Šavija, B., & Luković, M. (2016). Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*, 117(3), 285–301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>
- Sharma, T., & Singh, S. (2023). Influence of nanosilica on properties of soil. *Materials Today: Proceedings*, 118 LNCE, 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.423>
- Sherwood, P. T. (1993). *Soil stabilization with cement and lime* - HMSO. <http://worldcat.org/isbn/9780115511714>
- Skempton, A. W. (1953). *The Colloidal “Activity” of Clays*. International Society For Soil Mechanics And Geotechnical Engineering. <https://www.issmge.org/publications/online-library>