

v.2, n.8, 2025 - Agosto

REVISTA O UNIVERSO OBSERVÁVEL

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS Y SU ESTABILIZACIÓN MEDIANTE AGENTES QUÍMICOS COMO CAL Y CEMENTO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS E SUA ESTABILIZAÇÃO POR AGENTES QUÍMICOS COMO CAL E CIMENTO

Alexander Molina Villalobos¹
José Rodolfo Martínez Cortes²

Revista O Universo Observável

DOI: 10.69720/29660599.2025.000169

[ISSN: 2966-0599](https://doi.org/10.69720/29660599)

¹Universidad Fidelitas

Correo: alexander.molinav@ufide.ac.cr

ORCID: [0000-0002-8118-8855](https://orcid.org/0000-0002-8118-8855)

²Universidad Fidelitas

Correo: jmartinez80507@ufide.ac.cr

ORCID: [0009-0006-0954-2887](https://orcid.org/0009-0006-0954-2887)



EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS EXPANSIVOS Y SU ESTABILIZACIÓN MEDIANTE AGENTES QUÍMICOS COMO CAL Y CEMENTO

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE SOLOS EXPANSIVOS E SUA ESTABILIZAÇÃO POR AGENTES QUÍMICOS COMO CAL E CIMENTO

Alexander Molina Villalobos e José Rodolfo Martínez Cortes



Fuente: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/01/23/la-estabilizacion-de-suelos/>

:

PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
2966-0599

www.ouniversoobservavel.com.br

Editora e Revista
O Universo Observável
CNPJ: 57.199.688/0001-06
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

ABSTRACTO

El presente trabajo de investigación aborda la problemática generada por los suelos expansivos, los cuales experimentan importantes cambios volumétricos debido a fluctuaciones en su contenido de humedad, causando daños significativos en infraestructuras como carreteras, edificios y puentes. Ante esta situación, se evaluó la efectividad de estabilizar dichos suelos mediante la adición de agentes químicos específicos como cal y cemento, buscando mejorar sus propiedades físicas y disminuir su potencial expansivo, siendo una alternativa técnica y económicamente viable para mitigar estos efectos negativos en las obras civiles. Los resultados obtenidos evidenciaron que tanto la cal como el cemento son efectivos en reducir el potencial expansivo y mejorar la plasticidad del suelo, con diferencias notables según la proporción utilizada. Al aplicar 10% de cemento se obtuvo una significativa reducción del índice de plasticidad y del porcentaje de expansión, disminuyendo hasta en un 2.70% el hinchamiento, siendo el agente más eficaz en controlar la expansión volumétrica del suelo. Por su parte, la cal mostró una reducción importante del índice de plasticidad, aunque su capacidad para controlar la expansión resultó ligeramente inferior al cemento, alcanzando una reducción hasta del 8.33% en el porcentaje de expansión. Se concluye que el cemento presenta una mayor eficacia en la estabilización de suelos expansivos en términos de control de expansión volumétrica, mientras que la cal ofrece ventajas en mejorar la trabajabilidad y reducir la plasticidad. Se recomienda utilizar cemento Holcim Multibase para estabilizaciones que requieran un control estricto de la expansión, particularmente en proyectos donde las condiciones geotécnicas son críticas. Finalmente, se sugiere realizar ensayos específicos en cada sitio para determinar las proporciones óptimas, considerando siempre el impacto ambiental y económico de las soluciones implementadas, alineándose con los objetivos del desarrollo sostenible (ODS 9).

Palabras clave: Suelo, expansivo, físicas, plasticidad, estabilización .

ABSTRACT

The present research work addresses the problem generated by expansive soils, which undergo important volumetric changes due to fluctuations in their moisture content, causing significant damage to infrastructures such as roads, buildings and bridges. In view of this situation, the effectiveness of stabilizing these soils through the addition of specific chemical agents such as lime and cement was evaluated, seeking to improve their physical properties and reduce their expansive potential, being a technically and economically viable alternative to mitigate these negative effects in civil works. The results obtained showed that both lime and cement are effective in reducing the expansive potential and improving the plasticity of the soil, with notable differences depending on the proportion used. By applying 10% cement, a significant reduction in the plasticity index and the percentage of expansion was obtained, reducing swelling by up to 2.70%, being the most effective agent in controlling the volumetric expansion of the soil. On the other hand, lime showed a significant reduction in the plasticity index, although its ability to control expansion was slightly lower than cement, reaching a reduction of up to 8.33% in the percentage of expansion. It is concluded that cement has a greater efficiency in the stabilization of expansive soils in terms of control of volumetric expansion, while lime offers advantages in improving workability and reducing plasticity. It is recommended to use Holcim Multibase cement for stabilizations that require tight expansion control, particularly in projects where geotechnical conditions are critical. Finally, it is suggested to carry out specific tests at each site to determine the optimal proportions, always considering the environmental and economic impact of the solutions implemented, aligning with the sustainable development goals (SDG 9).

Keywords: Soil, expansive, physical, plasticity, stabilization.

INTRODUCCIÓN

Los suelos expansivos representan un conflicto importante en el campo de la ingeniería civil debido a la capacidad para variar su volumen al cambiar su contenido de humedad.

Estos cambios pueden causar deterioros importantes en estructuras como edificios, calles y puentes, que genera costos de mantenimiento altos y reparación.

En áreas donde se presentan estos terrenos, es fundamental comprender y mitigar su comportamiento para garantizar la estabilidad y durabilidad de las edificaciones. El uso de productos químicos como la cal

y el cemento ha demostrado ser eficaz para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos expansivos. Sin embargo, llevar a cabo una investigación exhaustiva y de esta forma optimizar el uso de los estabilizadores y adecuar las soluciones a condiciones geotécnicas determinadas.

La investigación se centra en realizar pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades iniciales de los suelos expansivos y sus respectivos cambios debidos a la aplicación de cal y cemento.

Las muestras recolectadas de suelos expansivos y se analizarán para determinar parámetros como los

límites de Atterberg. Posterior a esto, se añadirá distintas proporciones de cal y cemento. Para finalmente realizar ensayos de expansión para conocer su reducción en la expansión.

Las pruebas de laboratorio se llevarán a cabo en los laboratorios de la Universidad Fidéлитas, que están equipados con las herramientas y la tecnología necesarias para realizar pruebas precisas y repetibles.

El proyecto estará dividido en fases, la primera consiste en la recolección de muestras y la caracterización inicial del suelo. Segunda fase se llevarán a cabo los ensayos del laboratorio, agregando distintos porcentajes de cal y cemento. Por último, el análisis de los datos en los ensayos, para posteriormente elaborar el informe final y la preparación de la defensa.

En Ingeniería Civil, la estabilización de los suelos expansivos es un campo de estudio de gran importancia, en especial para las regiones donde este tipo de suelo es común.

Este proyecto aborda un problema práctico y a su vez urgente, que aporta un avance en el conocimiento sobre las técnicas de estabilización de suelos.

La investigación proporcionará datos detallados sobre la eficacia que puede llegar a tener el cemento y la cal como estabilizadores.

Estos hallazgos podrán aprovechar como guía para posibles aplicaciones en proyectos de construcción en el futuro y que pueden implicar que se desarrollen procedimientos más económicas y sostenibles al perfeccionar el uso de estos estabilizadores, lo que beneficia tanto a los profesionales de la ingeniería civil como a las comunidades que dependen de infraestructuras estables y duraderas.

REFERENCIAL TEÓRICO

Suelos expansivos

Los suelos expansivos son aquellos que presentan la capacidad de aumentar de volumen al absorber agua y reducirlo al perderla, fenómeno conocido como hinchamiento y contracción (Hua Chen, 2012).

Este comportamiento está ligado principalmente a su composición mineralógica y estructura interna. Minerales arcillosos en especiales los Montmorillonita que por su estructura tienen una capacidad de retener grandes cantidades de agua, lo cual provoca que se dé un crecimiento de volumen del material y a su vez un drástico cambio en la reducción de volumen cuando el agua que ha retenido se seca.

Este tipo de suelo formalmente se forman en climas áridos y semiáridas, debido a que la meteorización química suele ser limitada, permitiendo la acumulación de minerales arcillosos con propiedades expansivas.

Las cimentaciones construidas sobre este tipo de suelo están expuestas a considerables esfuerzos de levantamiento debido a la expansión. Estas fuerzas

harán que los cimientos se agrieten y se deterioren.

Si el suelo contiene arcillas que son altamente plásticas, parcialmente saturadas, estos pueden compactar fuertemente por desecación. Este suelo al tener acceso al agua y al ser sometido a bajos esfuerzo van a absorber el agua, por lo tanto, se expandirán.

Figura 1. Desecación de suelo expansivo



Nota: Suelo expansivo en estado de sequedad o desecación.
Fuente: LinkedIn, por SGS SIGA, 2021

Composición del suelo

Mineralogía de suelos expansivos

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además en algunas ocasiones silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados.

Estos minerales tienen casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas (Eulalio Juárez, 1974).

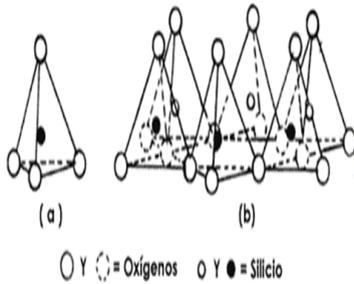
El comportamiento de las arcillas se ve realmente afectado por su configuración estructural y constitución mineralógica, a diferencia del comportamiento que pueden mostrar los suelos gruesos.

La estructura mineralógica es en general cristalina. Químicamente son silicatos cuyas redes están formadas por elementos tetraédricos y octaédricos. (Trujillo, 1986).

Los tetraedros se grupos que se encuentran agrupados en estructuras hexagonales, donde un átomo de oxígeno está nexa entre cada dos tetraedros. Las unidades de forma hexagonal se repiten de manera indefinida, creando una retícula laminar.

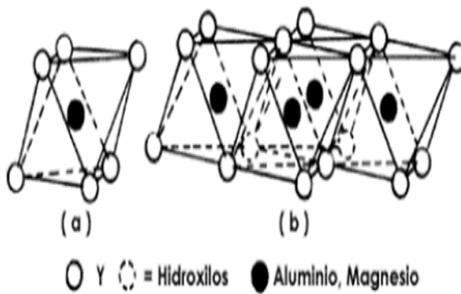
Por otro lado, un octaedro presenta seis átomos de oxígeno, en el centro un átomo de aluminio, hierro o magnesio, y al igual que la estructura tetraédrica un oxígeno está nexa entre cada dos octaedros para construir la retícula.

Figura 3 Lámina de tetraedros.



Nota: Estructura tetraédrica, un oxígeno nexa entre cada dos tetraedros. Fuente: María Angélica Sánchez Alban, 2014.

Figura 4. Lámina de octaedros



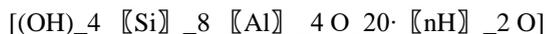
Nota: Estructura octaédrica, en el centro un átomo de aluminio, hierro o magnesio y un oxígeno está nexa entre cada dos octaedros. Fuente: Trabajo Final de Graduación, por María Angélica Sánchez Alban, 2014.

Textura porosa:

Al llevarse a cabo este tipo de mezclas de las dos redes previamente mencionadas, junto con los diferentes aniones y cationes que las componen produce una amplia variedad de minerales arcillosos cristalinos.

Los tres grupos más importantes de mineral de la arcilla son la montmorillonita, la illita y la caolinita. Las cuales se describen a continuación:

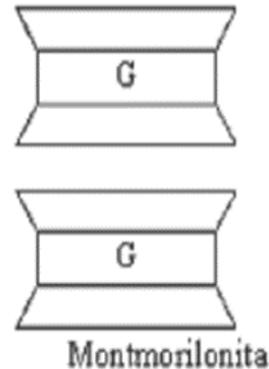
Montmorillonita



Corresponden a un mineral del grupo de las esmectitas y es conocida por su alta capacidad hinchamiento y contracción. Están presentes en la gran mayoría de suelos expansivos. Su estructura cristalina está compuesta por una lámina octaédrica de aluminio entre dos láminas tetraédricas de sílice, formando una estructura 2:1 (Mitchell & Soga, 2005).

La unión que se forma entre dos unidades elementales es mucho más débil que la unión de hidrógeno que forma en los caolines, por ello permite que moléculas de agua se penetren entre las uniones ocasionando la expansión.

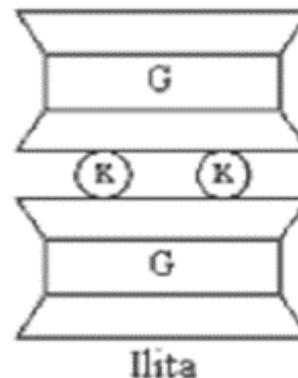
Figura 5. Estructura laminar de la Montmorillonita



Nota: Estructura del mineral montmorillonita. Fuente: Fundamentos de mecánica de suelos, por Roy Whitlow, 1999. Ilita $[(OH)_4 \cdot k_y ([Si]_{(8-y)} [Al]_y [Al]_4 [Fe]_4 [Mg]_4 [Mg]_6 O_{20})$

Esta arcilla pertenece al grupo de las mica-arcillas. Según (Mitchell & Soga, 2005) su estructura es similar a la montmorillonita, pero con diferencias en la sustitución isomórfica y en el contenido de potasio en el espacio interlaminares, lo que la hace menos expansiva. Por esta razón permite el ingreso de moléculas de agua entre las capas.

Figura 6. Estructura laminar de la illita



Nota: Estructura del mineral illita. Fuente: Fundamentos de mecánica de suelos, por Roy Whitlow, 1999.

Caolinita $([Al]_2 O_3 \cdot 2 [SiO]_2 \cdot 2 H_2 O)$:

Es el principal componente de suelos arcillosos en zonas tropicales y subtropicales, y debido a su baja capacidad de intercambio catiónico y su estructura más compacta, no presenta expansión ni contracción significativas en presencia de agua (Mitchell & Soga, 2005).

Este mineral arcilloso presenta una estructura laminar de dos capas 1:1, la cual se compone de un tetraedro y otra de un octaedro. Sus unidades elementales se encuentran unidas por enlaces de hidrógeno.

Figura 7. Estructura laminar de la caolinita



Nota: Estructura del mineral caolinita. Fuente: Fundamentos de mecánica de suelos, por Roy Whitlow, 1999.

Tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas de los minerales arcilloso suele ser inferior a 2 micras. Los suelos están compuestos por partículas de diferentes tamaños que, según la clasificación granulométrica, se dividen en grava, arena, limo y arcilla. En el caso de los suelos expansivos, la fracción de arcilla es predominante, y estas partículas son extremadamente pequeñas, con diámetros inferiores a 0.002 mm (Mitchell & Soga, 2005).

Los suelos presentan más posibilidad de contener minerales expansivos en cuanto menor sea el tamaño de las partículas. Las partículas de arcilla, al ser tan diminutas, poseen una superficie específica muy alta, lo que significa que tienen una gran área superficial en relación con su volumen (Holtz, D.Kovacs, & Sheahan, 1981)

Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las partículas se clasifican de la siguiente manera (ASTM D2487/D2487M-17, 2017)

Grava: > 4.75 mm

Arena: 0.075 mm – 4.75 mm

Limo: 0.002 mm – 0.075 mm

Arcilla: < 0.002 mm

Propiedades fisicoquímicas de las arcillas

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos expansivos son determinantes en el comportamiento, por lo que llegan a perjudicar significativamente el diseño y la construcción de diversas infraestructuras.

Floculación y dispersión

Según (Sanchez Albán, 2014) recalca que las interacciones que se generan entre dos partículas próximas entre sí en una solución acuosa se ven afectadas por dos tipos de fuerzas, las cuales son:

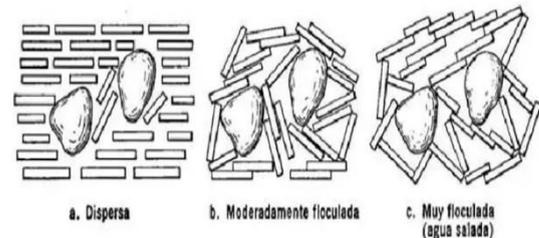
- Fuerzas de atracción entre las partículas debido a las fuerzas de enlaces secundarios.
- Fuerzas de repulsión que se producen por la naturaleza de las cargas negativas de la superficie de la partícula y de la capa adsorbida.

- Estos dos fenómenos afectan el comportamiento de los suelos arcillas en especial propiedades como la cohesión, la permeabilidad, resistencia al corte y el potencial de expansión.

Definición de floculación y dispersión

- Floculación: Es el proceso por el cual las partículas finas de arcilla se agrupan formando agregados o "flóculos" debido a fuerzas químicas y físicas, como la atracción electrostática entre partículas cargadas (Mitchell & Soga, 2005).
- Dispersión: Es el proceso inverso, donde los agregados de partículas de arcilla se separan en partículas individuales, aumentando la dispersión y movilidad de estas en el suelo (Olphen, 1977).

Figura 8. Fenómeno de floculación y dispersión



Nota: Estructura de suelos cohesivos. Fuente: Introducción A La Mecánica de Suelos Y Cementaciones, por George B. Sowers & George F. Sowers. 1972.

Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Se refiere a la cantidad total de cationes que un suelo puede retener e intercambiar en sus superficies coloidales cargadas negativamente, en especial en minerales de arcilla y materia orgánica.

Esta carga electrostática negativa de la superficie que se encuentra en la partícula puede ser contrarrestada o neutralizada por cationes con carga positiva. Se expresa generalmente en miliequivalentes por 100 gramos de suelo

La capacidad de intercambio catiónico es una medida de la cantidad de cargas negativas disponibles en las superficies de las partículas del suelo para retener cationes de la solución del suelo (Mitchell & Soga, 2005)

Según (Beltrán Martínez, 2009) la capacidad de absorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate.

La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

Plasticidad

Se refiere a la capacidad de un suelo para deformarse sin fracturarse bajo cargas aplicadas y

mantener la deformación una vez que la carga es retirada. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envoltura sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas

Según (Mauritz Atterberg, 1914) quien introdujo los límites de consistencia (límites de Atterberg), la plasticidad de un suelo se cuantifica mediante los límites líquido y plástico, y el índice de plasticidad (IP), que es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP)
"IP = LL - LP"

Estos parámetros permiten clasificar y comparar suelos en términos de su plasticidad y comportamiento mecánico.

Actividad

También conocida como capa activa, se refiere a la capa de suelo que llega a experimentar cambios significativos de volumen compensado a las variaciones que presenta en la humedad. Esta capa o estrato es la principal responsable de los movimientos de contracción e hinchamiento que afectan a las estructuras construidas sobre ella. La profundidad de la capa activa es el espesor del suelo que sufre cambios estacionales en el contenido de humedad, resultando en movimientos volumétricos significativos (Nelson & Miller, 1997)

Según (Castro Muñoz, 2012) Los agrietamientos en el verano se extienden tanto vertical como horizontalmente dividiendo la superficie en bloques, facilitando la evaporación a mayores profundidades y por consiguiente aumentando el espesor de la capa activa.

Características de la capa activa: Variabilidad de humedad

Presentan una sensibilidad a las fluctuaciones de humedad, esto es causado por la precipitación, evaporación, así como la transpiración de la vegetación.

Profundidad de variable

La profundidad de la capa activa puede variar desde menos de un metro hasta varios metros, dependiendo de factores climáticos y del tipo de suelo (Hua Chen, 2012)

Influencia de estructuras

Los movimientos diferenciales dentro de esta capa pueden causar asentamientos y levantamientos, provocando grietas y deformaciones en edificaciones y pavimentos (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Propiedades físicas de los suelos arcillosos

Densidad Seca

La densidad seca o peso específico seco, es una propiedad física fundamental en la mecánica de suelos que representa la masa de las partículas sólidas por unidad de volumen total del suelo, excluyendo el contenido de agua. Se expresa generalmente en unidades de kg/m^3 o g/cm^3 (Das & Sobhan, 2018).

En los suelos expansivos, la densidad seca alta produce cambios altos en el volumen, debido a las fuerzas elevadas de succión que posee el suelo que ven contrarrestadas al entrar en las partículas del suelo agua.

Esta propiedad es esencial para entender cómo el suelo responderá a las cargas y cambios ambientales, especialmente en suelos con alto contenido de arcilla y potencial de expansión (Holtz, D.Kovacs, & Sheahan, 1981).

Importancia de la densidad seca en los suelos expansivos

Control de potencial de hinchamiento

Según (Nelson & Miller, 1997) una densidad seca más alta en suelos expansivos suele resultar en un menor potencial de hinchamiento, ya que reduce el volumen de vacíos disponibles para la expansión de las partículas arcillosas.

La densidad seca afecta principalmente el espacio poroso del suelo, lo que influye en la cantidad de agua que este puede adsorber, por ende, el potencial de hinchamiento.

Propiedades mecánicas

Interviene en especial en la resistencia al corte, compresibilidad y permeabilidad del suelo. La densidad seca es un parámetro clave que afecta la succión matricial y el comportamiento mecánico de suelos no saturados, como los suelos expansivos (Fredlund & Rahardjo, 1993)

Capacidad de absorción

Esta es una habilidad de estos suelos para absorber y retener agua en su estructura. La capacidad de un suelo para absorber agua depende de la naturaleza de los minerales de arcilla presentes y de su estructura interna. Los suelos con altas proporciones de arcillas expansivas pueden absorber grandes cantidades de agua, resultando en expansiones volumétricas significativas (Holtz, D.Kovacs, & Sheahan, 1981)

Esta capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales, es decir de la superficie específica y porosidad.

Color

Es una propiedad observable de los suelos que puede proporcionar información valiosa acerca de la composición mineralógica y otras características. El

color en los suelos expansivos puede ser un indicador indirecto a ciertas características que afectan su comportamiento como el hinchamiento y la contracción.

Según (Bigam & Ciolkosz, 1993) destacan que el color es una propiedad diagnóstica en la clasificación y evaluación de suelos, proporcionando indicios sobre su formación y propiedades.

Contenido de agua

El contenido de humedad es determinante en el comportamiento de los suelos expansivos. El manejo y control son fundamentales, ya que los suelos expansivos contienen minerales arcillosos que pueden absorber y perder agua, provocando cambios significativos en su volumen y propiedades mecánicas.

El contenido de agua es el factor más importante que controla el comportamiento de los suelos expansivos, afectado su potencial de hinchamiento y las presiones ejercidas sobre las estructuras (Hua Chen, 2012).

Humedad de equilibrio

La humedad equilibrio es aquella a la cual el suelo tendería a tener si todas las condiciones fueran constantes: si hubiera una capa freática a una cierta profundidad y una evaporación constante en la superficie (Jimenez Salas, 1975)

Cuando el suelo se encuentra con su humedad en equilibrio el contenido de agua que alcanza es un estado estable con su entorno, por lo tanto, no gana ni pierde humedad de manera significativa. Este estado es de suma importancia, ya que, es el punto donde el suelo no experimenta cambios volumétricos apreciables.

Este parámetro es crítico para poder comprender y a su vez predecir el comportamiento de estos suelos.

Un manejo adecuado de la humedad de equilibrio es posible diseñar estructuras más seguras y duraderas, minimizando los riesgos que se pueden dar debido al hinchamiento y la contracción.

Proceso de expansión

Las arcillas por lo particular se encuentran siempre hidratadas, teniendo al menos dos moléculas en el espesor de la capa, a la cual se le denomina capa difusa o doble capa difusa. El agua que es atraída, es captada fuertemente por iones metálicos. La hidratación ocurre principalmente a través de dos mecanismos:

Adsorción de agua en la superficie

Las partículas de arcilla se unen a las superficies exteriores a causa de fuerzas

electrostáticas y de Van Der Waals. Esta capa de agua adsorbida afecta propiedades como la plasticidad y la cohesión del suelo (Grim R. , 1968)

Hidratación interlamilar:

Los suelos de granos finos como en el caso de los suelos expansivos, las fuerzas que tienen una mayor repercusión en su comportamiento son las que se desarrollan en su superficie.

En este fenómeno interlamilar las moléculas de agua son capaces de penetrar entre las láminas cristalinas del mineral, ocasionando una expansión significativa del volumen del suelo (Mitchell & Soga, 2005)

Métodos de identificación y clasificación de los suelos expansivos

El reconocimiento y clasificación de estos suelos es esencial para prevenir daños estructurales y garantizar la seguridad en proyectos de ingeniería civil. Los suelos que contienen arcillas expansivas se caracterizan por ser pegajosas cuando están húmedas y usualmente grietas en la superficie cuando están secos. Los métodos para reconocer si un suelo puede ser expansivo se pueden definir en tres grupos:

Identificación mineralógica

La composición mineral de los suelos expansivos puede determinar su potencial expansivo, ya que este depende en gran medida de la cantidad y el tipo de minerales que lo componen. Esto según la estructura reticular, por la cual está compuesta por las láminas de silícicas y las aluminicas, según el tipo de arcilla.

Algunos efectos que se producen en arcillas con una estructura mineral específica al aplicar ciertas acciones externas se emplean para identificar preliminar de un tipo de mineral predominante en la arcilla (Rodríguez Vargas, 1974). Estos efectos son:

Al someterse a altas temperaturas, las arcillas montmorillonitas toman un color rojizo mientras las caolinitas cambian a un color más blanco.

Al ser sumergidas las arcillas con un alto contenido de montmorillonita se fracturan mientras que en las caolinitas esta reacción no se produce.

La presencia predominante de haloisita en un material hace que las propiedades de este varíen considerablemente si pierde el agua molecular que forma parte de su estructura, al exponerse a incrementos de temperatura. También se caracterizan porque su densidad seca es un 50% menor a la de otros minerales de arcilla, aproximadamente.

Según (Beltrán Martínez, 2009) indica que las cargas eléctricas negativas sobre la superficie de los minerales de arcilla, la firmeza entre las capas ligadas y la capacidad de intercambio catiónico influye en el potencial de expansión de la arcilla.

De esta forma se supone que identificando las constituyentes mineralógicas de la arcilla se puede estimar cuál es su potencial de expansión. La composición mineralógica puede determinarse principalmente por técnicas como:

Difracción de rayos X

La difracción de rayos X es fundamental para determinar la estructura cristalina de los materiales, permitiendo identificar los minerales presentes en una muestra a través de sus patrones de difracción característicos (Cullity & Stock, 2014)

A través de esta técnica analítica, es posible identificar y cuantificar minerales en una muestra por medio de la interacción de los rayos X con la estructura cristalina de los minerales. Según (Holtz, D.Kovacs, & Sheahan, 1981) cada mineral produce un patrón de difracción única que permite su identificación precisa.

Análisis térmico diferencial

El Análisis térmico diferencial (ATD) es una herramienta valiosa para identificar minerales arcillosos, ya que cada mineral exhibe comportamientos térmicos específicos que se reflejan en el termograma (Grim & Rowland, 1942).

Por medio del ATD se mide las variaciones de la temperatura entre las muestras de suelo y una referencia inerte, siendo sometidas a un calentamiento de manera controlado. Gracias a los cambios endotérmicos o exotérmicos que experimenta los minerales de arcillas a temperaturas específicas, es posible su identificación.

Análisis químico

Por medio del análisis químico, se determinar la composición de los elementos que presenta el suelo usando técnicas como espectrometría de emisión atómica o la fluorescencia de rayos X.

Estas técnicas proporcionan información de la presencia de minerales específicos como Si, Al, Fe, , Mg y Ca. La composición química proporciona indicios sobre el tipo de minerales arcillosos presentes y su potencial expansivo, especialmente al analizar la relación entre sílice y alúmina (Nelson & Miller, 1997)

Microscopio electrónico

Según (Delgado Trujillo, 1986) microscopio ofrece una observación directa del mineral y por lo tanto proporciona información complementaria sobre las características morfológicas de las partículas y de sus agrupaciones, pero los datos obtenidos se refieren a una parte muy pequeña de la muestra que quizás no sea representativa.

Métodos directos de la clasificación

Los métodos con medias directas, con los

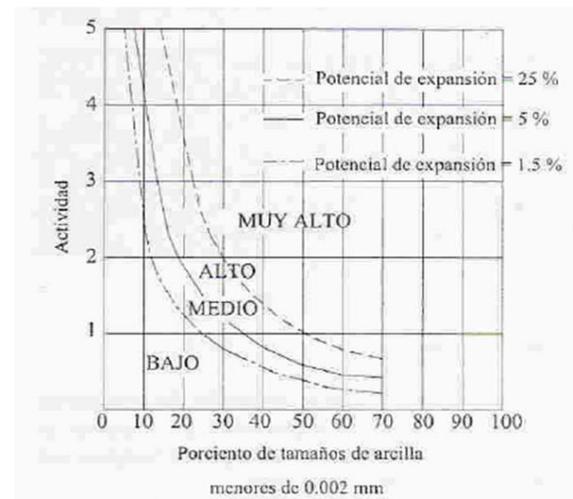
métodos con más favorables y provechosos para la clasificación del grado de expansividad. A través de estos métodos, no solo permite su clasificación, sino también su cuantificación.

Método de la actividad

Este método fue propuesto por Seed, Woodward y Lungren. Este método define la relación entre el índice de plasticidad y el por ciento de granos menores de 2 micras. Se define a través de la siguiente relación:

$$\text{"Actividad"} = \frac{\text{"Índice de plasticidad"}}{(\text{"%<0.002mm"})^{-10}}$$

Figura 9. Método de la actividad



Nota: El criterio de Seed, Woodward y Lungren. Fuente: Prediction of Swelling Potential for compacted Clays, por HB. Seed, Jr. Woodward, RJ y R. Lundgren (1962). Tomado de (Castro Muñoz, 2012)

Según (Skempton, 1953) La actividad proporciona una medida de la capacidad de las partículas arcillosas para contribuir a la plasticidad y, por ende, al potencial expansivo del suelo. Él sugirió tres clases de arcillas, de acuerdo con actividad, donde las arcillas activas proveen más potencial de expansión.

Tabla 1. Clasificación según actividad

Clasificación	Actividad
$A < 0,75$	Baja actividad
$0,75 \leq A \leq 1,25$	Actividad normal
$A > 1,25$	Alta actividad

Nota: Clasificación de las arcillas de acuerdo con su actividad. Fuente: The Colloidal "Activity" of Clays, por A.W. Skempton (1953)

Una actividad alta hace referencias a una mayor susceptibilidad al hinchamiento y contracción, debido a cambios en el contenido de humedad. Este método es una

herramienta que ayuda a predecir y clasificar el comportamiento expansivo de los suelos.

Método USBR

El United States Bureau of Reclamation (USBR) es un método que se utiliza para evaluar el potencial de expansión, a través de las propiedades de índice obtenidos como el límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP).

Los suelos se clasifican en categorías según su susceptibilidad al hinchamiento.

A partir de múltiples ensayos realizados por (Holtz & Gibbs, 1956), proponen una clasificación basada en el índice de plasticidad, el límite de retracción y el contenido de coloides menores que 0.001 mm.

Métodos indirectos de la clasificación

Estos métodos se basan en la identificación sencilla, como los límites de Atterberg, granulometría y otros, se han desarrollado diversos criterios para determinar si un suelo puede ser expansivo.

Gran parte de los métodos indirectos tiene como función reconocer el posible potencial de expansión del suelo y gradarlo de modo superficial, pero no pueden determinar si el suelo es efectivamente presentará problemas de hinchamiento.

Método de Lambe

Es una técnica experimental utilizada para determina la potencia de expansión de los suelos, basada en la medición de la presión de hinchamiento. Este ensayo consiste en poner una muestra con unas determinadas condiciones de compactación en un anillo edométrico y medir la presión desarrollada sobre un anillo dinamométrico a las dos horas de la inundación. Esta presión se le conoce como índice de hinchamiento o de expansión.

A partir de este dato, se obtiene gráficamente el cambio potencial de volumen (PVC).

Métodos indirectos de la clasificación

Estos métodos se basan en la identificación sencilla, como los límites de Atterberg, granulometría y otros, se han desarrollado diversos criterios para determinar si un suelo puede ser expansivo.

Gran parte de los métodos indirectos tiene como función reconocer el posible potencial de expansión del suelo y gradarlo de modo superficial, pero no pueden determinar si el suelo es efectivamente presentará problemas de hinchamiento.

Método de Lambe

Es una técnica experimental utilizada para determina la potencia de expansión de los suelos, basada en la medición de la presión de hinchamiento.

Este ensayo consiste en poner una muestra con unas

determinadas condiciones de compactación en un anillo edométrico y medir la presión desarrollada sobre un anillo dinamométrico a las dos horas de la inundación. Esta presión se le conoce como índice de hinchamiento o de expansión.

A partir de este dato, se obtiene gráficamente el cambio potencial de volumen (PVC).

Método índice de Expansión libre (EI)

La prueba EI no se utiliza para duplicar ninguna condición de campo en particular, como la densidad del suelo, el contenido de agua, la carga, la estructura del suelo en el lugar o la composición química del agua del suelo, tal como lo indica la norma del Método de prueba estándar para el índice de expansión de suelos (ASTM D4829-11)

Esta prueba remoldea una muestra de suelo dentro de un anillo con un diámetro estándar 4" y 1" de alto, con un grado de saturación cerca del 50%. A su vez, aplicando una sobrecarga de "1Ib/" ["in"] ^"2", se satura la muestra y no se mueva hasta alcanzar un cierto valor o después de 24 hrs.

El ensayo utiliza condiciones de prueba consistentes en la preparación de muestras compactadas de modo que se pueda realizar una correlación directa de los datos entre organizaciones.

Coefficiente lineal de extensibilidad (COLE)

Es un parámetro expansión y contracción lineal de un suelo debido a variaciones en su contenido de humedad. COLE es la relación de la diferencia entre la longitud en húmedo y la longitud en seco de un terrón respecto a su longitud en seco.

Según (Beltrán Martínez, 2009) menciona que COLE es una medida del cambio de dimensiones de una muestra cuando pasan de un estado húmedo a uno seco y es estimada de la densidad de la muestra a una succión de 5 psi (33 kPa) y una condición seca.

$$COLE = \frac{\Delta L}{(L - D)} = \left(\frac{\gamma_{dD}}{\gamma_{dM}} \right)^{0.33} - 1$$

Donde:

- $\frac{\Delta L}{(L - D)}$ = esfuerzo lineal relativo para condiciones secas
- γ_{dD} = densidad de una muestra seca
- γ_{dM} = densidad de una muestra a una succión de 33 kPa.

Estabilización de suelos

Desde el punto de vista de Ingeniería, la estabilización de suelos nace de la necesidad de mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo, con la intención de hacerlos adecuados para la construcción y soportar cargas estructurales, que a lo largo de los años se ha experimentado con diferentes métodos para

lograrlo. La importancia de la estabilización de los suelos radica en poder asegurar la seguridad y así mismo la durabilidad de las estructuras construidas sobre suelos, que, en su estado natural, no son capaces de alcanzar la resistencia necesaria y estabilidad. La estabilidad de una estructura depende en gran medida de las propiedades del suelo subyacente; por lo tanto, mejorar estas propiedades es fundamental para prevenir fallas estructurales (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996)

Problemas que presentan los suelos para requerir estabilización

Los suelos pueden llegar a presentar diferentes deficiencias o carencias, lo cual los hace inadecuados para su uso en diferentes aspectos de la construcción, como:

- **Baja capacidad portante:** Suelos blandos o saturados que no pueden soportar cargas sin sufrir asentamientos excesivos (Bowles & Guo, 1996).
- **Expansividad:** Suelos arcillosos que se hinchan al absorber agua y se contraen al secarse, provocando movimientos y agrietamientos en las estructuras (Nelson & Miller, 1997).
- **Erosión y pérdida de cohesión:** Suelos susceptibles a la erosión por agua o viento, lo que puede comprometer la estabilidad de taludes y pendientes (Sherwood, 1993).
- **Licuefacción:** Suelos arenosos saturados que, bajo cargas sísmicas, pueden perder su resistencia y comportarse como líquidos (Seed & Idriss, 1971).
- **Alta plasticidad:** Suelos con altos índices de plasticidad que pueden deformarse significativamente bajo cargas (Holtz, D.Kovacs, & Sheahan, 1981).

Tipos de suelos que requieren estabilización

- Suelos Arcillosos Expansivos
- Suelos Blandos y Orgánicos
- Arenas Sueltas
- Suelos Salinos o Contaminados
- Suelos Erosivos

Métodos de estabilización

Existen diversos métodos de estabilización que se seleccionan según las características del suelo y los requisitos del proyecto, el fin de los distintos métodos es transformar los suelos que no son aptos, en suelos

con condiciones mecánicas óptimas y puedan ser utilizados para cumplir el propósito del proyecto. Dentro de los métodos de estabilización se pueden mencionar:

Modificación química:

Es un método que implica la adición de agentes químicos, esto para alterar y mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Este proceso transforma la composición mineralógica y estructural del suelo mediante reacciones químicas que resultan en la mejora de su resistencia, durabilidad y capacidad para soportar cargas

Modificación física:

La modificación física se basa en la mezcla de suelos con diferentes granulometrías que pueden optimizar la distribución de partículas y mejorar las propiedades mecánicas del suelo resultantes. Es un método que también se puede complementar con la técnica de compactación.

Modificación mecánica:

Consiste en llevar a cabo la estabilización utilizando equipos mecánicos los cuales ayudan a mejorar las condiciones o aumentar la densidad aplicando cargas de corto plazo. Este método busca mejorar el material existente sin realizar cambios en la estructura.

Modificación por inclusión o confinamiento:

Técnica consiste en reforzar el material usando fibras, barras, telas, mallas y anclajes, al igual que los confinamientos con acero, telas o concreto.

Por motivo de interés de este trabajo, va a profundizar aún más con el método físico para mejorar las propiedades de expansión y químico, al utilizar dos agentes estabilizadoras como cal y cemento.

Modificación Química

Tal como menciona (Castro Muñoz, 2012) Los agentes químicos tienen como principal función entrelazar las partículas, logrando que aumenten el tamaño de estas, por lo cual se da un aumento en la relación de vacíos, disminuye la densidad y el área superficial, lo cual tiene como consecuencia una disminución en la magnitud de los cambios volumétricos.

Los efectos al utilizar modificaciones químicas son significativos. Se obtiene un incremento en la resistencia mecánica del suelo, permitiendo soportar cargas mayores si presentan deformaciones excesivas. Por otro lado, reduce la plasticidad y expansividad de los suelos arcillosos, ayudando a disminuir riesgos de hinchamientos y contracción.

Otro efecto importante es la disminución de la permeabilidad de suelo, lo cual es de gran ayuda al reducir la infiltración de agua y protege las estructuras de problemas que puede ser asociados con el exceso de humedad, tales como erosión interna y licuefacción en suelos granulares.

Existen diferentes tipos de agentes químicos que se pueden utilizar para la estabilización de suelos, sin embargo, este trabajo se centra el uso de agentes químicos como cal y cemento.

Modificación física

Debido a las transformaciones que alteran la estructura interna del suelo y su comportamiento frente al agua al adicionar agentes estabilizantes como cal o cemento. En el caso de la cal se da un reordenamiento interno que es capaz de producir un suelo menos disperso y más denso, que tiene menos capacidad para retener grandes cantidades de agua en la fase plástica. Gracias a esto, el suelo reduce su límite líquido y su índice de plasticidad, de esta forma mitigando la susceptibilidad del suelo a los cambios volumétricos por humedad.

Por su lado, el cemento tiene la capacidad de hidratar las partículas y de esta forma crear productos cementantes, como el gel de silicato de calcio hidratado. Estos compuestos pueden llegar a generar una estructura más rígida, encapsulando las partículas de arcillosas que impiden o limitan la penetración del agua y a su vez reduciendo de manera efectiva el potencial de hinchamiento.

En ambos casos, los cambios producidos por la cal y el cemento, se obtiene una reducción en el índice de plasticidad, así como la disminución en la absorción del agua, por lo tanto, reducción en la expansividad.

Estabilización con cemento

El cemento es uno de los agentes químicos más utilizados en ingeniería para mejorar las propiedades del suelo. Gracias a su uso ha sido posible optimizar suelos problemáticos, logrando que se lleven a cabo la construcción de estructuras seguras y duraderas.

El cemento mezclado con suelos mejora las propiedades mecánicas, provocando en los suelos un doble efecto. Por un lado, funciona como conglomerante, mismo papel que en el concreto. Por otro lado, el hidrato de calcio al entrar en contacto con el agua-cemento, libera iones de calcio que, al tener gran afinidad con el agua, se produce una disminución de la porosidad y de la plasticidad, al igual que un aumento en la resistencia y durabilidad.

Este proceso de estabilización se lleva a cabo agregando cemento Portland Tipo I que es ampliamente utilizado para la estabilización en un suelo que ha sido pulverizado previamente. A través del proceso de hidratación la mezcla se endurece,

mejorando sus propiedades mecánicas. No obstante, se pueden utilizar otros tipos de cementos como los Tipo MM, los cuales incluyen en mayor porcentaje algún tipo de componente mineral. En el presente trabajo de investigación se utiliza el cemento Multibase, un cemento hidráulico modificado mixto, comercializado en Costa Rica por la empresa Holcim, específicamente formulado para procesos de estabilización de suelos.

Estudios realizados anteriormente han demostrado que factores como el tipo y contenido de arcilla, plasticidad que presenta el suelo y las condiciones de curado, influyen directamente en la eficiencia de este tipo de estabilización. (Little, 1995) indica que suelos con alto contenido de arcillas expansivas requieren mayores cantidades de cemento para lograr una estabilización efectiva.

(Castro Muñoz, 2012) menciona que muchos tipos de suelos pueden ser estabilizados cemento Portland, siempre y cuando posea un índice de plasticidad menor a 30%, esto se debe a que presenta problemas para lograr una mezcla homogénea.

Por esta razón, si se lleva a cabo la estabilización de suelos con un índice de plasticidad alto, se recomienda primero se agrega cal en un porcentaje de 1%, lo cual, ayuda a mejorar la trabajabilidad y reducir la plasticidad.

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

El estudio utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) para determinar que la muestra corresponde a un suelo fino, clasificado como arcilla de alta plasticidad (CH). Esto se estableció mediante el análisis granulométrico y los límites de Atterberg, específicamente por tener un límite líquido superior a 50 y un índice de plasticidad por encima de la línea A, caracterizando así un suelo con alta expansividad y baja capacidad portante.

Los ensayos con cal demostraron que, a partir de una dosificación del 4% al 6%, se evidencia una reducción significativa del límite líquido, indicando que el suelo requiere menos humedad para pasar de estado plástico a líquido, mejorando así la estabilidad volumétrica. Además, el índice de plasticidad disminuyó notablemente al 10% de cal, lo que refleja una reducción importante en la plasticidad y una clasificación cercana a un suelo de plasticidad media.

El cemento mostró un comportamiento similar en la reducción del límite líquido y del índice de plasticidad, con valores que disminuyen progresivamente al aumentar la dosificación, alcanzando una reducción del índice de plasticidad considerablemente eficaz a partir del 6%. Además, el cemento favorece un fraguado rápido con formación de compuestos que aglutinan las partículas del suelo, aumentando su resistencia y limitando su capacidad

para absorber agua y expandirse.

Los ensayos de expansividad indicaron que ambos estabilizantes reducen significativamente el porcentaje de hinchamiento conforme aumenta su proporción. Sin embargo, el cemento logra una reducción más rápida y profunda, con expansiones menores al 3% al 10% de dosificación y un acortamiento en el tiempo para alcanzar la máxima expansión, mientras que la cal muestra un descenso progresivo, aunque los valores finales de expansión siguen siendo algo mayores que con cemento.

Las diferencias en la efectividad de la cal y el cemento se deben principalmente a los distintos mecanismos químicos que intervienen en la estabilización. La cal actúa mediante intercambio catiónico y floculación de partículas, promoviendo la deshidratación y cohesión del suelo, mientras que el cemento genera compuestos cementantes rígidos que limitan fuertemente la adsorción de agua y la deformación, especialmente a dosis elevadas, lo que explica su mayor rapidez y control en la mitigación de la expansividad del suelo.

CONSIDERACIONES FINALES

1. La estabilización química de los agentes de cal y cemento demuestran ser eficaces para la mejora significativa en las propiedades físicas de los suelos expansivos, logrando reducir notablemente el potencial de expansión y a su vez disminuyendo la susceptibilidad en cuanto a las variaciones volumétricas que son causadas a los cambios de humedad. Esto también se evidencia con la reducción que se pudo observar tanto en los límites líquidos e índice de plasticidad.
2. La muestra en estado natural presentó un índice de plasticidad inicial de 64.35 y una expansión aproximadamente entre 25% y 31%. Al adicionar 10% de cemento Holcim Multibase, el índice de plasticidad se redujo hasta un valor de 40.53, mientras que el porcentaje de expansión desciende significativamente a solo 2.70%. El uso de cemento refleja claramente una estructura más rígida, que tiene la capacidad limitar las deformaciones volumétricas por humedad.
3. La estabilización con cal viva al 10% consigue reducir aún más el índice de plasticidad, alcanzado 33.06, sin embargo, mostró una reducción menos significativa en el ensayo de expansión con 8.33%. Se puede evidenciar que la cal logra mejorar considerablemente la plasticidad mediante la floculación y el intercambio de cationes, pero no crea una estructura tan rígida de manera inmediata como el caso del cemento

4. Ambos agentes estabilizadores como la cal y el cemento generan beneficios claros, no obstante, sus efectos específicos varían según la dosis y la propiedad particular que se desea controlar. La selección del agente estabilizante es clave de acuerdo la prioridad del proyecto que se desea reducir la plasticidad o el potencial de hinchamiento.
5. Este trabajo de investigación final se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 9) de la Organización Naciones Unidas (ONU), donde busca fomentar la construcción de infraestructuras resilientes y sostenibles por medio de técnicas que ayuden a disminuir la necesidad de sustituir grandes cantidades de volúmenes de suelos, optimizando los recursos y generando soluciones más responsables ambientales.

REFERENCIAS CITADAS Y CONSULTADAS

- American Society for Testing and Materials. (1970). ASTM-D423, ASTM-D424. Método sugerido de prueba para la cohesión de suelos granulares no plásticos. Retrieved from <https://store.astm.org/stp38482s.html>
- American Society for Testing and Materials. (2011). ASTM D2435-04. Métodos de prueba estándar para propiedades de consolidación unidimensional de suelos utilizando carga incremental. Retrieved from <https://store.astm.org/d2435-04.html>
- American Society for Testing and Materials. (2014). ASTM-D422-63. Método de prueba estándar para el análisis del tamaño de partículas de suelos. Retrieved from <https://store.astm.org/d0422-63r07.html>
- American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM-D2487-17. Métodos de prueba estándar para el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos. Retrieved from <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>
- American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM-D4829-11. Método de prueba estándar para el índice de expansión de suelos. Retrieved from <https://www.astm.org/d4829-11.html>
- American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM D2487-17. Práctica estándar para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (Sistema unificado de clasificación de suelos). Retrieved from <https://store.astm.org/d2487-17.html>
- American Society for Testing and Materials. (2020).

- ASTM-D2487-17. Standar Practice of Classification of Soils for Engineering Purposes. Retrieved from <https://www.astm.org/d2487-17.html>
- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM D4546-21. Métodos de prueba estándar para el hinchamiento o colapso unidimensional de suelos. Retrieved from <https://store.astm.org/d4546-21.html>
- Angulo, M., & Zavaleta, C. (2019). Estabilización de suelos arcillosos con cal para el mejoramiento de las propiedades fisico-mecánicas como caa de rodadura en la prolongación Navarro Cauper, Dsitrito San Juan - Maynas - Iquitos. San Juan Bautista: Tesis de licenciatura, Universidad Científica del Perú. Retrieved from <http://repositorio.ucp.edu.pe:8080/server/api/core/bitstreams/0685676e-9ac2-47a0-b209-a75e5ef6d425/content>
- Bauzá Castello, J. D. (2003). Mezclas con cemento en las infraestructuras del transporte. Estabilizacion de suelos con Cal. Madrid. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/46100489/ESTABILIZACION_DE_SUELOS_CON_CAL-libre.pdf?1464709603=&response-disposition=inline%3B+filename%3DESTABILIZACION_DE_SUELOS_CON_CAL.pdf&Expires=1742140749&Signature=GT8RUUy0HR10ysZEPIG74wNnLE1aUKadzHxsX
- Bell, F. (2007). Ingeniería Geológica (Segunda edición). Elsevier. Retrieved from <https://books.google.co.ve/books?id=Izm6IUVDcUC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false>
- Beltrán Martínez, R. (2009). DISEÑO GEOTÉCNICO Y ESTRUCTURAL DE UNA CIMENTACIÓN EN ARCILLA EXPANSIVA. México, Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autonoma de México. Retrieved from https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000642979/3/0642979_A1.pdf
- Bigham, J. M., & Ciolkosz, E. J. (1993). Soil Color. Sociedad Americana de Ciencias del Suelo. Retrieved from <https://www.abebooks.co.uk/9780891188025/Soil-Color-Special-Publication-Bigham-0891188029/plp>
- Bowles, J., & Guo, Y. (1996). Foundation analysis and design. Nueva York: McGraw-hill. Retrieved from [fromefaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://api.library.lqdtu.edu.vn/media/FoundationAaly](https://api.library.lqdtu.edu.vn/media/FoundationAaly)
- Castro Muñoz, E. (2012). Estudio de un suelo arcilloso expansivo del Valle Central Occidental de Costa Rica para su uso como subrasante. San José: Tesis de licenciatura, Univerdad de Costa Rica. Retrieved from <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/a21a4341-e87b-4145-a442-1173149457fe/content>
- Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos. (2010). Código Sísmico de Costa Rica. San José: Colegio Fererado de Ingeniero y de Arquitectos de Costa Rica. Retrieved from https://www.codigosismico.or.cr/descargas/CS_CR2010.pdf
- Cullity, B., & Stock, S. (2014). Elements of X-Ray Diffraction (3.^a ed.). Pearson. Retrieved from [https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20-%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20\(2014\).pdf](https://www.eng.uc.edu/~beaucag/Classes/AdvancedMaterialsThermodynamics/Books/B.D.%20Cullity,%20S.R.%20Stock%20-%20Elements%20of%20X-Ray%20Diffraction-Pearson%20Education%20Limited%20(2014).pdf)
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). Principles of Geotechnical Engineering (novena edición). Cengage Learning. Retrieved from <https://mega.nz/file/XBZk3ADT#g1vLATLl3GCCeKbZiMczkymSvFtw7y0PgdhG8bwVr8>
- Delgado Trujillo, A. (1986). Influencia de las trayectoria de las tensiones en el comportamiento de las arcillas expansivas y de los suelos colapsables en el laboratorio y en el terreno. Sevilla: Tesis de Doctorado, Universidad de Sevilla. Retrieved from <https://idus.us.es/bitstreams/e204a213-0517-441e-bb53-0734218df09c/download>
- Eulalio Juárez, A. R. (1974). Mecánica de suelos Tomo III. México: Limusina. Retrieved from https://books.google.co.cr/books?id=WKcAZg_EEC&printsec=copyright&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for Unsaturated Soil. Saskatoon: John Wiley & Sons. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=IvtPOGuJJwC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Soil+Mechanics+for+Unsaturated+Soil&ots=XMvOjfYQKi&sig=Vy-Ib48ZBMyfZ4Yb7vPfdFihWTE#v=onepage&q=Soil%20Mechanics%20for%20Unsaturated>

- [%20Soil&f=false](#)
- Grim, R. (1968). Arcilla mineralogía. McGraw-Hill Book Company.
- Grim, R. E., & Rowland, R. A. (1942). Análisis térmico diferencial de minerales arcillosos y otros materiales hidratados. American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials. Retrieved from <https://www.ideals.illinois.edu/items/43134/bitstreams/129254/object>
- Hanson, W., & Peck, R. (1962). Ingeniería de Cimientos (Segunda Edición). Limusa. Retrieved from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=qH6KEAAAOBAJ&oi=fnd&pg=PR17&dq=Hanson,+Walter%3B+Peck,+Ralph&ots=hcJDZfVHOu&sig=JEu63CMgJonJt_J-nlIsA84WLUs#v=onepage&q=Hanson%2C%20Walter%3B%20Peck%2C%20Ralph&f=false
- Holcim Costa Rica. (n.d.). Holcim Costa Rica. Retrieved from <https://www.holcim.cr/cemento>
- Holtz, R. D., D.Kovacs, W., & Sheahan, T. C. (1981). An Introduction to Geotechnical Engineering. PEARSON. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/53733597/libro-libre.pdf?1499017083=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAN_INTRODUCTION_TO_GEOTECHNICAL_ENGINEER.pdf&Expires=1742145644&Signature=PdOo3oyOihH68PFS6pjmOm86eZbjtkI~Wwqmb1O5dln~qjbFU3zhpt
- Holtz, W., & Gibbs, H. (1956). Engineering properties of expansive clays. Transactions of the American Society of Civil Engineers. Retrieved from <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/TACEAT.0007325>
- Hua Chen, F. (2012). Foundations on expansive soils (Vol. 12). Denver: Elsevier. Retrieved from [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=C30h1HpQvDUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Foundations+on+expansive+soils+\(Vol.+12\)&ots=0WRMawudqA&sig=TpOHF1g51A0nwHxvozeUzoqtYiI#v=onepage&q=Foundations%20on%20expansive%20soils%20\(Vol.%2012\)&f=false](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=C30h1HpQvDUC&oi=fnd&pg=PP1&dq=Foundations+on+expansive+soils+(Vol.+12)&ots=0WRMawudqA&sig=TpOHF1g51A0nwHxvozeUzoqtYiI#v=onepage&q=Foundations%20on%20expansive%20soils%20(Vol.%2012)&f=false)
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2015). Construcción - Cemento hidráulico - Especificaciones y Requisitos. Retrieved from <http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Norma>
- [ativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80899](#)
- Jimenez Salas, J. (1975). Geotecnia y cimientos (Segunda Edición). Madrid: Rueda. Retrieved from <https://www.slideshare.net/slideshow/geotecnia-y-cimientos-i-2jimenez-salas-pdf/254688424>
- Jong, E., & Warkentin, B. (1965). Shrinkage of soil samples with varying clay concentration. <https://cdsciencepub.com/doi/abs/10.1139/t65-002>: Canadian geotechnical journal
- Lambe, T. (1960). The character and identification of expansive soil. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=dVXpD5WoDkIC&oi=fnd&pg=PA1&dq=The+character+and+identification+of+expansive+soil&ots=-DM7yoRBNg&sig=J5Z2uKvX-z21Qo6j1K12s58fK1g#v=onepage&q=The%20character%20and%20identification%20of%20expansive%20soil&f=false>
- Lanamme. (2008). Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas. San José. Retrieved from <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1468/UI-06-07%20Guía%20para%20la%20estabilización%20o%20mejoramiento%20de%20rutas%20no%20pavimentadas.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Little, D. N. (1995). Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. Kendall/Hunt Publishing Company. Retrieved from <https://search.worldcat.org/title/32415139>
- López, M. Q. (2017). Análisis de cambios volumétricos de suelos expansivos en modelos a escala reducida y su comparación con resultados de técnicas experimentales. Heredia: Universidad Latina.
- Mauritz Atterberg, A. (1914). Die Plastizität der Tone. Internationale Mitteilungen für Bodenkunde.
- Ministerio de Economía, Industria y Comercio. (2015). Reglamento Técnico RTCR 479:2015 Materiales de Construcción, Cementos Hidráulicos. Retrieved from <https://www.meic.go.cr/reglateg/rtrcr-4792015-materiales-de-construccion-cementos-hidraulicos-especificaciones/>
- Mitchell, J. (1973). Influence of mineralogy and pore solution chemistry on the swelling and stability of clays. Proceedings of 3rd international conference expansive soils.

- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*. New Jersey: John Willey & Sons. Retrieved from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/58321042/kupdf.net_fundamentals-of-soil-behavior-jk-mitchell-amp-k-soga-libre.pdf?1549960816=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DKupdf.net_fundamentals_of_soil_behavior.pdf&Expires=1742150616&Signature=
- Nelson, J., & Miller, D. J. (1997). *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering*. Colorado: John Wiley & Sons. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ISvJ33HHxDEC&oi=fnd&pg=PR17&dq=Expansive+Soils:+Problems+and+Practice+in+Foundation+and+Pavement+Engineering&ots=ogpuNzTVsZ&sig=gIXk2gJybZFKzVj1vn9UHDwve4A#v=onepage&q=Expansive%20Soils%3A%20Problems%20and%20Prac>
- Olphen, H. (1977). *An Introduction to Clay Colloid Chemistry* 2nd Edition. Edición. John Wiley & Sons. Retrieved from <https://archive.org/details/claycolloidchemi000hvan/mode/2up>
- Rajasekaran, G., & Rao, N. (2004). *La microestructura de la arcilla marina estabilizada con cal*. Elsevier. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801896000418>
- Rodriguez Vargas, M. A. (1974). *Pavimentos sobre arcillas expansivas*. San Pedro. Retrieved from <https://ruie.ucr.ac.cr/catalogo/Record/INII-UIR-CD-12422/Description?sid=879014>
- Sanchez Albán, M. A. (2014). *Estabilización de Suelos Expansivos con Cal y Cemento en el sector Calcical Del Cantón Tosagua Provincia de Manabí*. Quito: Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Retrieved from <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e1c8a587-00a3-41f3-a113-c8a380f9baed/content>
- Seed, H., & Idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations division*.
- Seed, H., Woodward, J., & Lundgren, R. y. (1962). Prediction of Swelling Potential for compacted Clays. *Revista de la división de mecánica de suelos y fundaciones*. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s1336>
- Sherwod, P. (1993). *Soil stabilization with cement and lime*. Retrieved from https://books.google.co.cr/books/about/Soil_Stabilization_with_Cement_and_Lime.html?id=YogCQQAACAAJ&redir_esc=y
- Skempton, A. (1953). *The colloidal activity of clays*. Thomas Telford Limited. Retrieved from <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/27368/1/Selected%20Papers%20on%20Soil%20Mechanics.pdf#page=65>
- Sowers, G. B., & Sowers, G. F. (1972). *Introducción A La Mecánica de Suelos Y Cimentaciones*. México: Limusa Wiley. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/389611454/Introduccion-a-la-mecanica-de-suelos-y-cimentaciones-Geroge-B-Sowers-y-George-F-Sowers-FREELIBROS-ORG-pdf>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Mecánica de suelos en la práctica de la ingeniería* (3^o edición). John Wiley & Sons. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=XjH6DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR19&dq=Terzaghi,+Karl%3B+Peck,+Ralph+B.%3B+Mesri,+Gholamreza&ots=aiKuK6Se4E&sig=aestJNFS9pdBDOgG1Bu9q6o0N78#v=onepage&q=Terzaghi%2C%20Karl%3B%20Peck%2C%20Ralph%20B.%3B%20Mesri%2C%20Gholamr>
- Whitlow, R. (1999). *Fundamentos de Mecánica de Suelos*. México: Continental. Retrieved from <https://www.udocz.com/apuntes/100234/fundamentos-de-la-mecanica-de-suelos-roy-whitlow>
- Yilmaz, I., & Civelekoglu, B. (2010). *Un aditivo para la estabilización de suelos arcillosos expansivos*. Elsevier. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131709000349>