

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**CARACTERIZACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS Y MITIGACIÓN
DE RIESGOS**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTORA:

Sandra Paola Peralta Tingal

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en
Ciencias con mención en Ingeniería Civil**

AUTOR:

Kevin Leonardo Cerrón Holgado

Nilger Luis Cerrón Estévez

Cesar Augusto Carrasco Boza

Kenyi Wilmar Quispe Arroyo

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk

Lima, diciembre, 2021

RESUMEN

La presencia de suelos arcillosos expansivos ocasiona problemas durante y después de una construcción, en el segundo caso se producen daños en la estructura que ocasionan grandes costos de reparación. Por ello, es importante conocer el comportamiento de este tipo de suelo a través de un análisis de sus características físicas, mecánicas y mineralógicas, además de métodos para reconocer la presencia y el potencial de expansión de la arcilla y así poder plantear la alternativa más adecuada para mitigar los riesgos asociados a este tipo de suelo.

Para identificar la presencia de arcillas la norma E.050 de Suelos y Cimentaciones recomienda ensayos para identificar características físicas y mecánicas, otra forma de identificarlas es por medio de identificación mineralógica, además de métodos directos e indirectos. Todos los métodos se centran en determinar el potencial de hinchamiento de las arcillas expansivas que pueden ser bajo, medio, alto o muy alto. En base a este potencial se plantea si es mejor el reemplazo de suelo, el mejoramiento de suelo o simplemente evitar la construcción en dichas zonas por el peligro que representan.

Además, al identificar los lugares en Perú con presencia de arcillas y revisar algunos casos y las soluciones empleadas ya sea a corto, mediano o largo plazo. Se concluyó que faltan estudios de suelos en diversos lugares del país, pero se sabe que las arcillas predominan principalmente en el norte. Y se sugiere buscar otras formas para mejorar el suelo con un menor costo e impacto ambiental, ya que el Manual de Carreteras (2014), para el caso de la subrasante, solo sugiere el uso de cal y cemento Portland.

ABSTRACT

The presence of expansive clay soils can cause difficulties during and after a construction, the damage that appears in the structure implies huge costs to repair it. Consequently, it is important to know the behavior of this type of soil through an analysis of its physical, mechanical and mineralogical features. Also, as methods to recognize the presence and potential expansion of clay and thus able to propose the most appropriate alternative to mitigate the associated risks with this type of soil.

To identify the presence of clays, the Soils and Foundations E.050 standards advise to identify physical and mechanical attributes, another way to identify them is through mineralogical identification, also as direct and indirect methods. All methods concentrate on determining the swelling potential of expansive clays, which can be low, medium, high or very high. Based on this potential, it is considered if it is better to replace the soil, improve the soil, or simply prevent construction in these areas due to the risk they signify.

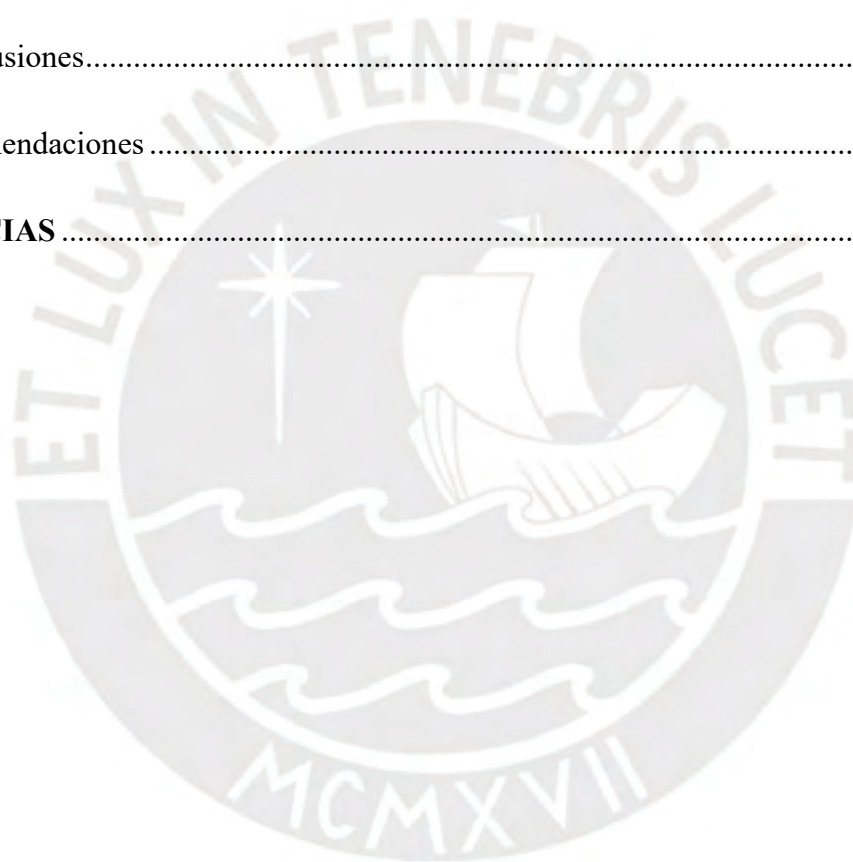
In addition, when identifying the places in Peru with the presence of clays and reviewing some cases and the solutions used in the short, intermediate or long term, it was concluded that soil studies are deficient in various parts of the country, for the time being, these clays are known to occur mainly in the north. Also, it is suggested to find other ways to improve the soil with a lower cost and environmental impact, since the Highway Manual (2014), in the case of the subgrade, only suggests the use of lime and Portland cement.

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | i |
| ABSTRACT | ii |
| LISTA DE FIGURAS | vi |
| LISTA DE TABLAS | vii |
| CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.2. Justificación | 2 |
| 1.3. Alcance | 2 |
| 1.4. Objetivos..... | 3 |
| 1.4.1. Objetivo general..... | 3 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.5. Metodología..... | 3 |
| CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA | 5 |
| 2.1. Arcillas expansivas | 5 |
| 2.1.1. Caracterización física..... | 5 |
| 2.1.2. Caracterización mecánica. | 6 |
| 2.1.3. Caracterización mineralógica..... | 7 |
| 2.2. Reconocimiento de arcillas expansivas | 8 |
| 2.2.1. Identificación mineralógica. | 10 |
| 2.2.2. Métodos indirectos..... | 11 |

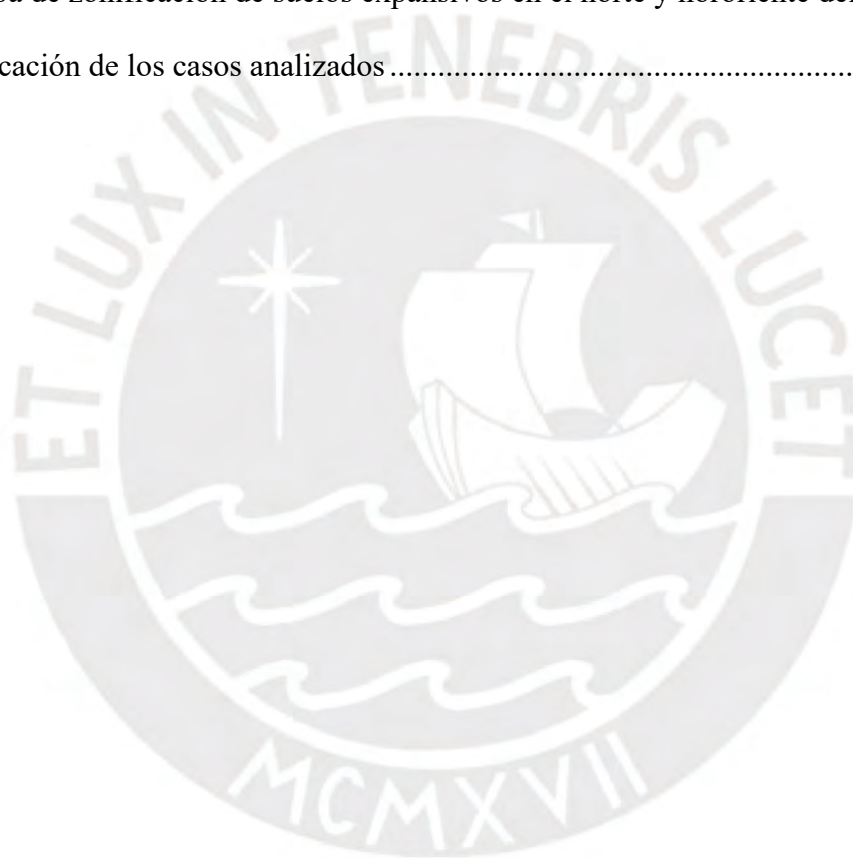
| | |
|--|-----------|
| 2.2.2. Métodos directos..... | 14 |
| 2.3. Riesgos debido a la presencia de arcillas expansivas | 16 |
| 2.4. Mitigación de riesgos..... | 16 |
| 2.4.1. Reemplazo de suelo. | 17 |
| 2.4.2. Estabilización química. | 18 |
| 2.5. Situación en el Perú | 19 |
| CAPÍTULO 3: CASOS DE INVESTIGACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS EN OBRAS EN EL PERÚ | 21 |
| 3.1. Asentamiento humano “Señor de los Milagros” | 22 |
| 3.1.1. Descripción. | 22 |
| 3.1.2. Medidas de Mitigación. | 23 |
| 3.2. Avenida Dinamarca, Sector La Molina | 23 |
| 3.2.1. Descripción. | 23 |
| 3.2.2. Medidas de Mitigación. | 23 |
| 3.3. Carretera Chiclayo-Chota km 133.4..... | 24 |
| 3.3.1. Descripción. | 24 |
| 3.3.2. Medidas de Mitigación. | 25 |
| 3.4. Calles del Sector B en Paita Baja | 25 |
| 3.4.1. Descripción. | 25 |
| 3.4.2. Medidas de Mitigación. | 26 |
| 3.5. Localidad de Villa Rica | 27 |

| | |
|--|-----------|
| 3.5.1. Descripción..... | 27 |
| 3.5.2. Medidas de Mitigación..... | 28 |
| 3.6. Avenida Jacinto Ibarra..... | 29 |
| 3.6.1. Descripción..... | 29 |
| 3.6.2. Medidas de Mitigación..... | 29 |
| CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 31 |
| 4.1. Conclusiones..... | 31 |
| 4.2. Recomendaciones..... | 32 |
| REFERENCIAS..... | 34 |



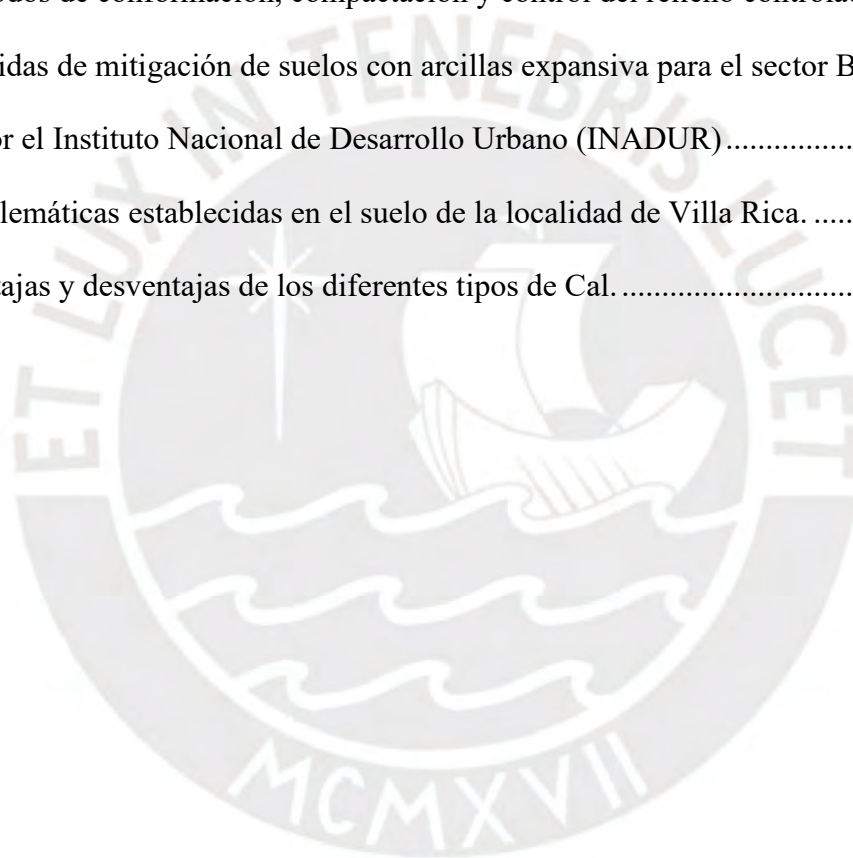
LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Estructuras de (a) caolinita; (b) ilita; (c) montmorillonita..... | 8 |
| Figura 2. Clasificación de Cambio de Potencial de Volumen..... | 9 |
| Figura 3. Cuadro de potencial expansivo del suelo..... | 12 |
| Figura 4. Clasificación de potencial de expansión..... | 13 |
| Figura 5. Gráfica de expansividad modificada Merwe | 13 |
| Figura 6. Mapa de zonificación de suelos expansivos en el norte y nororiente del Perú..... | 19 |
| Figura 7. Ubicación de los casos analizados | 21 |



LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Ensayos para la caracterización física y sus aplicaciones | 5 |
| Tabla 2. Ensayos para la caracterización mecánica y sus aplicaciones | 6 |
| Tabla 3. Clasificación de suelos expansivos | 9 |
| Tabla 4. Clasificaciones por grado de expansión (potencial de hinchamiento)..... | 15 |
| Tabla 5. Datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansivos..... | 15 |
| Tabla 6. Métodos de conformación, compactación y control del relleno controlado | 17 |
| Tabla 7. Medidas de mitigación de suelos con arcillas expansiva para el sector B: Paita Baja, propuestas por el Instituto Nacional de Desarrollo Urbano (INADUR)..... | 26 |
| Tabla 8. Problemáticas establecidas en el suelo de la localidad de Villa Rica. | 27 |
| Tabla 9. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de Cal. | 28 |



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Los suelos expansivos son suelos cohesivos con bajo grado de saturación y están compuestos de materiales finos como limos y arcillas. Estos suelos presentan un factor importante denominado potencial de expansión (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2018). Esta propiedad se comporta en base a diversos factores como la presencia o no de las cargas superficiales, o por una disminución de los esfuerzos efectivos debido a una variación del contenido de humedad (Juárez y Rico, 1974). Esta variación puede ser causada por la presencia de lluvias, vegetación o limitación de la evaporación por un tiempo prolongado. Otro factor importante es el tipo de mineral arcilloso y los cationes de absorción que influyen en la capacidad de expansión de las arcillas (Juárez y Rico, 1974). Los suelos arcillosos, además, tienden a absorber grandes cantidades de agua luego de las lluvias y este se vuelve pegajoso y pesado; sin embargo, cuando se secan se contraen y agrietan (Jones y Jefferson, 2012).

Adicionalmente, se revisará las características físicas, mecánicas y mineralógicas de las arcillas expansivas para entender mejor su comportamiento. En primer lugar, la caracterización física se define a partir de las propiedades índice del suelo. En segundo lugar, la caracterización mecánica incluye la compresibilidad y la resistencia al corte del suelo. Por último, en la caracterización mineralógica hace referencia al tipo de mineral arcilloso, ya que a partir de distribución de sus átomos y capacidad de absorber o intercambiar cationes se conoce cuán expansivo puede ser el suelo.

El artículo 37 de la norma E.050 de Suelos y cimentaciones indica la clasificación del cambio de potencial de volumen y el potencial de expansión de las arcillas expansivas, y plantea el reemplazo de suelo por un material de relleno controlado como la principal solución para mitigar los daños (MVCS, 2018). Además, los métodos utilizados para la identificación de arcillas expansivas son tres: identificación mineralógica, métodos directos e indirectos. Estos métodos permiten determinar el potencial de expansión del suelo ya sea en un nivel bajo, medio, alto o muy alto.

Debido a que los suelos expansivos se hinchan y contraen a causa de diversos factores, estos pueden producir daños importantes en las estructuras (Das, 2015). Estos daños incluyen el levantamiento, agrietamiento y ruptura de la cimentación y de la estructura (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018). Por ello, es importante reconocer este tipo de suelos y las características de la zona para luego seleccionar una solución para mitigar los daños durante o después de la construcción.

1.2. Justificación

Los depósitos de suelos expansivos y los daños a causa de su presencia se han reportado en más de 40 países (como se citó en Jones y Jefferson, 2012). Estos daños ascienden a muchos millones de dólares en todo el mundo anualmente (Firoozi et al, 2017). En Perú, debido a la presencia de suelos arcillosos expansivos y climas lluviosos en algunas zonas, es necesario eliminar o mitigar los daños de las estructuras. Y, como estas son producto de la expansión urbana, incluye caminos, aeropuertos, proyectos de irrigación y edificaciones de todo tipo.

1.3. Alcance

En el presente trabajo de investigación abracará las características física, mecánica y mineralógica de las arcillas expansivas además de un análisis de los posibles riesgos y su identificación en campo. Para los métodos de identificación se revisan la identificación mineralógica, y los métodos directos e indirectos. Luego de identificado el suelo y su capacidad expansiva, se mostrarán las medidas de mitigación que se plantean para resolver esta problemática. Esto se obtendrá a partir de seis casos analizados en el ámbito peruano, cuatro de ellos ubicados en el norte del país y los otros en la parte central. Además, se espera que sirva como base para determinar el método de estabilización más apropiado dependiendo de la ubicación geográfica del suelo, ya que dependiendo de este el mineral y características del suelo el comportamiento de las arcillas puede variar.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general.

Conocer la caracterización de las arcillas expansivas, los riesgos asociados y alternativas para mitigarlos.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Identificar los métodos para reconocer las arcillas expansivas en campo y con ensayos de laboratorio.
- Indicar los riesgos asociados a la presencia de arcillas expansivas.
- Identificar lugares con presencia de arcillas expansivas en el país y las soluciones que se tomaron en el proyecto
- Enumerar las principales soluciones para mitigar los daños a causa de las arcillas expansivas.

1.5. Metodología

Este trabajo se basa en una investigación documental, esta se define como “la búsqueda de una respuesta específica a partir de la indagación en documentos” (Baena, 2014, pp. 12). Además, este tipo de investigación permite describir, explicar, analizar, comparar y criticar las fuentes de información (Ávila, 2006).

La primera estrategia será la búsqueda sistemática de información en base de datos de la Pontificia Universidad Católica del Perú, páginas web de instituciones geológicas y empresas que trabajan en base a los riesgos existentes por los diferentes tipos de suelos. La segunda será la búsqueda localizada, para esta estrategia se revisará la plataforma del Sistema de Bibliotecas Pucp, ya sea para revisar las revistas de la disciplina de Ingeniería y especialidad de Geotecnia, así como el Repositorio Digital de Tesis y trabajos de investigación de Pucp. Además, se revisarán la Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones y el Manual de Carreteras de nuestro país. La tercera será la búsqueda derivada que fue necesaria para poder conseguir las fuentes primarias que se obtienen revisando la bibliografía adjunta de los textos consultados (Avellaneda, 2007). Este tipo de búsqueda permite conocer diversos autores que realizan estudios similares.

Finalmente, debido a que se verificarán diversas fuentes como libros, publicaciones y páginas web de instituciones de Geotecnia, será necesario realizar una triangulación de datos. Ya que, esta actividad se realiza para contrastar varias fuentes de información (Hernandez-Sampieri et al., 2014).



CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Arcillas expansivas

Los suelos arcillosos son aquellos que cambian su volumen de acuerdo a su contenido de agua y en caso de ser un cambio extremo se le denomina suelo expansivo (Wray, 2019). Estos suelos presentan un comportamiento de hinchamiento y contracción debido a los minerales arcillosos presentes en su composición como el caso de la esmectita (Jones y Jefferson, 2012). La esmectita es un grupo que incluye montmorillonitas, arcillas altamente expansivas y que representan los mayores problemas en edificaciones (Nelson y Miller, 1992). Para entender más el comportamiento de las arcillas expansivas, se va a revisar las características a continuación:

2.1.1. Caracterización física.

La caracterización física de los suelos se define a partir de sus propiedades índice, estas permiten nombrar a los suelos y establece relaciones con sus propiedades ingenieriles. Las propiedades índice se obtienen por medio de ensayos como la clasificación visual, el contenido de humedad, el peso específico, la granulometría, plasticidad, y densidad máxima y mínima (Zegarra, 2011). Estos ensayos y sus aplicaciones se detallan en la tabla 1. Además, Chindris (2017) afirma que las propiedades físicas a tener en cuenta de las arcillas expansivas incluyen la interacción química del agua, la plasticidad, la estructura del suelo y la densidad seca. Estas se consideran muy importantes debido a la función del agua en el proceso de hinchamiento de las arcillas expansivas.

Tabla 1. Ensayos para la caracterización física y sus aplicaciones

| ENSAYO | APLICACIÓN |
|--------------------------------|--|
| Clasificación Visual | Primer paso antes de la programación de los ensayos de laboratorio |
| Contenido de humedad | Se usa en muchos ensayos |
| Peso específico de los sólidos | Usado en la determinación de las características de un suelo |
| Granulometría | Tamizado Clasificación de suelos. |
| | Sedimentación Estimación de la susceptibilidad de un suelo a la acción de la helada |
| | Se emplea para la selección de materiales para la estabilización de carreteras, diseño de represas, etc. |

| | | |
|--------------------------|---|--|
| Plasticidad | Límite Líquido | Clasificación de suelos. Proporcionan una rápida estimación de algunas propiedades de los suelos arcillosos. |
| | Límite Plástico | |
| | Límite de Contracción | Estimación de los efectos sobre la cimentación de una estructura cuando el contenido de humedad puede variar luego de la construcción. |
| Densidad Máxima y Mínima | Determinación de la densidad relativa de suelos granulares, para comparar resultados de ensayos con los estados naturales del suelo | |

Fuente: Mecánica de suelos (Zegarra y Zavala, 2011).

2.1.2. Caracterización mecánica.

La caracterización mecánica de los suelos son parte de las propiedades ingenieriles que incluyen la compresibilidad y la resistencia al corte que en el caso de las arcillas no solo depende del tamaño y forma, sino también de la caracterización mineralógica que se detalla en la siguiente sección. Los ensayos y aplicaciones de las propiedades mecánicas del suelo se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Ensayos para la caracterización mecánica y sus aplicaciones

| ENSAYO | APLICACIÓN | |
|----------------------|------------------------------|--|
| Comprensibilidad | Consolidación unidimensional | Permite evaluar los asentamientos que se producirán al aplicar una carga al suelo. Determinación de la permeabilidad |
| | Consolidación triaxial | |
| Resistencia al corte | Compresión no confinada | Determinación de los parámetros de resistencia al corte del suelo de presiones admisibles de cimentaciones, diseño de taludes, cálculo de presiones de suelo, etc. |
| | Compresión triaxial | |
| | Corte directo Veleta | Determinación rápida de la resistencia al corte de un suelo |

Fuente: Mecánica de suelos (Zegarra y Zavala, 2011).

2.1.3. Caracterización mineralógica.

La composición mineralógica es la propiedad más importante en cuanto a granos finos se refiere (Terzaghi, 1966). Los minerales arcillosos se clasifican de acuerdo a la distribución de sus átomos y capacidad de absorber o intercambiar cationes, siendo los principales grupos las caolinitas, las ilitas y las montmorillonitas (Das, 2015). Este último mineral es una fuente dominante de hinchamiento en los suelos expansivos y además son los más frecuentes (Mitchel, 2005). Otros minerales comunes que se encuentran generalmente son clorita, haloisita, vermiculita y atapulgita (Das, 2015).

2.1.3.1. Caolinitas.

Este mineral consiste en capas repetidas de láminas de sílice-gibbsita con una separación de 7.2 Å de espesor unidas por enlaces de hidrógeno como se observa en la figura 1 (a). Este mineral se produce como plaquetas y su superficie específica o área de la superficie por unidad de masa es aproximadamente 15 m²/g (Das, 2015).

2.1.3.2. Iilitas.

Este mineral también denominado arcilla micácea consiste en una lámina de gibbsita unida a una lámina de sílice superior y otra inferior unidas por iones de potasio como se observan en la figura 1 (b). La superficie específica de este mineral es aproximadamente de 80 m²/g (Das, 2015).

2.1.3.3. Montmorillonitas.

Este mineral presenta una estructura similar a la ilita; es decir, en una lámina de gibbsita unida a una lámina de sílice superior y otra inferior unidas como se observa en la figura 1 (c), pero debido a la ausencia de iones de potasio, esta zona entre láminas atrae gran cantidad de agua. La superficie específica de este mineral es aproximadamente de 800 m²/g (Das, 2015).

La montmorillonita es el grupo con mayor capacidad de intercambio iónico y es parte del grupo esmectita, teniendo esta una capacidad diez veces mayor que la caolinita (Duncan, 1992). Este intercambio iónico adicional a las cargas negativas de la superficie del mineral arcilloso y la fuerza entre capas influyen en el potencial de hinchamiento (Chen, 1975). Además, esta capacidad les da la cualidad expansiva a las arcillas, por ello, todas las arcillas son expansivas hasta cierto punto (Duncan, 1992).

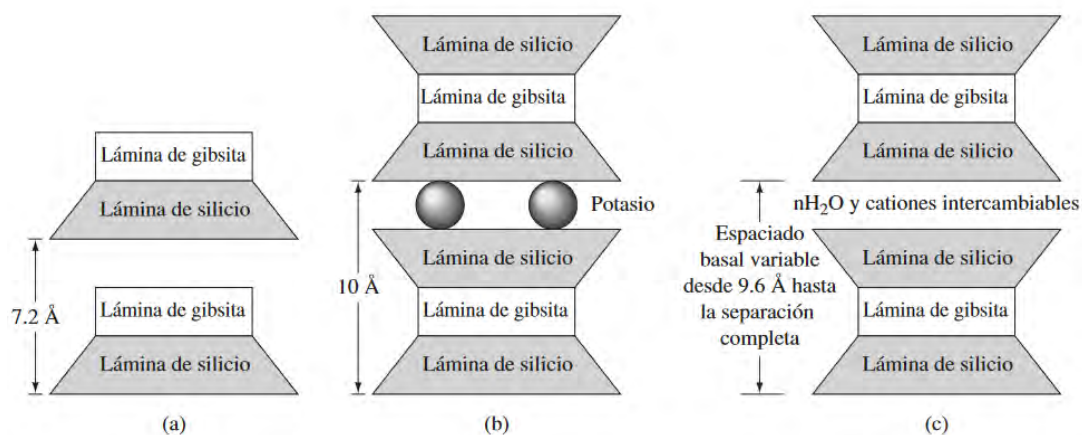


Figura 1. Estructuras de (a) caolinita; (b) ilita; (c) montmorillonita.

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica (Das, 2015).

2.2. Reconocimiento de arcillas expansivas

En primer lugar, las arcillas expansivas se identifican en campo debido a que suele presentar fisuras, lados en rodajas o roturas debido al hinchamiento y contracción a causa de los cambios en el contenido de humedad (Alva, 1988). De acuerdo a la norma E.050 de Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018), cuando un suelo tiene bajo grado de saturación y alta plasticidad ($LL \geq 50$), se deben realizar el ensayo de determinación de plasticidad del suelo según NTP 339.129 y el ensayos granulométrico por sedimentación según NTP 339.128 para clasificar el Cambio de Potencial de Volumen de acuerdo a la figura 2 a partir del porcentaje de partículas menores $2 \mu\text{m}$ ($\% < 2 \mu\text{m}$), el índice de plasticidad (IP) y la actividad (A) de la arcilla que se obtiene de dividir el IP entre $\% < 2 \mu\text{m}$.

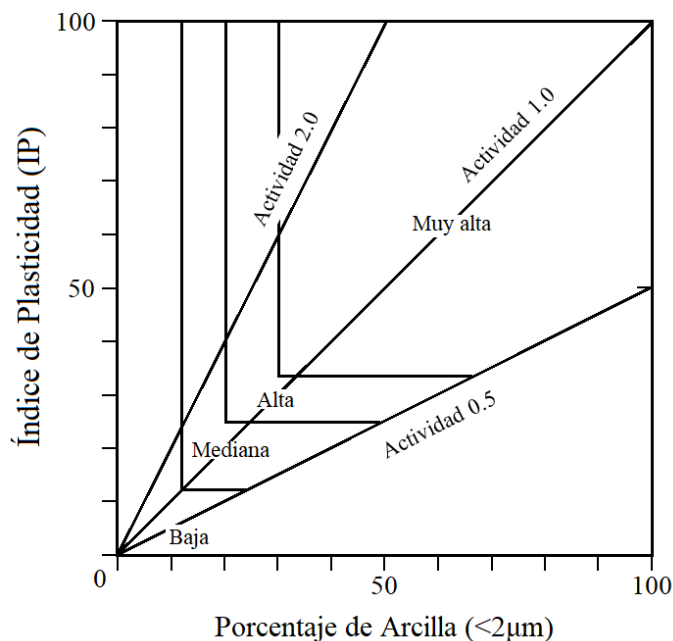


Figura 2. Clasificación de Cambio de Potencial de Volumen

Fuente: Norma E.050 Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018)

En base a la gráfica 2, los suelos expansivos se clasifican en baja, mediana, alta y muy alta. Adicionalmente, se realiza el ensayo de Determinación de Hinchamiento Unidimensional de suelos expansivos según NTP 339.170 que, junto al índice de plasticidad (IP) y el porcentaje de partículas menores 2 µm ($\% < 2 \mu\text{m}$), permite clasificar el potencial de expansión de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de suelos expansivos

| Potencial de expansión | Expansión en consolidómetro, bajo presión vertical de 7kPa | Índice de plasticidad | Porcentaje de partículas menores que dos micras |
|------------------------|--|-----------------------|---|
| EP | | | |
| % | % | % | % |
| Muy alto | > 30 | >32 | >37 |
| Alto | 20-30 | 23-45 | 18-37 |
| Medio | 10-20 | 12-34 | 12-27 |
| Bajo | <10 | <20 | <17 |

Fuente: Norma E.050 Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018)

Adicionalmente, existen tres métodos para la identificación de suelos expansivos, estos son la identificación mineralógica, medición indirecta y directa (Chen, 1975).

2.2.1. Identificación mineralógica.

Chindris (2017) menciona que algunos indicadores de la presencia de suelos expansivos incluyen grietas en las cimentaciones, levantamiento y agrietamiento en paredes, atasco de puertas y ventanas, rotura de tuberías y, en caso de carreteras, la presencia de levantamiento y grietas. Además, como se mencionó anteriormente, la composición mineralógica influye en el potencial de hinchamiento, por ello, los minerales presentes permiten explorar las propiedades básicas de las arcillas, aunque estos suelen ser complejos y caros (Chen, 1975). Entre los métodos más utilizados están:

2.2.1.1. Difracción de rayos X.

Este método, que determina la proporción de varios minerales presentes en las arcillas coloidales, consiste en la comparación de los ratios de intensidad de las líneas de difracción de los diferentes minerales con las intensidades de las líneas de sustancia estándar (Chen, 1975). Aplicando una considerable circunspección en este método, se pueden obtener resultados muy optimistas (Chen, 1975).

2.2.1.2 Análisis térmico diferencial.

Al emplearse en conjunto con la difracción de rayos X y el análisis químico, se pueden identificar materiales de forma sencilla en comparación con otros métodos (Chen, 1975). Esta técnica permite controlar los materiales que sufren cambios característicos de calor, sin embargo, su uso en solitario para identificar suelos expansivos no es siempre acertado (Chen, 1975).

2.2.1.3. Adsorción de colorantes.

Consiste en la identificación de arcillas al estas adsorber colorantes y reactivos, y presentar un color particular. Cuando una arcilla es pretratada por ácido, su color varía por su adsorción y la capacidad de intercambio de bases de los minerales de arcilla presentes (Chen, 1975). Esta técnica es ampliamente empleada al ser más sencilla y rápida que las mencionadas anteriormente (Chen, 1975).

2.2.1.4. Análisis químico.

Es una técnica usada como complemento de otros métodos para la identificación de arcillas. Respecto al grupo de montmorillonita de minerales arcillosos, este método puede determinar la naturaleza de su isomorfismo y mostrar el origen y localización de la carga en la celosía, siendo esta técnica la única que pueda identificar este isomorfismo (Chen, 1975).

2.2.1.5. Resolución del microscopio electrónico.

Dos arcillas pueden dar el mismo patrón de rayos X y la misma curva térmica diferencial, sin embargo, bajo la resolución de un microscopio electrónico se puede distinguir las características morfológicas distintivas de las arcillas (Chen, 1975). El principal objetivo de esta técnica es el de determinar la composición mineralógica, textura y estructura interna del material.

2.2.2. Métodos indirectos.

Este grupo incluye las propiedades índice, el método de cambio potencial de volumen (PVC) y el método de actividad, todos estos permiten evaluar la capacidad de hinchamiento del suelo. La cualidad principal de estos métodos es que no se pueden utilizar de forma independiente, por lo que deben ser complementados con métodos directos (Chen, 1975).

Ordoñez et al (2015) mencionan los métodos indirectos utilizados en la identificación de suelos expansivos, estos indican el potencial de expansión de las arcillas, ya sea bajo, medio, alto o muy alto.

2.2.2.1. Criterio de Dakshanamurthy y Raman (1973).

Este método identifica las arcillas expansivas en base a los límites líquido, índice de plasticidad, en base a estos valores se puede determinar el potencial de expansión: sin potencial, bajo, medio, alto, muy alto y extra alto como se observa en la figura 3.

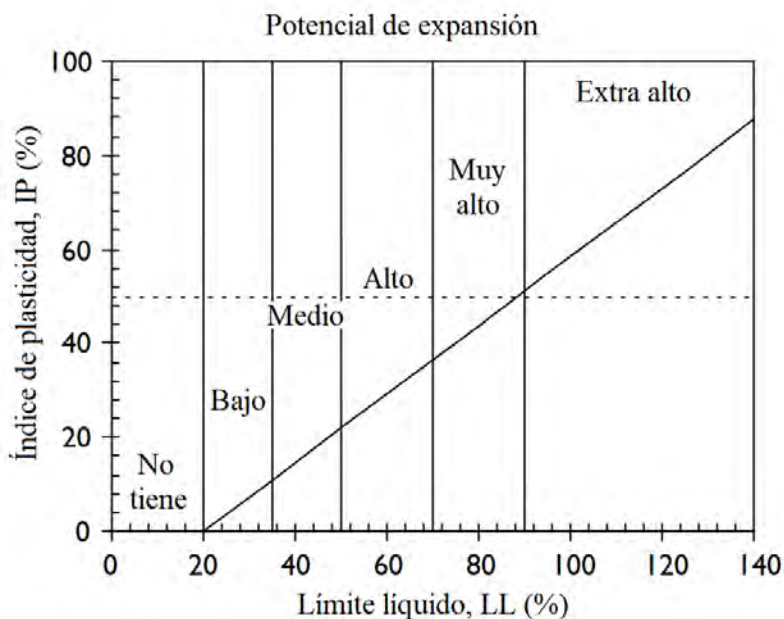


Figura 3. Cuadro de potencial expansivo del suelo

Fuente: Dakshanamurthy y Raman (1973)

2.2.2.2. Criterio de Seed, Woodward y Lungren (1962).

Este método se basa en la “actividad” de la arcilla. Para suelos naturales, esta actividad de las arcillas y el potencial de expansión se determinan a partir del índice de plasticidad (IP) y el porcentaje (C) de partículas arcillosas menores a 2 μ . Para calcular los valores de actividad (A) y el potencial de expansión (E) se determinan con las siguientes expresiones:

$$A (\%) = \frac{IP}{C - 5}$$

$$E (\%) = (3.6) * (10^{-5}) * (A^{2.44}) * (C^{3.44})$$

Donde:

A: actividad de la arcilla (%)

IP: índice de plasticidad (%)

C: partículas de arcilla menores a 2 μ (%)

E: potencial de expansión (%)

Finalmente, a partir del porcentaje de arcilla menores a 2 μ , el porcentaje de actividad y el potencial de expansión se ubica en la figura 4 y se define si el suelo tiene un potencial bajo, medio, alto o muy alto.

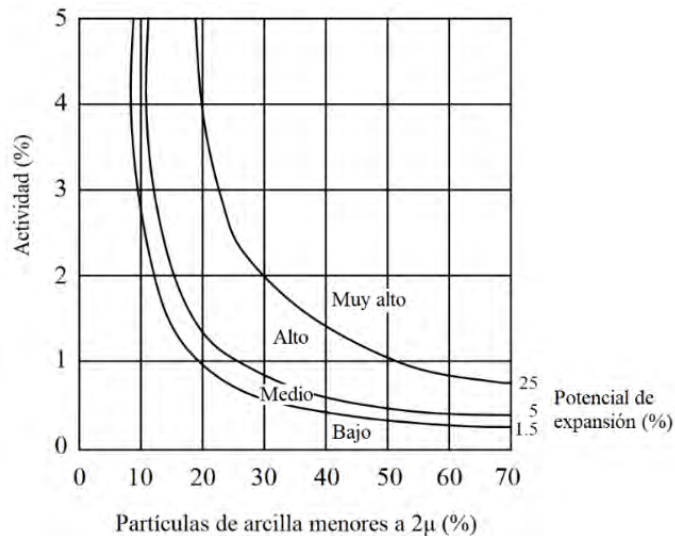


Figura 4. Clasificación de potencial de expansión

Fuente: Seed et al., 1962

2.2.2.3. Criterio de Merwe (1964 y 1975).

Este método se basa en la actividad de las partículas sólidas, el índice de plasticidad (%) y el porcentaje de partículas menores a $2\ \mu$. Este criterio define el suelo con potencial bajo, medio, alto o muy alto como se observa en la figura 5.

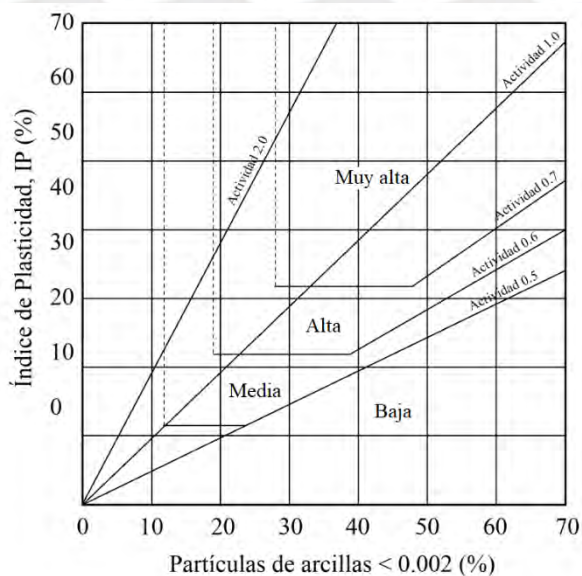


Figura 5. Gráfica de expansividad modificada Merwe

Fuente: Merwe (1964, 1975)

2.2.2.4. Método de Weston (1980).

Este método se centró en correlacionar la expansión y otros parámetros que influyen en la expansión de las arcillas, siendo además este el método más preciso al momento de identificar el potencial de expansión de la muestra. Para la expansividad (E) se determina con la siguiente expresión:

$$E (\%) = (0.000411) * (\omega_{L\omega})^{4.17} * (p)^{-0.386} * (\omega_i)^{-2.33}$$

$$\omega_{L\omega} = (\omega_L) * (\% < \text{malla } \#40)$$

Donde:

$\omega_{L\omega}$: límite ponderado (%)

p : carga o presión vertical (kPa)

ω_i : contenido de agua inicial (%)

E: expansión unitaria (%)

Este criterio, al igual que el criterio de Merwe, define el suelo con potencial bajo, medio, alto o muy alto como se presentó en la figura 5.

2.2.2. Métodos directos.

Este último método permite conocer más las características mecánicas del suelo, muy importantes al momento de diseñar los cimientos de una edificación. Estos ensayos son más prácticos comparados a los métodos indirectos, pero necesitan una precisión más alta al elegir el número de ensayos a realizar (Chen, 1975).

Ordoñez et al (2015) mencionan los métodos directos utilizados en la identificación de suelos expansivos, estos deben realizarse respetando las condiciones de carga y sobrecarga para simular los esfuerzos y deformaciones en condiciones naturales. Algunos de los ensayos directos incluyen el de consolidación-expansión, el de consolidación para diferentes contenidos de agua y el de doble en el consolidómetro.

Adicionalmente, para la identificación de arcillas expansivas se clasifica en base al porcentaje de contenido de arcilla, límites de contracción (tanto volumétricos como lineales), índice de plasticidad, límite de líquido, e índice de contracción (Muntohar, 2006). La clasificación que muestra el grado de expansión y de acuerdo a diversos autores se observa en la tabla 4.

Tabla 4. Clasificaciones por grado de expansión (potencial de hinchamiento)

| Grado de expansión | Chen (1983) | Seed et al. (1962) | Daksanamurthy and Raman (1973) | USBR (Holtz and Gibbs, 1956) |
|---------------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Muy alto | LL>60 | IP>35 | LL>70 | CC>28 |
| Alto | 40 <LL ≤60 | 20 <IP ≤35 | 50 <LL ≤70 | 20 <CC ≤31 |
| Medio | 30 ≤LL ≤40 | 10 ≤IP ≤20 | 35 <LL ≤50 | 13 ≤CC ≤23 |
| Bajo | LL<30 | IP<10 | 20 ≤LL ≤35 | CC <13 |

LL: límite líquido

IP: índice de plasticidad

CC: Contenido coloidal

Fuente: Traducido de Suelos expansivos (Al-Rawas y Goosen, 2006).

Finalmente, de acuerdo a W. G. Holtz, para identificar arcillas expansivas y el grado de expansión se basa en el contenido coloidal (porcentaje de partículas menores que 0.001 mm), el índice de plasticidad y el límite de contracción (Juárez y Rico, 1974).

Tabla 5. Datos para estimar el cambio volumétrico probable en materiales expansivos

| Datos de pruebas de identificación | | | Expansión probable. | Grado de expansión |
|---|-----------------------|-----------------------|--|---------------------------|
| Contenido coloidal (%<0.001 mm) | Índice de plasticidad | Límite de contracción | Cambio volumétrico en % (seco a saturado) | |
| >28 | >35 | <11 | >30 | Muy alto |
| 28-31 | 25-41 | 7-12 | 20-30 | Alto |
| 13-23 | 15-28 | 10-16 | 10-20 | Medio |
| <15 | <18 | >15 | <10 | Bajo |

Fuente: Mecánica de suelos (Juárez y Rico, 1974)

2.3. Riesgos debido a la presencia de arcillas expansivas

La Sociedad Americana de Ingenieros Civiles estima que una de cada cuatro casas tiene algún daño causado por los suelos expansivos (Jones y Jefferson, 2012). Además, se calcula que, en un año normal, los suelos expansivos causan más pérdidas económicas a los propietarios que los terremotos, las inundaciones, los huracanes y los tornados juntos (como se citó en Jones y Jefferson, 2012).

Debido al comportamiento de las arcillas expansivas, la presencia de agua es un factor importante en los riesgos que se pueden presentar. La variación de la cantidad de agua como en caso de cambios climáticos, aprovisionamiento por riego o fuga de una tubería pueden producir expansiones y compresiones que afectan cimentaciones superficiales (Juárez y Rico, 1974).

Esta situación se puede dar solo por la construcción de una estructura, sin tener en cuenta el efecto del nivel freático. Es decir, si se construye en una zona con suelo arcilloso donde la evaporación ha sido prolongada, la estructura va a suprimir dicho efecto y luego de un periodo de tiempo, el agua que ya no se evapora hará que disminuyan las presiones efectivas, el suelo se expanda y por ende el levantamiento de la estructura que varía dependiendo de la ubicación, ya sea en la zona central o periférica (Juárez y Rico, 1974).

2.4. Mitigación de riesgos

Los métodos más usados para mitigar el efecto de los suelos arcillosos son el reemplazo de una capa con suelo granular, colocación de tuberías para filtrar el agua, mejoramiento o estabilización del suelo, elementos estructurales flexibles para mitigar el efecto de la expansión o cimentaciones profundas (Juárez y Rico, 1974). En el caso de mejoramiento de suelo, este puede ser estabilización mecánica y/o química como el uso de ligantes minerales (Chindris, 2017). La idea de mejorar el suelo y por ende su capacidad de carga es mitigar los posibles riesgos debido a la presencia de arcillas expansivas. Esto se debe a que está la posibilidad de tener construcciones en mantos superficiales y a su vez presente una evaporación con periodos prolongados que producen una arcilla parcialmente saturada que al disminuir su volumen daña a la estructura (Juárez y Rico, II).

2.4.1. Reemplazo de suelo.

De acuerdo a la norma E.050 de Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018), debido a los daños que se presentan en las estructuras, solo se permite cimentar directamente sobre suelos expansivos si estos presenten un bajo potencial de expansión. Las alternativas planteadas son dejar un espacio libre para limitar el efecto de la expansión sobre la estructura o reemplazar el suelo. Este último, de acuerdo a la norma, cuando se tienen suelos medianamente expansivos y poco profundos se puede considerar retirar el suelo para reemplazarlo con rellenos controlados compactados previamente a la construcción. Estos rellenos se constituyen con material seleccionado, los métodos empleados en su conformación, compactación y control deben cumplir con las características de acuerdo al artículo 25 de la norma E0.50 de Suelos y Cimentaciones indicadas en la tabla 6 y se basan en las propiedades físicas del material (MVCS, 2018).

Tabla 6. Métodos de conformación, compactación y control del relleno controlado

| MÉTODOS | CARACTERÍSTICA | ESPECIFICACIÓN |
|---------------------------|-------------------------------|---|
| CONFORMACIÓN | Material seleccionado | Suelo compactable y sin elemento distintos de los suelos naturales con las siguientes características físicas: <ul style="list-style-type: none"> ▪ partículas ≤ 7.5 cm (3") ▪ material retenido en la malla $\frac{3}{4}$" $\leq 30\%$ ▪ material retenido en la malla 200 $< 50\%$ ▪ IP ≥ 6 |
| | COMPACTACIÓN | Se compacta a una densidad $\geq 90\%$ de la máxima densidad seca del método de ensayo Proctor modificado según NTP 339.141, en todo su espesor. |
| | Para $> 12\%$ de finos | |
| | Para $\leq 12\%$ de finos | Se compacta a una densidad $> 95\%$ de la máxima densidad seca del método de ensayo Proctor modificado según NTP 339.141, en todo su espesor. |
| CONTROLES DE COMPACTACIÓN | Área > 25 m ² | 3 controles por capa y cada 250 m ² o fracción y espesor máximo a controlar es de 0,30 m de espesor. |
| | Área ≤ 25 m ² | 1 control como mínimo y espesor máximo a controlar es de 0,30 m de espesor. |

Fuente: adaptado de la Norma E.050 Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018)

El segundo método importante a la hora de mitigar los daños a causa de las arcillas expansivas es la estabilización química, este método utiliza principalmente la cal y el cemento Portland como aditivos.

2.4.2. Estabilización química.

Este método usa aditivos químicos para mejorar propiedades como reducir la plasticidad la dilatación y el potencial de contracción (Das, 2015). Siendo la cal y el cemento Portland los más utilizados para este proceso.

2.4.2.1. Estabilización con cal.

La cal es el aditivo más utilizado para la estabilización de suelos, esta puede ser utilizada como cal viva CaO , cal hidratada Ca(OH) o lechada cuya selección se da de acuerdo a las características del suelo y a las propiedades específicas que se espera mejorar. Rivera et al. (2020) afirman que la cal viva presenta una reacción exotérmica en presencia de agua que permite disminuir el contenido de humedad del suelo. Por otro lado, la cal hidratada es utilizada para mejorar la capacidad portante de los suelos arcillosos con índice de plasticidad mayor a 20 (Beckham y Hopkins, 1997). Finalmente, la lechada es una alternativa eco amigable, pero requiere de mayor costo y tiempo, y no puede ser utilizada en suelos saturados (LIME, 2004).

2.4.2.2. Estabilización con cemento Portland.

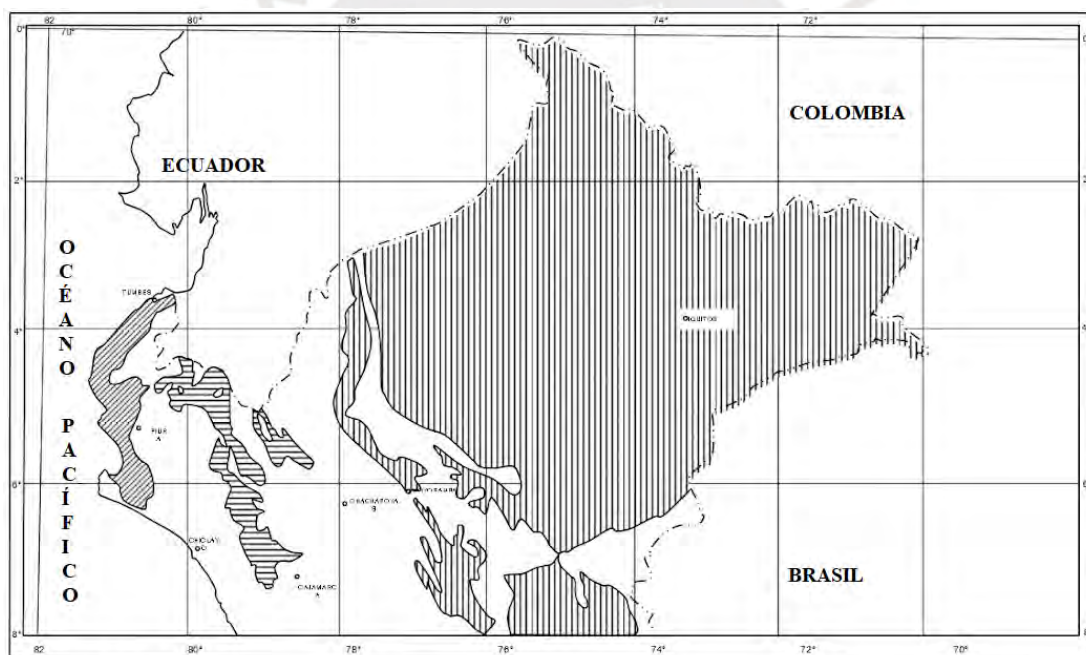
El cemento Portland es utilizado ya que su incorporación permite tener un suelo-cemento con mayor resistencia que el suelo natural, en este proceso es necesario realizar compactación y curado luego de la mezcla (MTC, 2014). Además, este tipo de aditivo logra mejorar las propiedades del suelo en un menor tiempo que al utilizar la cal como estabilizante (Firoozi et al., 2017).

Además, de acuerdo a estudios recientes se sugiere la utilización de otros aditivos químicos como desechos agrícolas, fibras naturales, residuos plásticos o nanopartículas. Sin embargo, a pesar de que estos materiales disminuyan los costos y que reduzcan el impacto ambiental, aún es necesario evaluarlos y llevarlos a cabo para ver si estos pueden o no contribuir a largo plazo a la mejora del comportamiento de las arcillas expansivas. Finalmente, en general los métodos para abordar los problemas causados por la presencia de suelos expansivos son diversos y toman

como base los avances técnicos, marco legal y la normativa del país, pólizas de seguro y experiencia de los especialistas (Jones y Jefferson, 2012).

2.5. Situación en el Perú

Respecto a la presencia en el Perú de arcillas expansivas, Juan Rojas y Jorge Alva (1988), presentaron una investigación de la presencia de arcillas y lutitas expansivas en el norte y nororiente peruano. Ellos afirman que la costa norte del país se han presentado el mayor número de casos de suelo expansivos, además de que el primer reconocimiento de problemas con suelos expansivos en el Perú se dio durante la construcción del Canal Quiroz en la década de 1950, en la región de Piura (Rojas J. y Alva J., 1988). Para complementar la identificación de suelos arcillosos expansivos, se muestra un mapa de zonificación en la región más afectada por estas arcillas.



LEYENDA

- Zona de características geológicas y climáticas favorables a la presencia de suelos expansivos. Se ha comprobado su existencia en esta zona
- Zona de características geológicas y climáticas que hacen posible la ocurrencia de suelos expansivos en determinados lugares. Se ha comprobado su existencia en el Ecuador
- Zona con geología favorable y clima desfavorable para la ocurrencia de suelos expansivos. Se necesita mayor información

Figura 6. Mapa de zonificación de suelos expansivos en el norte y nororiente del Perú.

Fuente: Arcillas y lutitas expansivas en el Norte y Nororiente Peruano (Rojas J. y Alva J., 1988).

En el mapa de la figura 6 se observa la presencia abundante de suelos expansivos tanto en la costa del norte del Perú como en la selva norte, siendo regiones como las de Loreto, Piura y Tumbes las más afectadas del país, seguidas por las regiones de Cajamarca y el Amazonas en presencia de estos suelos. De esta forma, la investigación se desarrollará preferiblemente en estas zonas para el Capítulo 3.



CAPÍTULO 3: CASOS DE INVESTIGACIÓN DE ARCILLAS EXPANSIVAS EN OBRAS EN EL PERÚ

Respecto a investigaciones que se hayan realizado sobre edificaciones, carreteras, habilitaciones urbanas u otra construcción cuya problemática sea la presencia de arcillas expansivas en el terreno, existen varios casos en el país donde se tomaron medidas de mitigación por parte de las autoridades y también casos donde se plantearon soluciones para estabilizar las arcillas mediante el empleo de variados métodos. Los primeros cuatro casos se ubican dentro del mapa de Juan Rojas y Jorge Alva en el norte del país, mientras los dos últimos se ubican más al centro del Perú como se indican en la figura 4.



Figura 7. Ubicación de los casos analizados

Fuente: Google earth (2021)

3.1. Asentamiento humano “Señor de los Milagros”

3.1.1. Descripción.

El primer caso de investigación de suelos arcillosos expansivos en el Perú se desarrolla en las calles del asentamiento humano Señor de los Milagros del Distrito de Chachapoyas en la región del Amazonas. En este asentamiento se detectó un gran margen de arcillas expansivas, situación la cual, acompañada por las abundantes lluvias en esta región, llegan a producir fuertes problemas de cimentación en las estructuras del asentamiento humano (Cercado L. y Zavaleta J., 2018).

Respecto a las características geológicas del terreno donde se encuentra el asentamiento humano en el departamento del Amazonas, estas se conforman por:

... Una secuencia de rocas metamórficas (esquistos, gneis, metasedimentitas) datadas del proterozoico que han sido agrupadas en la unidad litoestratigráfica, conocida como Complejo Marañón y que han formado después de un intenso metamorfismo regional de rocas pelíticas y samíticas anteriores, por encima de esta litofacies encontramos una secuencia de rocas feldespáticas con horizontes de piroclásticos rojizos conocidos como Grupo Mitu, sus afloramientos tienen un color rojizo muy resaltante, y se extienden en el valle de Utcubamba entre Tialango y puente Corontachaca.

Debido a los procesos naturales referidos se ha ido modelando una gran variedad de formas en el relieve terrestre, identificando tres unidades morfoestructurales relevantes: Las Cordilleras Interandina, Oriental y Subandina; todas ellas integrantes de la gran Cordillera de los Andes. Estas presentan una gran variedad de depósitos ígneos (intrusivos y volcánicos), sedimentarios y metamórficos, confirmando la complejidad de la ocurrencia de procesos geológicos que se manifestaron desde el Precámbrico (600 a 1000 ma) hasta la actualidad. La diversidad de materiales condicionó el accionar de las diversas fuerzas tectónicas y a las acciones intemperitas y erosivas, conformando de esta manera relieves contrastantes como montañas de altitudes imponentes, mesetas, sistemas de colinas estructurales, planicies de origen estructural y aluvial; y valles encajonados y abiertos (Cercado L. y Zavaleta J., 2018).

3.1.2. Medidas de Mitigación.

Para lidiar con la problemática de los suelos con arcillas expansivas, Lenin Cercado y Javier Zavaleta (2018) elaboraron un plan de mitigación consistente en la construcción de las cimentaciones de las estructuras por debajo de la capa activa del suelo arcilloso expansivo, también, se propuso darle una mejora al terreno en el que se construirá la edificación o habilitación urbana, la realización obligatoria de cimentaciones con losas armadas y el cambio del material del terreno por un material granular. Como medidas adicionales, se planteó estabilizar los terrenos de arcillas expansivas con cal y/o cemento, habiendo elaborado previamente un estudio sobre cómo estos materiales se comportarían al entrar en contacto con las arcillas expansivas (Cercado L. y Zavaleta J., 2018). Con respecto a la estabilización de los taludes para la construcción de cualquier edificación en este asentamiento humano, se tendrá que realizar una muy leve inclinación con el fin de manejar mejor el terreno, de esta forma solo se tendría en cuenta la topografía y el clima de la zona para manejar el talud; por otro lado, se podrían emplear mantos de roca, gaviones y geo-celdas para la estabilización de los taludes (Cercado L. y Zavaleta J., 2018).

3.2. Avenida Dinamarca, Sector La Molina

3.2.1. Descripción.

El segundo caso de investigación de suelos arcillosos expansivos en el Perú a mostrar se desarrolla en la avenida Dinamarca del sector La Molina en el distrito de los Baños del Inca de la ciudad de Cajamarca en el departamento de Cajamarca. En el distrito se encontró que los suelos predominantes en la zona eran de “naturaleza sedimentaria y depósitos de origen aluvial compuestos de limos y arcillas, que presentan baja capacidad de soporte” (Velásquez C., 2018).

3.2.2. Medidas de Mitigación.

Debido a los problemas ocasionados por las arcillas expansivas en los suelos que conforman las subrasantes, tales como el daño a las estructuras de los pavimentos sobre esta zona, se realizaron múltiples medidas para realizar el mejoramiento de los suelos tanto en su calidad como en su estabilización.

Respecto a las medidas tomadas por la región para la estabilización de los suelos, estos fueron:

... Un tipo de estabilización común es mediante el empleo de cemento Portland como aditivo estabilizador. La estabilización de suelos con cemento se ha aplicado en distintas partes del mundo y desde hace buen tiempo atrás. En la actualidad, se cuenta con equipos estabilizadores – recicladores adecuados de gran potencia y rendimiento, distribuidores y dosificadores de cemento que facilitan el trabajo en campo y garantizan la calidad de mezclado y colocación.

En la ciudad de Cajamarca, la estabilización de suelos con cemento se encuentra poco difundida, generalmente se opta por otras opciones de mejoramiento de los suelos de baja calidad que conforman las subrasantes, tales como el reemplazo del suelo o el uso de productos geosintéticos. Finalmente, sería importante evaluar las ventajas técnicas de estabilización de suelos con cemento para poder aplicarlo en nuestro medio, y así se logre mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de baja calidad (Velásquez C., 2018).

3.3. Carretera Chiclayo-Chota km 133.4

3.3.1. Descripción.

El tercer caso de investigación de presencia de arcillas expansivas en los suelos se da en Chota en el departamento de Cajamarca, específicamente en la sub rasante de una carretera no pavimentada que cubre la ruta Chiclayo-Chota en el km 133.4, la cual posee un suelo de arcilla de baja resistencia en el caserío de Callapampa a 2100 m.s.n.m. (Ormeño E. y Rivas N., 2020). Entre los distintos métodos de estabilización de los suelos con arcillas expansivas, los métodos químicos son los más empleados ya que son de menor costo en comparación de los métodos físicos o mecánicos, como la sustitución de suelos o mediante la colocación de geosintéticos. El suelo presente en la carretera se compone principalmente de arcillas de baja plasticidad.

3.3.2. Medidas de Mitigación.

Los ingenieros civiles Eduardo Ormeño y Neptalí Rivas (2020) propusieron la estabilización del suelo con arcillas expansivas del trecho de la carretera al combinarlas con cenizas de cáscara de arroz (RHA), las cuales contienen un alto porcentaje de sílice que genera un material con mayor resistencia y menor deformación al combinarse con las arcillas. Por otro lado, las cenizas de cáscara de arroz son un material no biodegradable, el cuál puede llegar a considerarse como una fuente de contaminación en la zona donde se producen al no descomponerse la cáscara de arroz en un tiempo corto al ser eliminadas para producir el arroz. Por este motivo encontrarles un uso en lugar de terminar por un largo tiempo en un botadero, generaría un beneficio con el medio ambiente.

Basándose en resultados de ensayos Proctor modificado, la adición de ceniza de cáscara de arroz mejoró el valor óptimo de humedad del suelo, además de disminuir la densidad seca máxima, lo que indica una mejor calidad de suelo al necesitar de menor energía al ser compactado (Ormeño E. y Rivas N., 2020). Respecto a resultados de ensayos CBR, se obtuvo un incremento de este valor hasta en 5.5 veces cuando las arcillas expansivas se combinan con la cáscara de arroz, lo que permitiría que se pueda emplear con normalidad una carretera pavimentada, con lo cual, la carpeta asfáltica tendría que ser de menor espesor (Ormeño E. y Rivas N., 2020).

3.4. Calles del Sector B en Paita Baja

3.4.1. Descripción.

El cuarto caso de investigación presentado de construcciones con problemática de arcillas expansivas se encuentra en el área central de la ciudad de Paita en el departamento de Piura, específicamente en el Sector B de Paita Baja compuesto de los asentamientos humanos de Alan García, La Merced, Manuelita Saenz, San Martín Central, San Martín Occidente, San Martín Oriente, San Pedro y Trece de Julio. En la zona se presentaron problemas en las estructuras de las casas construidas, además de detectarse suelos con “amplificación de ondas sísmica, presencia de arcillas expansivas, probabilidad de derrumbes y desplomes, taludes inestables, inundación y formación de lagunas por acción pluvial” (Instituto Nacional de Desarrollo Urbano, 2000). Puesto que el estudio que realizó el entonces el Instituto Nacional de Desarrollo Urbano (INADUR) y el Proyecto CEREN-PNUD PER 98/018 “Apoyo al CEREN” detectó que

estas problemáticas afectaban a cerca de 18 646 habitantes para el año 2000, se requirió que las autoridades realizarán las acciones que propusieron estas asociaciones.

3.4.2. Medidas de Mitigación.

Tabla 7. Medidas de mitigación de suelos con arcillas expansiva para el sector B: Paita Baja, propuestas por el Instituto Nacional de Desarrollo Urbano (INADUR)

| PERIODO | META | INTERVENCIONES |
|----------------------------|--|---|
| Corto Plazo (2002) | Implementación de acciones e intervenciones prioritarias que reduzcan el nivel de riesgo del sector. | Estudio definitivo de drenaje integral para evacuación de aguas pluviales. |
| | | Construcción de canal de desviación de drenaje. |
| | | Limpieza y mantenimiento de la infraestructura de drenaje existente (A.H. 13 de Julio). |
| | | Construcción de estructuras de sostenimiento en parte baja de los taludes para evitar posibles deslizamientos. |
| | | Evaluación de las estructuras de las viviendas afectadas por problemas de asentamiento diferencial y suelos expansivos. |
| | | Campaña de Difusión sobre técnicas constructivas adecuadas para el reforzamiento de las viviendas. |
| Mediano Plazo (2007) | Implementación de acciones e intervenciones que mejoren las condiciones de habitabilidad y consoliden la seguridad del sector. | Evaluación Técnica de la estructura de los colegios existentes. |
| | | Reubicación del comercio ambulatorio ubicado en el área contigua al Mercado. |
| | | Ejecución de obras de drenaje determinadas por el Estudio. Evaluación de alternativas de reubicación del equipamiento crítico existente. |
| Largo Plazo (2012) | Preservar las condiciones físicas para alcanzar los objetivos del plan. | Mantenimiento de la infraestructura de defensa y control adecuado para el cumplimiento del plan de "Usos del suelo". |

Fuente: Mapa de Peligros, Plan de usos del suelo y Plan de Mitigación de los efectos producidos por los desastres naturales en la ciudad de Paita (Instituto Nacional de Desarrollo Urbano, 2000).

3.5. Localidad de Villa Rica

3.5.1. Descripción.

El quinto caso de investigación presentado de construcciones con problemática de arcillas expansivas se encuentra en la vía terrestre Villa Rica-Oconal-Alto Cedropampa en la localidad de Villa Rica, Provincia de Oxapampa en el departamento de Pasco. El suelo proveniente de la zona de investigación, específicamente en la progresiva 3+000 km de la carretera Oconal Cedropampa se compone principalmente de arcillas expansivas y limos, además, sus vías principales han sufrido daños ante la ausencia de una estabilización adecuada de los suelos, sumado a las inadecuadas condiciones de diseño o las tomadas de acuerdo a normativas de otros países que se diferencian de la realidad en partes de la selva peruana, es requerible que se apliquen medidas para mitigar los efectos de las arcillas expansivas tanto en el suelo como en el diseño de las estructuras que se construirán sobre estos (Moale A. y Rivera E., 2019).

Dentro de una investigación se encontró que las propiedades físicas del suelo “gravedad específica 2.63, porcentaje de grava 8.43%, porcentaje de arena 23.15% y cantidad de finos 68.42% e índice de plasticidad de 13%”, por otro lado, se determinó que el suelo presentaba arcillas de bajas plasticidad, siendo el terreno considerado entre regular y malo para su uso en obras viales (Moale A. y Rivera E., 2019). Dentro de la misma investigación se estableció la problemática general como las problemáticas específicas, las cuáles se mostrarán en la tabla 8.

Tabla 8. Problemáticas establecidas en el suelo de la localidad de Villa Rica.

| | |
|------------------------------|--|
| PROBLEMA GENERAL | Baja capacidad de soporte de los suelos de la localidad de Villa Rica para ser usados como capa subrasante en vías terrestres. |
| | Existencia de suelos finos, limos y arcillas. |
| PROBLEMAS ESPECÍFICOS | Falta de drenaje pluvial en vías afirmadas. |
| | Inadecuada estabilización de suelos. |
| | Escasa fricción entre partículas de suelos finos. |

Fuente: Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica (Moale A. y Rivera E., 2019).

3.5.2. Medidas de Mitigación.

Los ingenieros civiles Alexandra Moale y Ebdy Rivera (2019) plantearon el uso de uno de los métodos químicos para lograr la estabilización de este suelo, la combinación del suelo con alta presencia de arcillas expansivas con cal para que pueda funcionar como subrasante en las vías terrestres de la localidad de Villa Rica. A continuación, se presenta la tabla 9 con los distintos tipos de cal que se pueden emplear, además de sus ventajas y desventajas.

Tabla 9. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de Cal.

| MATERIAL | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|------------------------------|---|--|
| CAL HIDRATADA EN POLVO | <ul style="list-style-type: none"> - Puede ser aplicada más rápidamente que la lechada. - La cal hidratada en polvo puede ser utilizada para secar arcillas, pero no es tan eficaz como la cal viva. | <ul style="list-style-type: none"> - Las partículas hidratadas de cal son finas, por lo que el polvo puede ser un problema. - Este tipo de uso generalmente es inadecuado en áreas pobladas. |
| CAL VIVA EN SECO | <ul style="list-style-type: none"> - Económica - Posee entre 20 y 24 % más de óxido de calcio disponible que la cal hidratada. - Tamaños de partículas más grandes, es excelente para secar suelos. | <ul style="list-style-type: none"> - Requiere 32% de su peso en agua para convertirse en cal hidratada y puede haber pérdida adicional debido al calor de hidratación. - Puede requerir mayor cantidad de mezcla. |
| LECHADA DE CAL | <ul style="list-style-type: none"> - Aplicación libre de polvo. - Es más fácil lograr la distribución. - Se aprovecha la aplicación por rociado. - Se requiere menos agua adicional para la mezcla final. | <ul style="list-style-type: none"> - Velocidad lenta de aplicación. - Costos más altos debido al equipo extra requerido. - Puede no ser práctico en suelos muy mojados. - No es práctico para secar. |

Fuente: Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica (Moale A. y Rivera E., 2019).

Con los ensayos realizados en el estudio se pudo determinar que el material que se debía utilizar para combinarse con las arcillas expansivas del suelo investigado sería la cal de cantera o cal viva en seco, puesto que este material proporciona un mayor porcentaje de CaO_2 y se

requeriría emplear una menor cantidad de cal para que se pueda incrementar considerablemente el CBR, lo que a su vez permitiría su uso para obras viales (Moale A. y Rivera E., 2019). Además, se recomienda un uso del 15% de cal para lograr la estabilización del suelo, incrementando en 5.9% el CBR, por otro lado, ya que este valor sigue por debajo del 6% establecido por el “Manual de carreteras de bajo volumen de tránsito” del MTC, no se podría construir pavimento sobre el suelo a menos que se le reemplace el material por uno granular con un CBR mayor al 10% y con un índice de plasticidad del mismo porcentaje (Moale A. y Rivera E., 2019).

3.6. Avenida Jacinto Ibarra

3.6.1. Descripción.

El sexto caso de investigación presentado de construcciones con problemática de arcillas expansivas se encuentra en la Avenida Jacinto Ibarra del distrito de Chilca, en la ciudad de Huancayo en el departamento de Junín. Se determinó que el suelo presente en esta avenida era principalmente compuesto de arcillas de baja plasticidad, lo que generaba al igual que en la Localidad de Villa Rica del caso anterior que el terreno sea considerado entre regular y malo para su uso en obras viales (Quispe W., 2020). El objetivo de la investigación fue el de encontrar una medida que permita reducir la deformabilidad, permeabilidad y sensibilidad al agua del suelo compuesto de arcillas expansivas, debido a la alta pluviosidad de la zona, buscando además reducir el impacto medioambiental que la medida pudiera generar, además de permitir la construcción de un asfaltado sobre la subrasante (Quispe W., 2020).

3.6.2. Medidas de Mitigación

El ingeniero civil Waldir Quispe (2020) consideró como medida de estabilización de las arcillas expansivas presentes en el suelo de la Avenida Jacinto Ibarra un método químico, que como se observó en las investigaciones anteriores, es de los métodos más empleados, específicamente el método de combinación con un material, siendo este el caso de la inclusión de cloruro de sodio, considerando que su adición podría apoyar a la subrasante, aumentando significativamente la resistencia del terreno y reduciendo en gran medida la plasticidad del suelo, lo que permitiría que normativamente pueda ser empleado para la construcción de vías terrestres de comunicación. Mediante una investigación, se comprobó que al emplear un porcentaje de cloruro de sodio de 12% sobre el terreno, se podría obtener un incremento de la

densidad máxima seca del 4% y de su contenido óptimo de la humedad del 8%, lo que a su vez generaba un valor del CBR de 12.5%, lo que daría como resultado una subrasante buena tipo S3 (Quispe W., 2020). El suelo al combinarse con cloruro de sodio llegó a aumentar su trabajabilidad y la velocidad con la que se compacta, lo que es beneficioso para los constructores a la hora de realizar un trabajo más efectivo y rápido.



CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se pudo conocer las características de las arcillas expansivas en base a la norma peruana y revisión de literatura de libros y artículos científicos relacionadas a estas arcillas, de dónde se pudo conocer los ensayos para determinarlas, los riesgos que estas pueden generar en los suelos que afecten a las construcciones sobre estos y las medidas que se pueden tomar para mitigar sus efectos. A partir de los objetivos específicos se tienen las siguientes conclusiones:

4.1. Conclusiones

- Las arcillas expansivas se pueden identificar en primer lugar con una inspección visual, ya que esta suele presentar grietas a causa de la expansión y contracción que varían dependiendo del contenido de humedad. Además, la norma E.050 de Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018) sugiere realizar el ensayo de determinación de plasticidad del suelo según NTP 339.129, el ensayo granulométrico por sedimentación según NTP 339 y el ensayo de Determinación de Hinchamiento Unidimensional de suelos expansivos según NTP 339.170. A partir de estos ensayos se determinan el nivel de potencial de expansión del suelo que puede ser bajo, medio, alto o muy alto.

La identificación de arcillas en laboratorio se divide en métodos indirectos y métodos directos. Los métodos indirectos necesitan una precisión muy alta ya que se basan en el límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y la actividad de las arcillas, a partir de expresiones matemáticas y gráficas se puede determinar el potencial de expansión de la arcilla. Por otro lado, los métodos directos tienden a ser más prácticos, pero necesitan mayor precisión en el número de ensayos a realizar.

- Los riesgos asociados a la presencia de arcillas expansivas se centran en daños de las estructuras que pueden significar elevados costos de reparación. Por ello, una vez identificado la presencia de arcillas y su potencial de expansión, se implementan medidas como el reemplazo del suelo arcilloso de acuerdo a las especificaciones del relleno de reemplazo que deben cumplir con lo indicado en la norma E.050 de Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018). Sin embargo, en caso que la capa de arcilla tenga una profundidad considerable, es necesario mejorar la capacidad portante del suelo. Este mejoramiento se realiza con aditivos químico, en el caso de los suelos expansivos, el Manual de Carreteras (MTC, 2014) sugiere el uso de cal y cemento Portland; sin

embargo, estudios recientes sugieren nuevos aditivos como desechos agrícolas, fibras naturales, residuos plásticos o nanopartículas que implican menores costos y reducción del impacto ambiental.

- En el Perú, se pudo identificar dónde se encuentran las arcillas expansivas mediante la investigación de Juan Rojas y Jorge Alva de 1988, de donde se extrajo un mapa del norte del Perú, zona con el mayor número de casos de presencia de suelos expansivos, con las zonas señaladas en el mapa con mayor y menor presencia e investigación de arcillas expansivas. Se pudo conocer también en el capítulo 3, cuatro casos sobre estas zonas resaltadas en el norte del país (en Chachapoyas, la ciudad de Cajamarca, Chota y Paita Baja) y dos casos en el centro del Perú (en Oxapampa y Huancayo), por lo que se denota que no solo en el norte del Perú hay presencia de arcillas expansivas.
- A partir de los casos analizados, entre los principales métodos de mitigación está la estabilización química con cal, cemento Portland, cloruro de sodio, cáscaras de arroz y productos geosintéticos, las alternativas menos utilizadas son el reemplazo de suelo, colocar drenaje pluvial, mantenimiento de infraestructura y tener un control para cumplir el plan “Usos de suelo”.

4.2. Recomendaciones

- Orientar a la población que, para mitigar los daños a causa de la presencia de arcillas expansivas, es necesario principalmente mejorar el material de la cimentación; es decir, tratar el suelo en caso de un potencial de expansión bajo y evitar construir en zonas con arcillas altamente expansivas.
- En el caso de Villa Rica se recomienda utilizar otro método, ya que la cal empleada como aditivo no logra mejorar de manera efectiva las propiedades portantes del suelo, aunque en esta se consideró solo la colocación de una trocha de bajo tránsito. Por ello, para fomentar el desarrollo de la localidad con alta producción de café, se debe buscar alternativas para mejorar mejor el suelo a largo plazo.
- Se recomienda estudiar nuevos aditivos como la utilización de fibras naturales, cenizas de cáscara de arroz, nanopartículas, entre otros para ser utilizados como agente estabilizante de arcillas expansivas, ya que estas pueden disminuir considerablemente los costos y el impacto ambiental que implica la fabricación y aplicación de cal y cemento Portland como estabilizante.

- Se deberían realizar más investigaciones respecto a la localización de arcillas expansivas en el Perú, puesto que la base de la información sobre esta problemática y el único mapa publicado es de una investigación de la década de 1980, además de que solo se encuentra centrado en la zona norte del país. Como se ha desarrollado en este informe, hubo dos casos de situaciones de suelos expansivos en Oxapampa y Huancayo, locaciones ubicadas en el centro del país, por lo que se debería expandir esta investigación para poder desarrollar un mapa completo del país con más zonas donde se encuentran estas arcillas, a fin de fomentar la investigación en las zonas más al sur del país sobre esta problemática.
- Se debería fomentar más la investigación sobre las arcillas expansivas a fin de poder agregar mayor información a la Norma E.050 de Suelos y Cimentaciones (MVCS, 2018), la cual posee poca información y fomenta básicamente los métodos físicos y mecánicos de compactación y reemplazo del suelo arcilloso por uno granular, lo cual da buenos resultados, pero genera elevados costos. En esta investigación se pudo observar el empleo de métodos químicos de combinación de las arcillas expansivas con materiales como cenizas de cáscara de arroz, la cual brinda una estabilización del suelo a un menor costo y con buena efectividad. Es por esto que el empleo de materiales similares y propios de las localidades que posean suelos expansivos que puedan generar una estabilización en los suelos, sería la solución a largo plazo más factible.

REFERENCIAS

- Alva, J. (1988). SUELOS EXPANSIVOS Y COLAPSABLES. Recuperado de Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Avellaneda Pau (2007). Movilidad, pobreza y exclusión social. Un estudio de caso en la ciudad de Lima (Tesis doctoral). Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Geografía, Madrid, España. Recuperado de <https://ddd.uab.cat/pub/tesis/2007/tdx-1005107-161727/pag1de1.pdf>
- Ávila Baray, H. L. (2006). Introducción a la metodología de la investigación. Chihuahua, México. Recuperado de <https://www.eumed.net/libros/2006c/203/>
- Baena Paz, G. M. E. (2014). Metodología de la Investigación, serie integral por competencias (1 ed.): Ciudad de México, México: Grupo Editorial Patria.
- Cercado Vásquez, L y Zavaleta Detquizán, J (2018). ANÁLISIS DEL GRADO DE EXPANSIBILIDAD DE SUELOS ARCILLOSOS EN LAS CALLES DEL ASENTAMIENTO HUMANO SEÑOR DE LOS MILAGROS DEL DISTRITO DE CHACHAPOYAS - AMAZONAS. (Tesis de pregrado inédita, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú). Recuperado de: <https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/4174>
- Chen, F. (1975). Foundations on expansive soils. Recuperado de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/57494323/_FU_HUA_CHEN_Eds._Foundations_on_Expansive_Soilb-ok.xyz-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1635743777&Signature=FVSkwzJrGQz2sM-gwt6bwsarjy-d3VSU9QGpPf4lQYXTQ6sM8xrjfPxBkrfo5zYUoH3V6iparH~4ljYJ291X0D0JO5IbgzMIbgBkowIPgx24AGtz-ce1hoX4bnzlpGdGFCxj~mKjMZv47j41Q7GViiotl8yYdDz0KhdFDbGYRm3BIGeBgy7IBXYKYTeEkOZCaoGYbdwzA6Asy30VAPjphizmYC~Iz0P6WS7RjVj46vBwcuBG2oICZ2SGhHdPLSF5Ktqn1Edf15AMR~UorFtPCNZwKSuhXtaMcfvksyETi0hF4xD8XGW9sA1Etpmo5Bvemf2qPxo770FhHwJ1Hg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

- Chindris, L., Stefanescu, D. P., Radermacher, L., Radeanu, C., y Popa, C. (2017). Expansive soil stabilization - General considerations. Recuperado de 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM), 17 (32), 247–256. Doi: 10.5593/sgem2017/32/S13.033
- Das, Braja M. (2015). Fundamentos de Ingeniería Geotecnia. Recuperado de <https://drive.google.com/drive/u/0/search?q=braja>
- DINAMARCA, SECTOR LA MOLINA. (Tesis de pregrado inédita, Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú). Recuperado de: <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/UNC/2534/INFORME%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Duncan, C. (1992). Soils and Foundations for Architects and Engineers. Texas, USA: Editorial Structural Engineering series.
- Firoozi, A.A., Olgun, C. G. y Firoozi, A.A. y Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. International Journal of Geo-Engineering, 8 (26). doi: 10.1186/s40703-017-0064-9
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (4 ed.). México: MacGraw Hill. Recuperado de <https://seminariodemetodologiadelainvestigacion.files.wordpress.com/2012/03/metodolog3ada-de-la-investigac3b3n-roberto-hernc3a1ndez-sampieri.pdf>
- Instituto Nacional de Desarrollo Urbano (2000). MAPA DE PELIGROS, PLAN DE USOS DEL SUELO Y PLAN DE MITIGACIÓN DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LOS DESASTRES NATURALES EN LA CIUDAD DE PAITA. Recuperado de Lima: Instituto Nacional de Defensa Civil.
- Jones L. y Jefferson I. (2012). Expansive Soils. Institution of Civil Engineers Manuals series, volumen(I).
- Juárez y Rico, (1974). Teoría y Aplicación de la Mecánica de Suelos. México D.F., México: Editorial Limusa.

LIME-National Lime Association. (2021, 20 de mayo). Home. Publications. Soil Stabilization. Manual De Estabilización de Suelo Tratado con Cal: Estabilizacion y Modificacion con Cal. Recuperado de: https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma técnica E.050 de Suelos y Cimentaciones. Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/1gErbG314ZVEAD73uS3Wn8GfQ4Mn7XUdP/view>

Mitchell, J. y Soga, K. (2005). Fundamentals os Soil Behavior. New Jersery, USA: Editorial John Wiley & Sons, Inc.

Moale Quispe, A y Rivera Justo, E (2019). Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica. (Tesis de pregrado inédita, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú). Recuperado de https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/648846/MoaleQ_A.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Muntohar, A. (2006). Prediction and classification of expansive clay soils. Taylor and Francis, volumen(I).

Nelson, John D. y Miller, Debora J. (1992). Expansive Soils – Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering, Department of Civil Engineering Colorado State University.

Ordóñez Ruiz J, Auvinet Guichard G. y Juárez Camarena, M. (2015). Caracterización del subsuelo y análisis de riesgos geotécnicos asociados a las arcillas expansivas de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen (XVI).

Ormeño Moquillaza, E y Rivas Vicente, N (2020). Estudio experimental para determinar la influencia de la aplicación de Cenizas de Cáscara de Arroz (RHA) en la estabilización de una subrasante de suelo arcilloso de baja plasticidad en Chota- Cajamarca. (Tesis de pregrado inédita, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú). Recuperado de:

https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/653974/Orme%C3%B1o_ME.pdf?sequence=3

Quispe Chuquillanqui , W (2020). Estabilización de subrasante de vías en suelos expansivos con cloruro de sodio - Avenida Jacinto Ibarra, distrito de Chilca - Huancayo 2020. (Tesis de pregrado inédita, Universidad Continental, Huancayo, Perú). Recuperado de: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/8216/3/IV_FIN_105_TI_%20Quispe_Chuquillanqui_2020.pdf

Rojas, J. y Alva, J. (1988). Arcillas y lutitas expansivas en el norte y nororiente peruano. En el VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Huaraz. Recuperado de http://www.jorgealvahurtado.com/files/labgeo04_a.pdf

Velásquez Pereyra, C (2018). INFLUENCIA DEL CEMENTO PORTLAND TIPO I EN LA ESTABILIZACIÓN DEL SUELO ARCILLOSO DE LA SUBRASANTE DE LA AVENIDA

Wray W., Addison M., Struzyk, K. (2019). A Discussion on How Expansive Soils Affect Buildings. Virginia, USA: Editorial ASCE.

Zegarra Pellanne, J. y Zavala Rosell, G. (2011). Mecánica de suelos. Lima, Perú. Editorial Pontificia Universidad Católica del Perú.