

Análisis bibliográfico de metodología de adición de cal para la mejora de las propiedades geotécnicas de suelos tropicales aplicado en la estructura vial.

Autoras

Diana Fernanda Taborda Álvarez – Keily Johana Núñez Rojas

Tutora

M.Ing. María Julia Nieto Callejas



Contenido

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
JUSTIFICACIÓN.....	4
OBJETIVOS.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
MARCO TEÓRICO.....	5
GENERALIDADES DEL SUELO.....	5
ENSAYO DE HUMEDAD NATURAL:.....	5
ENSAYO DE PESO UNITARIO:.....	5
ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO Y LÍMITE PLÁSTICO:.....	5
ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:.....	5
ENSAYO DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL:.....	6
ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA:.....	6
ENSAYO DE DENSIDAD:.....	6
ENSAYO DE CORTE DIRECTO:.....	6
ENSAYO CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO):.....	6
ENSAYO DE COMPACTACIÓN:.....	6
SUELOS TROPICALES.....	7
GENERALIDADES DE LA CAL.....	7
GENERALIDADES SOBRE LOS PAVIMENTOS.....	8
TIPOS DE PAVIMENTOS.....	8
METODOLOGÍA.....	10
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	10
ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN LA CLASIFICACION O TIPOLOGÍA DE LOS SUELOS.....	12
LIMOS (M):.....	12
PORCENTAJE DE HUMEDAD ÓPTIMA.....	12
PESO UNITARIO SECO:.....	13
PESO UNITARIO SECO:.....	14
ARCILLAS (C).....	15
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	15

ÍNDICE DE PLASTICIDAD	16
ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD (CH).....	17
HUMEDAD ÓPTIMA:.....	17
HINCHAMIENTO:	18
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	18
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NO CONFINADA:	19
ARENAS	20
CBR.....	20
DENSIDAD SECA MÁXIMA	20
<u>CONCLUSIONES.....</u>	<u>21</u>

Tabla de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Tipos de cal</i>	<i>8</i>
<i>Ilustración 2. Composición del Pavimento Flexible.....</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración Rígido 3. Composición del Pavimento</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 4. Composición del Pavimento en Adoquines.....</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 5. Ubicación y localización de países dentro de los Trópicos de Cáncer y Capricornio.</i>	<i>10</i>

Tabla de figuras

<i>Figura 1. Variación de la humedad óptima en limos</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2. Densidad seca máxima en los suelos limosos.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Índice de plasticidad de los suelos limosos.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4. Peso unitario en suelos limosos.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Resistencia a la compresión en Arcillas.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6. Índice de plasticidad para arcillas de baja plasticidad.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7. Porcentaje de humedad óptima para arcillas de alta plasticidad.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8. Capacidad de expansión de las arcillas de alta plasticidad.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9. Índice de plasticidad de las arcillas de alta plasticidad.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10. Resistencia a la compresión no confinada de las arcillas de alta plasticidad</i>	<i>19</i>
<i>Figura 11. Porcentaje de CBR para arenas</i>	<i>20</i>
<i>Figura 12. Densidad seca máxima para arenas.....</i>	<i>20</i>

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país que cuenta con suelos tropicales ya que está ubicado geográficamente entre los Trópicos de Cáncer (23,5 latitud norte) y Capricornio (23,5 latitud sur), dichos suelos se caracterizan por su gran variabilidad y complejidad en las propiedades físicas, mecánicas y químicas, esto se debe a los diferentes componentes de formación del suelo, es decir, por efectos de meteorización física (como la erosión) y químicas (transformación o degradación de un compuesto químico en otro), estos factores de formación se complementan con otros agentes adicionales como el clima, la geomorfología y algunos procesos antrópicos que contribuyen a dicha formación.

El estado del suelo influye altamente en el comportamiento de la estructura vial, por esta razón es de gran interés conocer a tiempo las condiciones del suelo a través de los estudios geotécnicos requeridos para establecer las características físicas, químicas y mecánicas, las cuales indican si las condiciones del suelo son apropiadas o no. En muchos casos, las propiedades mecánicas presentan grandes deficiencias, por lo tanto, se tiene como consecuencias negativas: procesos de fluctuación, baja capacidad de carga, inestabilidades del terreno, levantamientos, hundimientos, asentamientos, entre otros problemas que por ende tendrán como efecto un rápido deterioro o ineficiencia de las estructuras viales. Generalmente, cuando hay una alta presencia de material arcilloso, el cual retiene la humedad y representa un problema para el desarrollo y la efectividad de la obra, la solución es planteada desde el diseño, sin darle la suficiente importancia a las técnicas existentes para el mejoramiento de las mencionadas propiedades mecánicas.

JUSTIFICACIÓN

Las vías son un medio fundamental por el cual es posible llevar educación, salud, bienestar, desarrollo e innovación a todos los rincones del país, pero lamentablemente el mayor porcentaje de las vías en Colombia se encuentran en mal estado y esto se debe a factores económicos, políticos y sociales que durante décadas han azotado el país.

Según cifras del primer semestre del 2020 reportadas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), el cual incluye únicamente la red vial primaria, sólo el 12,38% de las vías no pavimentadas de Colombia se encuentran en buen estado mientras que el 35,30% están en estado regular, el 46,61% en mal estado y el 4,06% en muy mal estado, por otra parte se tienen las vías pavimentadas de las cuales el 36,36% se encuentra en buen estado, seguido del 28,94% en estado regular, el 17,66% en mal estado y el 0,82% en muy mal estado. Por tanto, es notorio que el mayor porcentaje de las vías en Colombia es deplorable, dichos deterioros se pueden atribuir a un daño superficial (capa de rodadura), un diseño ineficiente, a las malas características de las capas que conforman al pavimento (base, subbase y subrasante), clima, mala gestión de los recursos entre otros (INVIAS, 30).

Por tal motivo esta investigación está enfocada en la recopilación y revisión de material bibliográfico que aporte al conocimiento del posible tratamiento para las propiedades mecánicas del suelo utilizando la cal como elemento estabilizante, ya que al ser un material de fácil acceso y económico podría ser fácilmente implementable en el país, puesto que en Colombia no existe una normatividad vigente para llevar a cabo este tipo de tratamientos, que ya se vienen aplicando de manera empírica y por mano de obra poco calificada

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar a través de una revisión bibliográfica el comportamiento mecánico de los suelos tropicales estabilizados con cal y su avance en el tiempo con fines de mejoramiento vial.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprender las propiedades mecánicas del suelo apropiadas para alcanzar un comportamiento eficiente de las vías.
- Determinar las propiedades específicas de suelos tropicales relevantes en el desarrollo de estructuras viales a través de la revisión bibliográfica.
- Analizar el comportamiento mecánico del suelo estabilizado con cal.

MARCO TEÓRICO

GENERALIDADES DEL SUELO

Siendo el suelo uno de los componentes principales del planeta, su definición puede variar según el punto de enfoque que se estudia, ciertamente no es igual hablar de suelos en términos de geología como hablarlo en agronomía, porque siendo lo mismo, las actividades y el uso del suelo son distintos y por ende la ciencia que lo estudia cambia. Para Ingeniería Civil el suelo es en sí mismo la base y punto de partida que se constituye como el soporte de las construcciones civiles; los puentes, las vías, las viviendas, las escuelas, los hospitales y demás edificaciones están cimentadas sobre la estructura del suelo.

Aunque el concepto defina al suelo como un material general, no significa que todos los suelos sean y se comporten de la misma manera, esto debido a los diferentes procesos de formación físicos, químicos y mecánicos. Además de otros factores externos como el clima, la topografía, el tiempo de formación, las actividades antrópicas entre otras razones que clasifican al suelo, las cuales dependen en gran medida de condiciones geográficas o la ubicación del mismo. Los suelos son categorizados según sus propiedades y características, las cuales se determinan a través de rigurosos estudios de laboratorios geotécnicos. El primer paso para elaborar el estudio es la toma de muestras del suelo tratando de que sean lo menos alteradas de sus condiciones naturales.

Los principales ensayos de laboratorios que se realizan durante el estudio de suelos son:

Ensayo de humedad natural: Las muestras de suelo contienen agua, el cual depende directamente de la estructura de sus partículas, para medir este factor se consigna el peso antes y después del secado térmico, es decir, con calor la disparidad de pesos define el porcentaje de humedad natural que contiene el suelo, lo cual es muy importante para calcular propiedades específicas como la cohesión, estabildades mecánicas y cambio volumétrico.

Ensayo de peso unitario: Se refiere a la masa de un volumen unitario de suelo, en el que se incluyen poros vacíos (peso unitario seco) y poros llenos de agua (peso unitario saturado). El peso unitario del suelo depende de su condición, es decir; si es drenado, húmedo o saturado que a su vez está directamente relacionada con condiciones de compactación y consolidación.

Ensayo de límite líquido y límite plástico: El límite líquido está definido como el porcentaje de humedad, dependiendo de la proporción de humedad del suelo, la conducta del mismo cambia, este parámetro es de suma importancia para medir factores de asentamientos o problemas de consolidación. El límite plástico se define como la transición del estado plástico a semisólido. Donde el índice de plasticidad es la diferencia de los valores entre el límite líquido y el límite plástico y determina correlaciones de los suelos como la comprensibilidad, compactibilidad y permeabilidad.

Ensayo de análisis granulométrico: Consiste en separar las partículas que componen la muestra del suelo según su dimensión, haciendo uso de tamices o mallas con aberturas específicas. De este modo se obtienen los porcentajes y tipo de material por el cual está compuesto el suelo, es decir; la cantidad de gravas, arenas y finos. Además de hallar otras constantes importantes como el coeficiente de uniformidad, el coeficiente de curvatura, y la curva granulométrica.

Ensayo de consolidación unidimensional: Está basado en la imposición de esfuerzos sobre el suelo de estudio con el fin de medir la variación de la estructura interna que se produce por la reducción de vacíos del suelo. En este ensayo se hallan constante de estudio como el esfuerzo efectivo inicial, el esfuerzo de pre consolidación, índice de compresibilidad e índice de re compresión.

Ensayo de compresión inconfiada: Se define como el valor del esfuerzo que debe aplicarse a la muestra del suelo para producir la condición de falla, el ensayo determina las constantes del suelo como el contenido de humedad, resistencia a la compresión inconfiada, resistencia al corte y el grafico de deformación vs esfuerzo.

Ensayo de densidad: A través del método de compactación se puede determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco. La determinación de la densidad seca sirve para verificar que las condiciones de compactación determinadas como optimas si se cumplan en el terreno. Por medio de este ensayo se puede obtener; el contenido de humedad de la muestra, la densidad seca in-situ y el porcentaje de compactación.

Ensayo de corte directo: Consiste en provocar una falla en cierta muestra de suelo; se imponen dos esfuerzos en diferentes direcciones, una carga en sentido vertical y otra carga en sentido horizontal, al final los resultados obtenidos determinan los valores de cohesión y Angulo de fricción.

Ensayo CBR (California Bearing Ratio): Es aplicado en el diseño de pavimentos flexibles, su propósito es determinar la resistencia de los materiales que se usan en la base y subbase de las estructuras (en este caso viales) además de dar información sobre la expansión que se espera en el suelo bajo la estructura del pavimento cuando este es saturado, los datos que se obtienen a través de este ensayo son: el contenido de humedad, la densidad húmeda y la densidad seca, el porcentaje de expansión, el valor CBR a “0,1” y “0,2” de penetración.

Ensayo de compactación: Hace referencia a un proceso artificial en el cual las partículas del suelo son forzadas a estar juntas, es decir, que aumenta el contacto unas de otras, lo que produce a su vez una disminución de vacíos que por ende mejora las condiciones y propiedades ingenieriles, reduciendo su deformidad y aumentando su resistencia al corte. Además, el propósito de este ensayo es obtener datos de contenido de humedad óptima, peso específico seco máximo y el grafico de contenido de humedad vs peso unitario.

En resumen, la Ingeniería Geotécnica es una rama de la Ingeniería Civil que se encarga de estudiar las propiedades físicas, mecánicas, hidráulicas y las resistencias del suelo con el fin de aplicarlas en la construcción de edificaciones civiles. Un estudio de suelo es el uso de las herramientas que ofrece la mecánica de suelos para obtener información del terreno que deseamos estudiar para luego determinar qué tipo de cimentación o tratamiento necesita el suelo y así ejecutar con seguridad los proyectos de ingeniería civil (Zafeco Geotechnisch Adviesbureau, 2020).

SUELOS TROPICALES

Un suelo tropical es aquel que se encuentra ubicado geográficamente dentro de los trópicos de Cáncer (23.5 latitud norte) y Capricornio (23.5 latitud sur), estos suelos cumplen con una formación específica, donde las condiciones en el proceso de meteorización física y química de los minerales en las regiones tropicales es más intensa debido a que se da en profundidades mayores que en cualquier otro lugar. Además de que son suelos altamente influenciados por condiciones de clima, temperatura, vegetación, entre otros. Esto genera que haya una variedad significativa de perfiles particulares de suelo ingenierilmente hablando.

GENERALIDADES DE LA CAL

El uso de la cal data de civilizaciones como la romana, egipcia y griega. Del periodo neolítico se registran hallazgos arqueológicos de más de 9.000 años de antigüedad (Forsmann, 2018). Dichos descubrimientos incluyen cráneos recubiertos con emplastos de cal, pavimentos a base de cal pulidos en su superficie y cisternas (depósitos para almacenamientos de agua). En Grecia eran utilizados los morteros los cuales generalmente contenían una mezcla de arena fina y cal, mientras que los acabados contenían una mezcla de cal, yeso y marmolina (Ruiz, 2013).

La cal es un producto natural obtenida a partir de la extracción de piedra caliza, la cal es una sustancia sólida en forma de polvo granular, de color blanco en su estado más puro y su variación de color se debe a la presencia de hierro en su composición. El proceso para su obtención inicia con la extracción de dicha piedra, luego se realiza el proceso de trituración y tamizaje hasta alcanzar el diámetro requerido para ser posteriormente calcinada donde una vez finalizado, se procede a ser hidratada con agua; este proceso produce una reacción exotérmica (liberación de calor), logrando un material que tendrá aspecto de polvo, en pocas palabras es la calcinación de mineral calizo donde el producto final se denomina “cal viva”. La mezcla de cal con agua crea una pasta que mejora las particularidades de los materiales a los que es aplicada y que a largo plazo aumentarán su consistencia y resistencia; En la industria de la construcción es utilizada debido a sus múltiples bondades como la estabilización y afirmado de suelos, aditivo en mezclas asfálticas, recubrimiento de superficies, mezclas de concreto más trabajables y fluidas entre otras (Restrepo, 2017). En la *ilustración 1* se pueden observar los tipos de cal podemos encontrar:

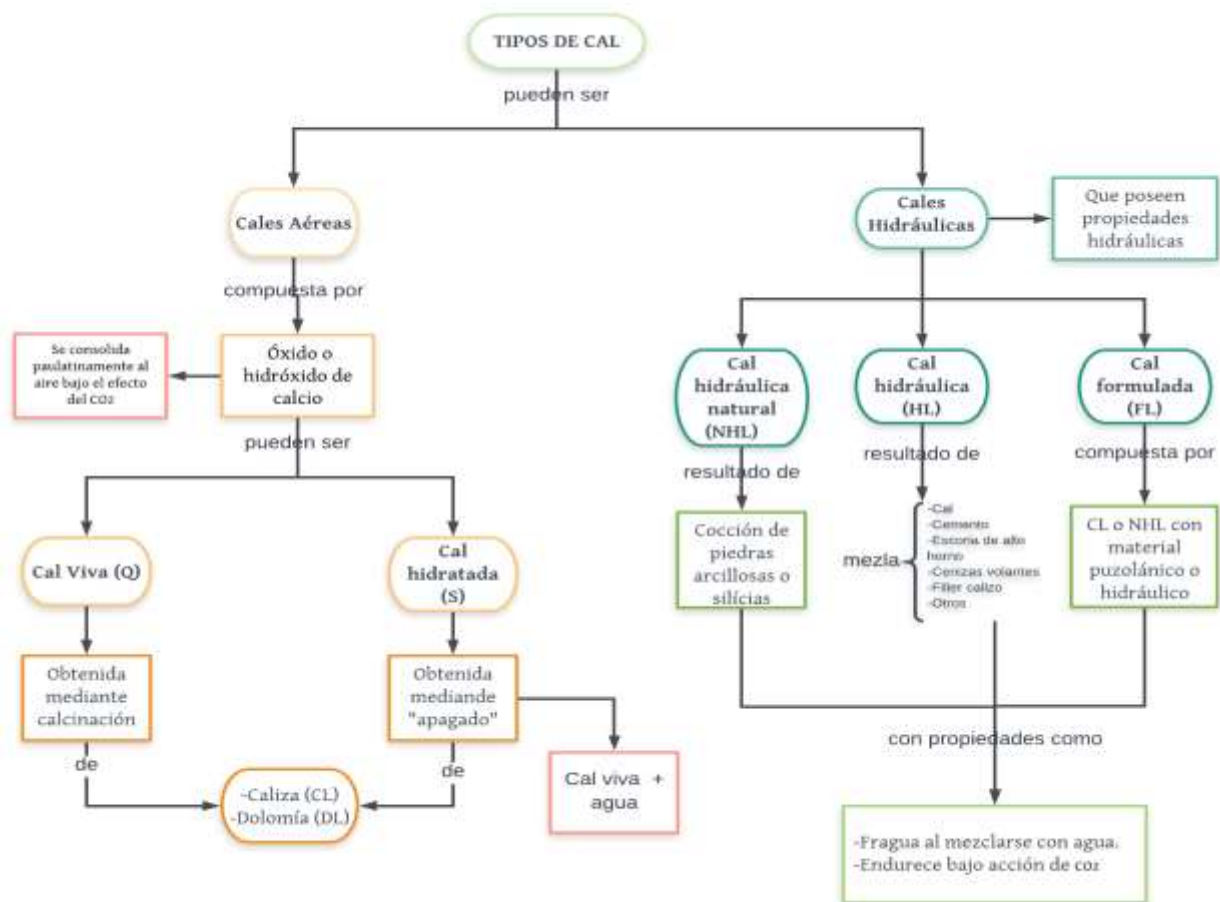


Ilustración 1. Tipos de cal

GENERALIDADES SOBRE LOS PAVIMENTOS

Un pavimento es una estructura que reposa sobre un suelo de fundación (en pavimentos llamado subrasante), la cual puede estar formada por una o más capas construidas con materiales seleccionados y un proceso constructivo debidamente establecido y controlado, cuya función principal es la de transmitir de manera correcta los esfuerzos a la subrasante.

TIPOS DE PAVIMENTOS

1. **Pavimentos flexibles:** Se denominan así, debido a que bajo solicitaciones de carga permiten deflexiones que una vez retirara la carga se recuperada en cierto porcentaje, dando lugar a una deformación permanente acumulada.
Se encuentra conformado de la siguiente manera:



Ilustración 2. Composición del Pavimento Flexible

- 1. Pavimentos rígidos:** Debido a que la capa de rodadura (losa de concreto hidráulico u hormigón), bajo solicitaciones de carga, las deflexiones ocurridas son mínimas “muy cercanas a cero”. Se conforma de la siguiente manera:

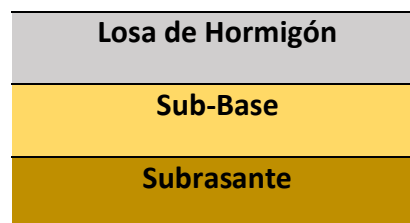


Ilustración Rígido 3. Composición del Pavimento

- 1. Pavimentos en adoquines:** Su capa de rodadura está formada por adoquines o bloques prefabricados de hormigón o arcilla y bajo solicitaciones de carga permite deflexiones. Su conformación es la siguiente:

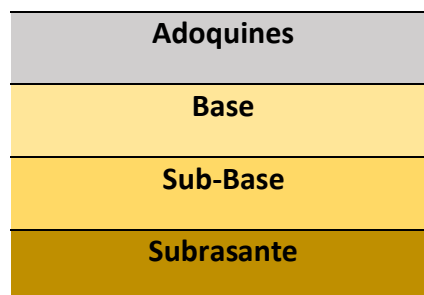


Ilustración 4. Composición del Pavimento en Adoquines

METODOLOGÍA

1. Se recopilará información acerca de las características mecánicas de los suelos.
2. Se recopilará información acerca de las características mecánicas de los suelos tropicales.
3. Se recopilarán artículos y documentos investigativos que se enfoquen en el estudio de la cal.
4. Se recopilarán artículos y documentos investigativos que se enfoquen en el estudio de la cal como estabilizador de las propiedades mecánicas del suelo.
5. Se analizarán los resultados de los documentos encontrados.
6. Se efectuará una conclusión basada en las referencias bibliográficas de la efectividad que representaría la implementación de la mejora vial con cal.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis bibliográfico se realizó sobre los países que cuentan con suelos tropicales, es decir, los que se localizan entre el Trópico de Cáncer (23,5 latitud norte) y el Trópico de Capricornio (23,5 latitud sur) demarcados con una línea de color rojo respectivamente en la *ilustración 5*.

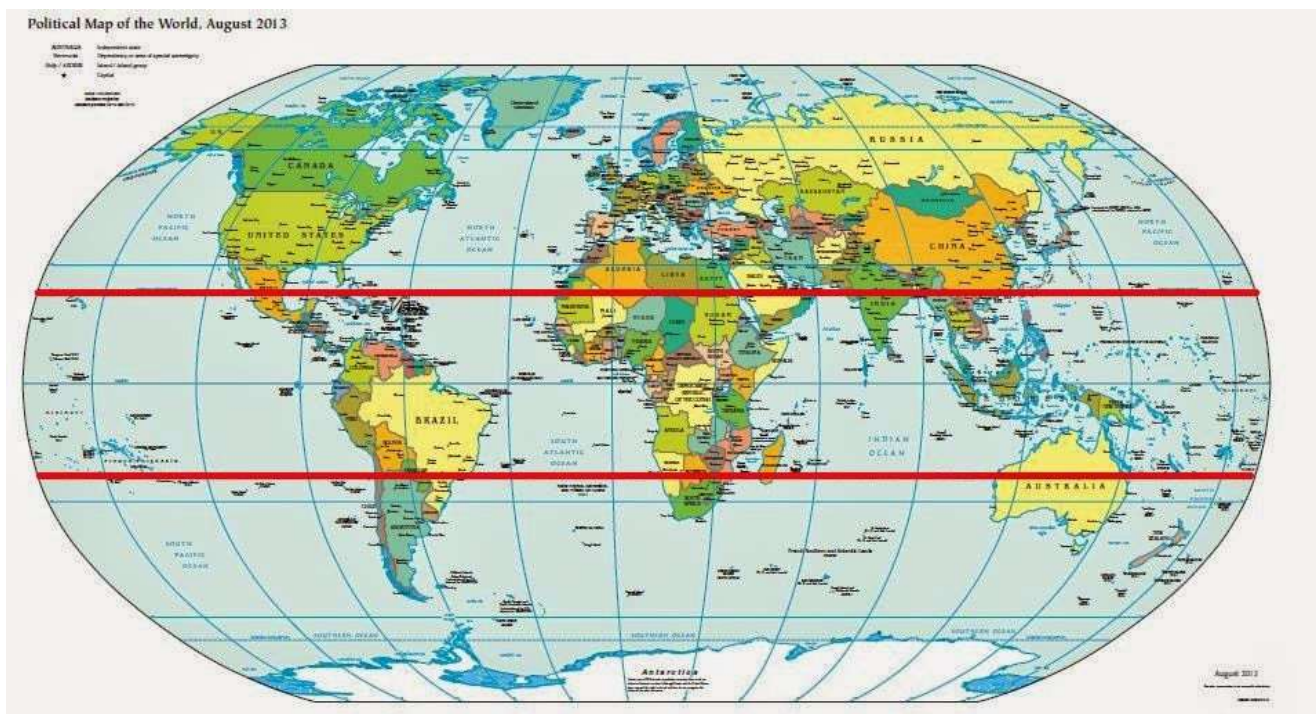


Ilustración 5. Ubicación y localización de países dentro de los Trópicos de Cáncer y Capricornio.

Los países que cuentan con dichos suelos son:

México	Papúa	Trinidad y Tobago	Sudán
Cuba	Omán	República Centroafricana	Indonesia
Guatemala	El Salvador	Yubuti	Filipinas
Belice	Ecuador	India	Jamaica
Honduras	Perú	Tailandia	Camboya
Nicaragua	Bolivia	Singapur	Honiara
Costa Rica	Brasil	Nueva Guinea	Siri Lanka
Panamá	Paraguay	UEA	Guinea Bissau
Sierra leona	Sahara Occidental	Níger	Congo
Nigeria	Mauritania	Chad	Santa Lucia
Congo	Mal	Senegal	Haití
Zimbabwue	Costa de Marfil	Gambia	República Dominicana
Burundi	Guinea Ecuatorial	Guinea	Puerto Rico
Kenia	Nambia	Ghana	Colombia
Madagascar	Mozambique	Togo	Venezuela
Yemen	Rep. Dem. Del Congo	Benin	Guyana
Myanmar	Malasia	Gabon	Surinam
Camboya	Botswana	Tanzania	Guyana Francesa
Timor Oriental	Vietnam		Liberia
Brunei			Camerún

Cabe resaltar que algunos países no fueron tomados en cuenta ya que su porcentaje dentro del área comprendida entre los trópicos no era representativo.

ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGÚN LA CLASIFICACION O TIPOLOGÍA DE LOS SUELOS.

Con base en el sistema unificado de clasificación de suelos S.U.C.S se define a través de los diferentes parámetros de medidas la tipología de los suelos encontrados en las fuentes bibliográficas analizadas, y con el fin de diferenciar su comportamiento geotécnico después de adicionarle cal, se separaron en los siguientes cinco grupos de suelos: Limos, arcillas, arcillas de baja plasticidad, arcillas de alta plasticidad y arenas.

En las fuentes bibliográficas encontradas de suelos se analizaron los ensayos más representativos, es decir aquellos ensayos que estaban presentes común denominador de todos; por lo anterior es importante aclarar que las representaciones graficas de los ensayos no hacen referencia a la evaluación individual de cada fuente, sino que muestra un índice del comportamiento del tipo de suelo a nivel general.

LIMOS (M):

Para este tipo de suelo se consideraron los siguientes tres artículos (una, una, si, C, & Zhang, 2020), (Baldovino, Moreira, Teixeira, Izzo, & Rose, 2017) y (García Gonzales, 2015) y de ellos se extrajeron los datos para realizar las gráficas de a continuación.

Porcentaje de humedad óptima

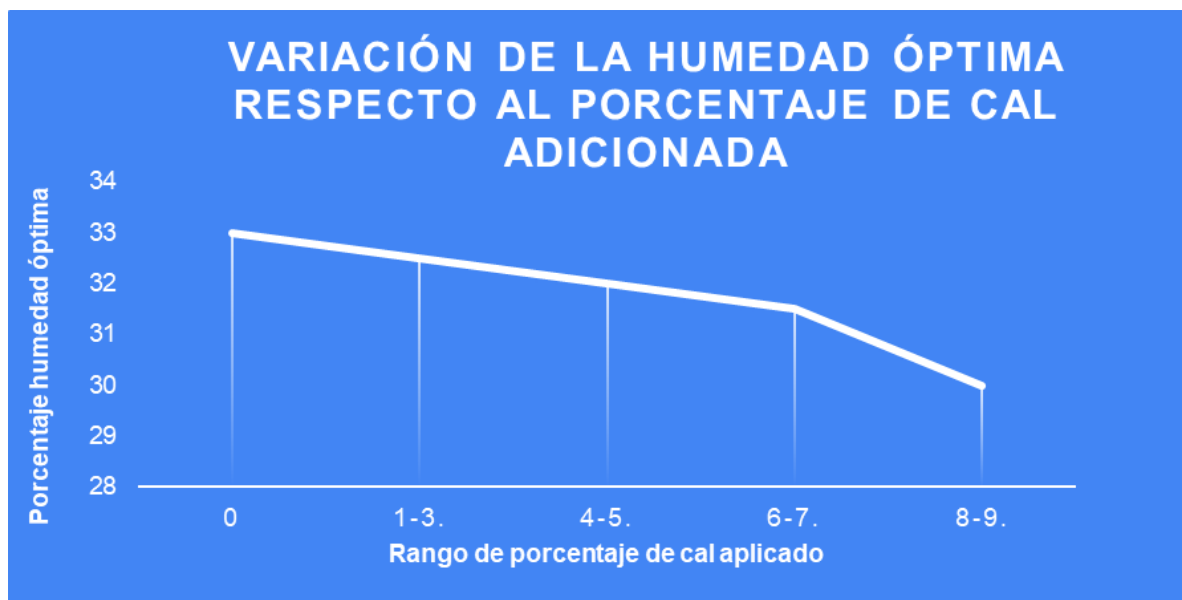


Figura 1. Variación de la humedad óptima en limos

La figura 1 muestra la variación de la humedad óptima de los suelos limosos con respecto a los rangos de porcentajes de cal adicionados. La gráfica muestra como el porcentaje de humedad óptima disminuye en la misma medida que aumenta el rango del porcentaje de cal adicionada.

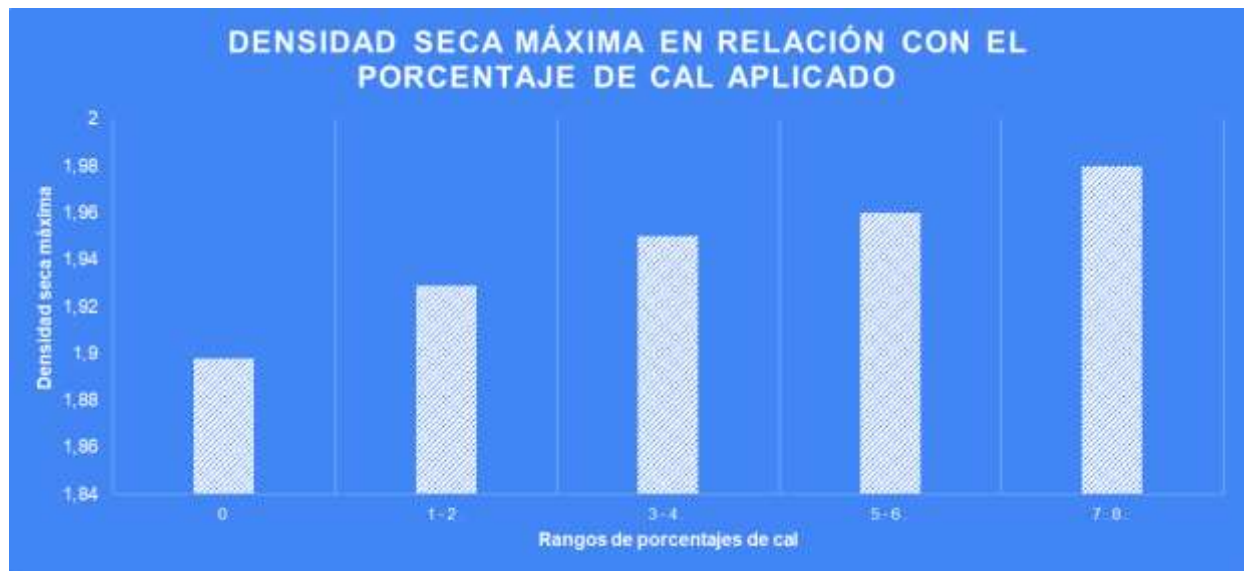
Densidad seca máxima:

Figura 2. Densidad seca máxima en los suelos limosos.

En la figura 2 se puede observar que la variación de la densidad seca máxima de los suelos limosos aumenta proporcionalmente con el aumento de cal adicionada.

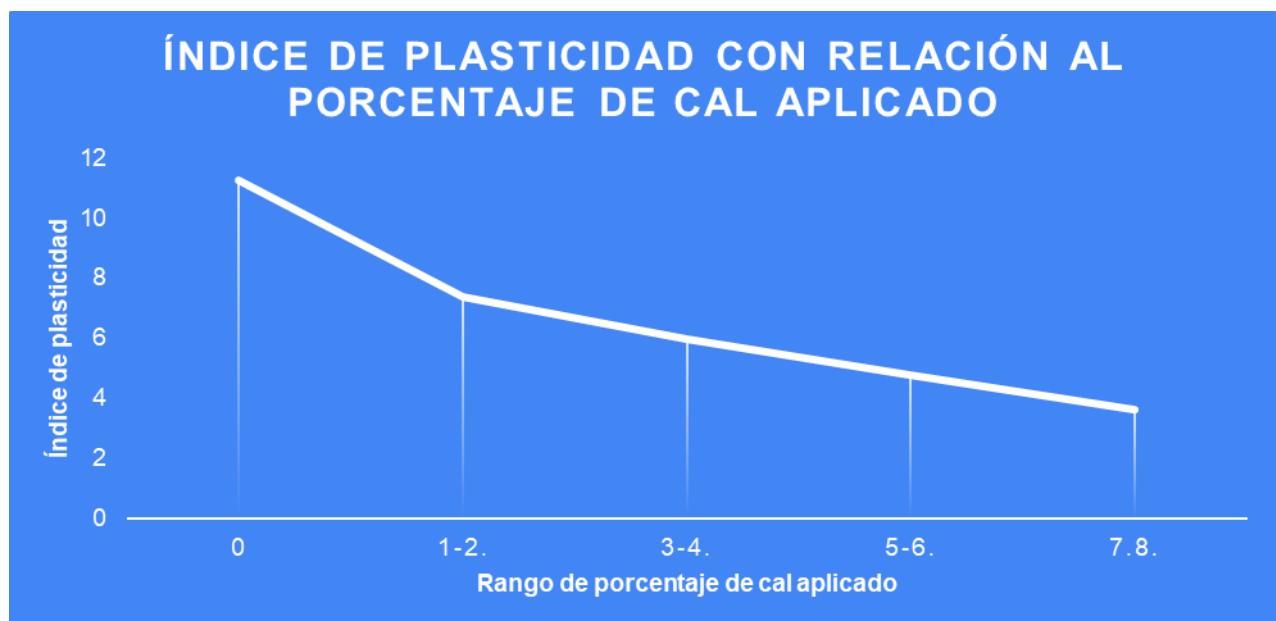
Índice de plasticidad:

Figura 3. Índice de plasticidad de los suelos limosos.

La gráfica 3 muestra la disminución del índice de plasticidad de los suelos limosos con respecto al aumento del porcentaje de cal adicionada.

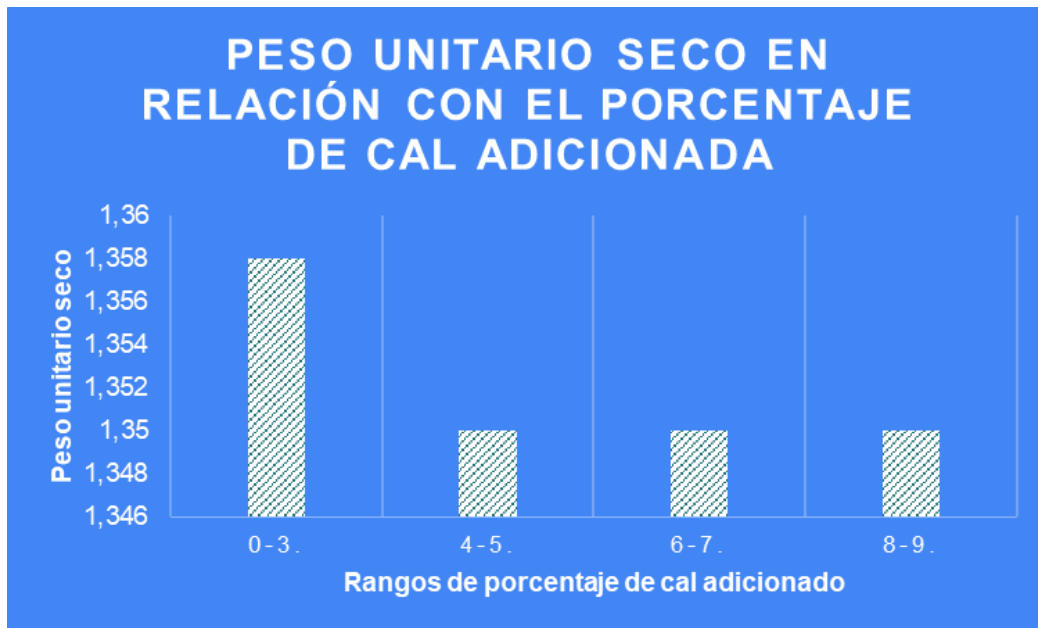
Peso unitario seco:

Figura 4. Peso unitario en suelos limosos.

En la figura 4 se puede observar que el comportamiento del peso unitario seco de los suelos limosos disminuye de manera significativa hasta el rango del 3% de cal adicionada, a partir del 4% el peso unitario seco no presenta variaciones, se mantiene estándar.

ARCILLAS (C)

Las fuentes bibliográficas que evaluaron el comportamiento de las arcillas son:

(Jawad, Taha, Majeed, & Khan, 2014), (Liu, Pemberton, & Indraratna., 2010), (Negi, Faizan, Siddharth, & Singh, 2013), (Gerardo Parra Gómez, Martínez, Martínez, & Cárdenas, 2019) y (Moale Quispe & Rivera Justo, 2019).

Resistencia a la compresión



Figura 5. Resistencia a la compresión en Arcillas.

En la figura 5 se puede observar como la resistencia a la compresión aumenta de manera gradual a la vez en que se aumenta el rango de porcentaje de cal adicionada, en este caso se analizaron rangos de adición de cal desde cero a nueve por ciento.

ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD (CL)

Las fuentes bibliográficas que evaluaron el comportamiento de las arcillas de baja plasticidad son las siguientes:

(Xin Kang S. 1., Kang, Chang, & y Louis Ge, 2014), (a, a, a, & b, Estabilización del suelo residual con cenizas de cascarilla de arroz y cemento), (Palli Apaza, 2015), (Barbero-Barrera, Jové-Sandoval, & González Iglesias, 2020), (Honne Basanna, Parameshwarappa, Hirebelaguly Shivaprakash, Bhimahalli, & Gaudin, 2020), (Sante, Role of Stabilizers and Gradation of Soil in Rammed Earth Construction, 2020), (Harichane, Ghrici, & Gadouri, 2019), (Galvañ, Elsharief, & Ferreira, 2009), (Stoltz, Cuisinier, & Masrouri, 2014), (Wang & Korkiala-Tanttu, 1-D compressibility behaviour of cement-lime stabilized soft clays, 2020), (Dhar & Hussain, 2018), (Wanga, Abriaka, & Zentara, 2014), (Wang, Wang, & Wang, Compressibility and strength behavior of marine soils solidified with MgO—A green and low carbon binder, 2016), (Nilo Cesar Consoli, Amanda Dalla Rosa, & and Rodrigo Beck Saldanha), (Ling, Kassim, Karim1, & Chan, 2013).

Índice de plasticidad

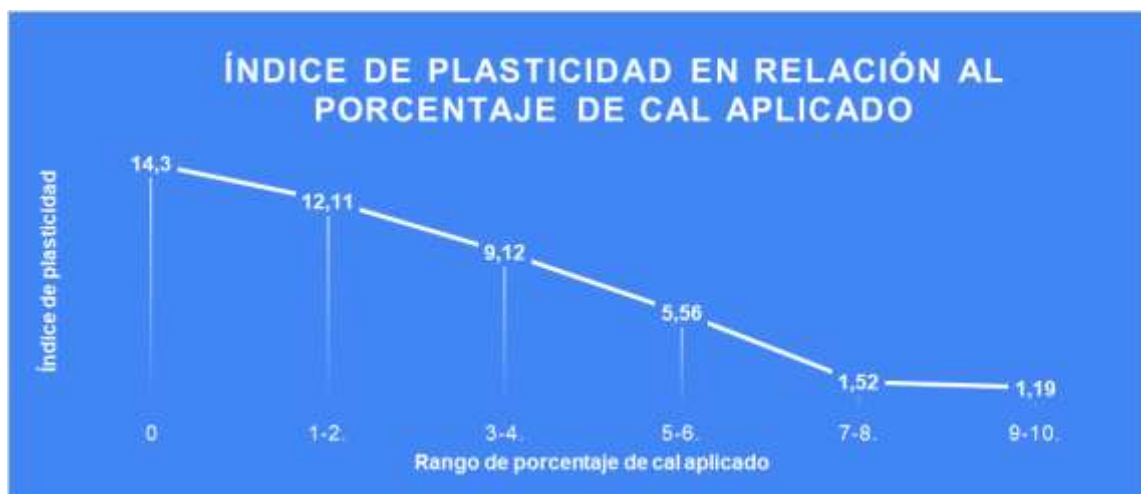


Figura 6. Índice de plasticidad para arcillas de baja plasticidad

En la figura 6 se muestra la disminución del índice de plasticidad en arcillas de baja plasticidad, sin embargo, cabe mencionar que para esta tipología de suelo se incluyó en dicho grupo un artículo cuya clasificación es la de un suelo orgánico, esto debido a que era el único artículo evaluado para suelos de su tipología y que al ser sus características similares a las de las arcillas de baja plasticidad era factible.

ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD (CH)

Las fuentes bibliográficas que analizaron el comportamiento de las arcillas de alta plasticidad frente a la adición de cal son las siguientes:

(Xin Kang S. , Kang, Chang, & y Louis Ge, 2014), (Sujit Kumar Dash & y Monowar Hussain, 2012), (Arifin & Rahman), (Ulloa López, 2015), (Sánchez Albán, 2014), (Mahedi & Cetin, 2020), (Sante, On the Compaction Characteristics of Soil-Lime Mixtures, 2020), (Utami, 2014), (James, David, Nagarathinam, Thaniyarasu, & Madhu, 2018), (Kamaruddin, Nahazanan, KimHuat, & Anggraini, 2020), (Phanikumar & Raju, 2020), (Ismeik & Shaqour, 2020), (1 & Thyagaraj, 2020), (Rocha, Silva, Pitanga, Mendonça, & Darío, 2020), (Nabil & Mustapha, 2020) (Jahandari, Saberian, Zivari, & Jie Li, 2017), (Aref al-Swaidani & Meziab, 2016), (Bevilacqua, Bosco, & Celauro, 2012), (HB Nagaraj, Arun, & Jagadish, 2014) y (Chakraborty & Nair, 2017).

Humedad óptima:



Figura 7. Porcentaje de humedad óptima para arcillas de alta plasticidad

En la figura 7 se representa la variación del porcentaje de humedad óptima en relación con el rango de cal adicionado en suelos tipo arcillas de alta plasticidad, el resultado muestra como la humedad óptima para este tipo de suelos aumenta a partir del 4% de cal adicionada.

Capacidad de expansión:



Figura 8. Capacidad de expansión de las arcillas de alta plasticidad.

En la figura 8 se puede observar como la capacidad de expansión para un suelo tipo arcilla de alta plasticidad disminuye de manera gradual en función al aumento del porcentaje de cal que se adiciona en dicho suelo.

Índice de plasticidad:

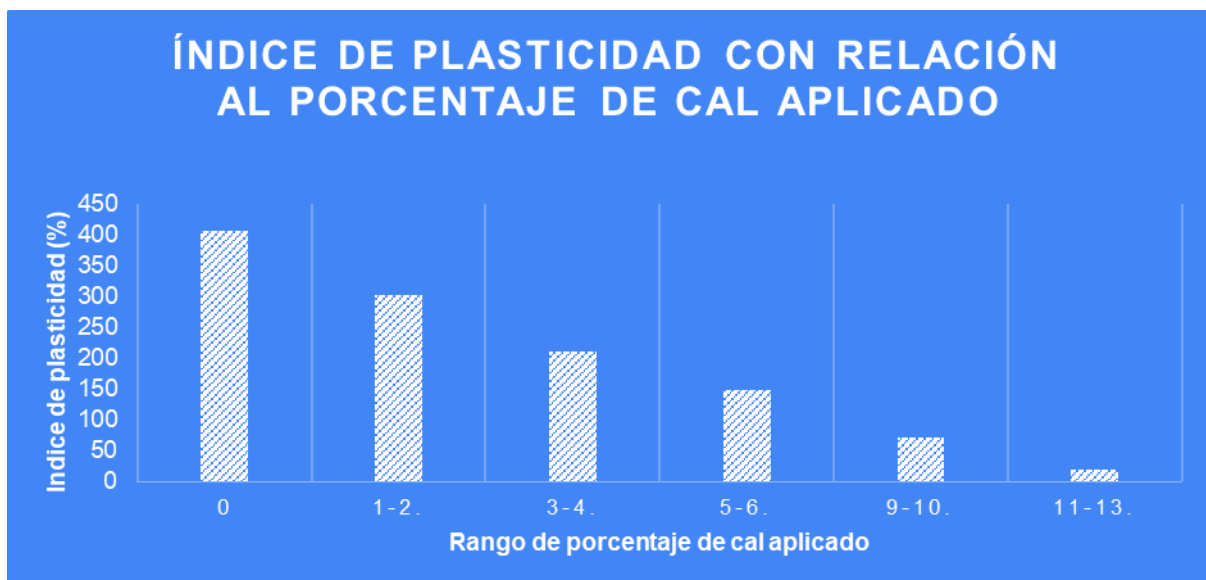


Figura 9. Índice de plasticidad de las arcillas de alta plasticidad.

La figura 9 muestra una disminución importante del índice de plasticidad en arcillas de alta plasticidad (CH) en relación con los porcentajes de cal adicionado, para este tipo de suelo se evaluaron rangos de adición de cal hasta un 13%

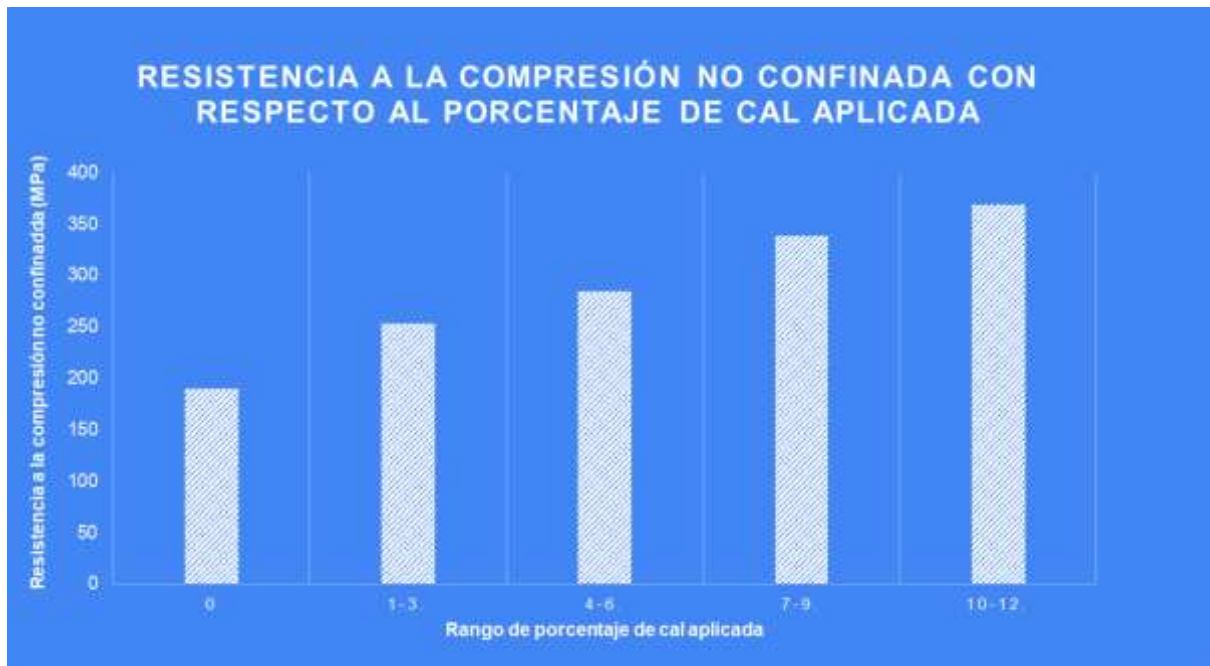
Resistencia a la compresión no confinada:

Figura 10. Resistencia a la compresión no confinada de las arcillas de alta plasticidad

La figura 10 representa el comportamiento de la resistencia a la compresión no confinada de las arcillas de alta plasticidad con respecto al porcentaje de cal adicionada y se puede observar cómo aumenta de manera progresiva.

ARENAS (S)

Las fuentes bibliográficas que analizaron el comportamiento de las arenas son los siguientes:

(López Sumarriva, 2018), (Consoli, Festugato, Filho, Neto, & Andreghetto, 2020), (Fontalvo, Barajas, & Nadad, 2006), (Fathi-Moghaddam, Tavakol-Sadrabadi, & Tajbakhsh, 2020), (Chakraborty S. N., 2018), (Ikeagwuani, 2019)

CBR



Figura 11. Porcentaje de CBR para arenas

En la figura 11 se puede evidenciar que el porcentaje de CBR no presenta una variación significativa con respecto al porcentaje de cal adicionado hasta el siete por ciento de adición de cal donde aunque mínimo se puede observar un aumento en dicho porcentaje.

Densidad seca máxima

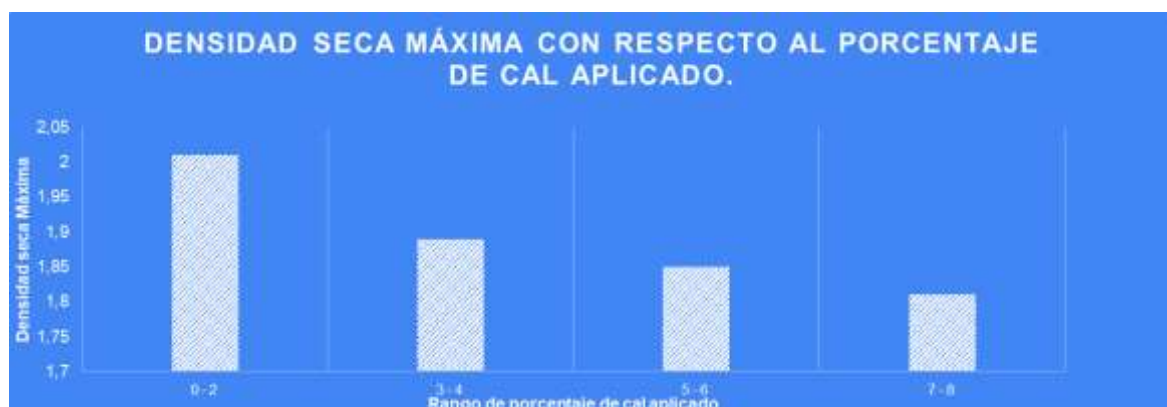


Figura 12. Densidad seca máxima para arenas

En la gráfica de la figura 12 se puede observar la disminución de la densidad seca máxima con respecto a los porcentajes de cal adicionado.

CONCLUSIONES

Luego de recopilar, revisar y separar por tipos de suelos los diferentes ensayos de laboratorio más representativos en todas las fuentes bibliográficas encontradas. Se procedió al análisis de la información, en primera estancia de manera individual por tipo de suelo para luego, con el fin de encontrar de manera ordenada una visión general de cuáles fueron las propiedades geotécnicas que mejoraron por consecuencia de la adición de cal y así definir porque es óptimo aplicar la metodología en el mejoramiento de las vías en Colombia. Con base en lo anterior se generan las siguientes conclusiones:

1. En un análisis global de los suelos examinados en las fuentes encontradas se concluye el seis por ciento corresponde a limos, el ochenta y dos por ciento a arcillas y el doce por ciento a arenas.
2. Se evaluaron los ensayos de laboratorio más representativos, es decir aquellos que se muestran en la mayoría de las fuentes bibliografías estudiadas, los resultados fueron los siguientes:
 - a) **índice de plasticidad:** Como se observa en las gráficas, en todos los tipos de suelos examinados el índice de plasticidad disminuye significativamente en la misma medida en se aumenta el porcentaje de adición de cal, sin embargo, el rango máximo de cal adicionada que se encontró fue hasta de un trece por ciento, por lo que no es posible determinar una variación de este comportamiento en un rango mayor al del anteriormente mencionado por falta de información.
 - b) **Capacidad de expansión:** Se evaluó solo en las arcillas de alta plasticidad (CH) y se encontró una disminución en su capacidad de expansión significativa hasta los rangos de cal adicionado de cuatro al seis por ciento, de ahí en adelante no presenta variación con respecto al aumento de cal adicionada.
 - c) **Densidad seca máxima:** Corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima, el análisis bibliográfico da respuestas interesantes según la tipología de suelo, pues para las arenas la densidad seca máxima disminuye inversamente al aumento de la humedad óptima en función del aumento de contenido de cal, caso contrario del comportamiento que se evidencia en los suelos tipo limos donde pasa todo lo contrario, la densidad seca máxima aumenta mientras que la humedad óptima disminuye.
 - d) **Resistencia a la compresión simple:** La resistencia a la compresión hace referencia a la capacidad que tiene el suelo de soportar las cargas verticales a las que se somete, en el ensayo de resistencia a compresión se mide las deformaciones con respecto a las cargas aplicadas que puede soportar. Lo que se puede inferir en el análisis de las fuentes es el aumento considerable de la resistencia con respecto al aumento de cal adicionada.
 - e) **CBR:** Determina la resistencias de los materiales que componen la estructura vial, es decir la base y la sub-base, con el aumento que se puede observar CBR en las arenas, se puede inferir que no se requieren grandes cantidades de agregados para la composición de las capas anteriormente mencionadas.

3. Si bien la revisión y análisis de la bibliografía se quería enfocar en los suelos tropicales, se encontró que los ensayos propios para determinar las características particulares de los suelos tropicales, no fueron tomadas en cuenta; es por ello que se recomienda que para investigaciones futuras se realicen estudios propios de suelos tropicales.
4. Puesto que el pavimento es una estructura que reposa sobre la subrasante y tiene como finalidad transmitir o distribuir de manera adecuada los esfuerzos al suelo a través de las diferentes capas que lo conforman, dependiendo su clasificación (rígido, flexible o adoquinado).

El suelo es propiamente quien está sometido a dichos esfuerzos por lo que sufre deformaciones en su estructura, muchos tipos de suelos no cumplen con las condiciones para soportar las deformaciones producidas por las cargas, por lo cual se ven obligados a someter los suelos a tratamientos para mejorar sus propiedades o a ser reemplazados por materiales con mejores condiciones lo cual genera un costo elevado en el diseño vial, así como en su ejecución.

Por lo anterior y como se evidencia en el análisis de las fuentes, se concluye que la cal es un material capaz de mejorar de manera significativa las propiedades geotécnicas del suelo. Colombia es un país que cuenta con suelos tropicales debido a que se encuentra geográficamente limitado dentro de los trópicos, que sus vías se componen por un alto porcentaje de vías sin pavimentar y pavimentadas en mal estado. Es por eso que se propone en este documento, como conclusión, que sea implementada la metodología de adición de cal con el fin de proporcionar mejores condiciones al suelo, con el fin de que sobre él se puedan diseñar vías seguras y duraderas en el tiempo. El trasfondo del diseño de las vías es algo más que un tema de ingeniería civil, pues de ello depende la comunicación y el desarrollo de las comunidades impactadas, es por eso que cualquier aporte académico o investigativo debería enfocarse aunque sea mínimamente una parte en el beneficio de la sociedad, el medio ambiente y el desarrollo de infraestructuras sostenibles.

TRABAJOS CITADOS

1. 1, K. K., & Thyagaraj, T. (2020). Stabilization of Expansive Soil Using Lime Pile and Lime Precipitation Techniques-A Comparative Study.
2. a, E. B., a, R. H., a, H. M., & b, A. M. (s.f.). Estabilización del suelo residual con cenizas de cascarilla de arroz y cemento.
3. a, E. B., a, R. H., a, H. M., & b, A. M. (s.f.). GUIA BASICA PARA ESTABILIZACION DE SUELOS CON CAL EN CAMINOS DE BAJA INTENSIDAD VEHICULAR EN LA PROVINCIA DE SAN ROMAN.
4. Aref al-Swaidani, I. H., & Meziab, A. (2016). Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil.
5. Arifin, Y. F., & Rahman, G. (s.f.). Estabilización de suelos blandos con cemento y palma mezcla de cenizas de cáscara de grano. Recuperado el Agosto de 2020
6. Baldovino, J. A., Moreira, E. B., Teixeira, W., Izzo, R. L., & Rose, J. L. (2017). Effects of lime addition on geotechnical properties of sedimentary soil in Curitiba, Brazil.
7. Barbero-Barrera, M., Jové-Sandoval, F., & González Iglesias, S. (2020). Assessment of the effect of natural hydraulic lime on the stabilisation of compressed earth blocks.
8. Bevilacqua, B. C., Bosco, D. L., & Celauro, C. (2012). Procedimientos de diseño para la estabilización del suelo-cal para carreteras y ferrocarriles Terraplenes. Parte 2- Validación experimental.
9. Chakraborty, S. N. (2018). Impact of curing time on moisture-induced damage in lime-treated soils.
10. Chakraborty, S., & Nair, S. (2017). Impacto de diferentes fases cementosas hidratadas sobre el daño inducido por la humedad en cal estabilizado.
11. Consoli, N., Festugato, L., Filho, H., Neto, A., & Andreghetto, D. (2020). Durability Assessment of Soil-Pozzolan-Lime Blends through Ultrasonic-Pulse Velocity Test.
12. Dhar, S., & Hussain, M. (2018). The strength behaviour of lime-stabilised plastic.
13. Fathi-Moghaddam, M., Tavakol-Sadrabadi, M., & Tajbakhsh, M. (2020). Effect of Lime and Rice Husk Ash on Horizontal Saturated Hydraulic Conductivity of Sandy Loam Soils.
14. Fontalvo, O. D., Barajas, B. M., & Nadad, F. G. (2006). Estabilizacion con cal del suelo de la ciudad de Cartagena para ser utilizado como base .
15. Galvañ, T. C., Elsharief, A., & Ferreira, G. (2009). Effects of Lime on Permeability and Compressibility of Two Tropical Residual Soils.

16. García Gonzales, A. (2015). Determinación de la resistencia de la subrasante incorporando cal estructural en el suelo limo arcilloso del sector 14 Mollepampa de Cajamarca.
17. Gerardo Parra Gómez, Martínez, J. G., Martínez, J. C., & Cárdenas, J. C. (2019). Soil stabilization with lime and fly ash.
18. Harichane, K., Ghrici, M., & Gadouri, H. (2019). Natural pozzolana used as a source of silica for improving the behaviour of lime–stabilised clayey soil.
19. HB Nagaraj, M. S., Arun, T., & Jagadish, K. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks.
20. Honne Basanna, N., Parameshwarappa, P., Hirebelaguly Shivaprakash, S., Bhimahalli, A., & Gaudin, J. (2020). Papel de los estabilizadores y gradación del suelo en Construcción de tierra apisonada.
21. Ikeagwuani, C. C. (2019). Comparative Assessment of the Stabilization of LimeStabilized Lateritic Soil as Subbase Material Using Coconut Shell Ash and Coconut Husk Ash.
22. Ismeik, M., & Shaqour, F. (2020). Effectiveness of lime in stabilising subgrade soils subjected to freeze–thaw cycles .
23. Jahandari, S., Saberian, M., Zivari, F., & Jie Li, M. (2017). Experimental study of the effects of curing time on geotechnical properties of stabilized clay with lime and geogrid .
24. James, J., David, E. P., Nagarathinam, M., Thaniyarasu, M. K., & Madhu, J. (2018). Pozzolanic benefit of fly ash and steel slag blends in the development of uniaxial compressive strength of lime stabilized soil .
25. Jawad, I. T., Taha, M. R., Majeed, Z. H., & Khan, T. A. (2014). Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative.
26. Kamaruddin, F. A., Nahazanan, H., KimHuat, B., & Anggraini, V. (2020). Mejoramiento de suelos arcillosos marinos utilizando cal y activación alcalina estabilizada con inclusión de fibra de coco tratada .
27. Ling, F. N., Kassim, K. A., Karim1, A. T., & Chan, T. W. (2013). Stabilization of Artificial Organic Soil at Room Temperature using Blended Lime Zeolite.
28. Liu, M. D., Pemberton, S., & Indraratna., B. (2010). A study of the strength of lime treated soft clays.
29. López Sumarriva, J. J. (2018). Estabilización de suelos arcillosos con cal para el tratamiento de la subrasante en las calles de la urbanización San Luis de la ciudad de Abancay.
30. Mahedi, M., & Cetin, B. W. (2020). Cemento, cal y cenizas volantes en la estabilización de suelos expansivos: evaluación del desempeño y comparación .

31. Moale Quispe, A. B., & Rivera Justo, E. J. (2019). Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso como subrasante en vías terrestres de la localidad de Villa Rica.
32. Nabil, M., & Mustapha, A. . (2020). Impact of wetting—drying cycles on the mechanical properties of lime-stabilized soils.
33. Negi, A. S., Faizan, M., Siddharth, D. P., & Singh, R. (2013). Soil stabilization using lime.
34. Nilo Cesar Consoli, P., Amanda Dalla Rosa, M., & and Rodrigo Beck Saldanha, B. (s.f.). Variables Governing Strength of Compacted Soil–Fly Ash–Lime Mixtures. Recuperado el Agosto de 2020
35. Palli Apaza, E. E. (2015). Guia básica para estabilizacion de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en la Provincia de San Roman.
36. Phanikumar, B., & Raju, E. R. (2020). Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilised with lime sludge and cement.
37. Rocha, G. S., Silva, C. H., Pitanga, H. N., Mendonça, E. P., & Darío. (2020). Effect of lime on the mechanical response of a soil for use in unpaved forest roads.
38. Sánchez Albán, M. A. (2014). Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Cacical del cantón Tosagua provincia de Manabí.
39. Sante, M. D. (2020). On the Compaction Characteristics of Soil-Lime Mixtures.
40. Sante, M. D. (2020). Role of Stabilizers and Gradation of Soil in Rammed Earth Construction.
41. Stoltz, G., Cuisinier, O., & Masrouri, F. (2014). Weathering of a lime-treated clayey soil by drying and wetting cycles.
42. Sujit Kumar Dash, P., & y Monowar Hussain, P. (2012). Lime Stabilization of Soils: Reappraisal.
43. Ulloa López, H. (2015). Estabilización de suelos cohesivos por medio de Cal en las Vías de la comunidad de San Isidro del Pegón, municipio Potosí- Rivas.
44. una, N. I., una, F. D., si, L. M., C, Z. u., & Zhang, H. (2020). Integración de lignosulfonato y cal hidratada para la mejora de suelos expansivos: una solución de residuos sostenible.
45. Utami, G. S. (2014). Clay soil stabilization with lime effect the value CBR and swelling.
46. Wang, D., & Korkiala-Tanttu, L. (2020). 1-D compressibility behaviour of cement-lime stabilized soft clays.
47. Wang, D., Wang, H., & Wang, X. (2016). Compressibility and strength behavior of marine soils solidified with MgO—A green and low carbon binder.

48. Wang, D., Abriaka, N. E., & Zentara, R. (2014). One-dimensional consolidation of lime-treated dredged harbour.
49. Xin Kang, S. 1., Kang, G.-C., Chang, K.-T., & y Louis Ge, M. (2014). Chemically Stabilized Soft Clays for Road-Base Construction.
50. Xin Kang, S., Kang, G.-C., Chang, K.-T., & y Louis Ge, M. (2014). Chemically Stabilized Soft Clays for Road-Base Construction.
51. Forsmann, A. (11 de Diciembre de 2018). *National Geographic*. Obtenido de https://historia.nationalgeographic.com.es/a/hallazgo-arqueologico-unico-mascara-neolitica-9000-anos-antiguedad_13564/1
52. Restrepo, J. G. (17 de Mayo de 2017). *TvAgro*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=5cn3A7yfs5o&t=562s>
53. Ruiz, I. (17 de Diciembre de 2013). *Sobre la cal*. Obtenido de <https://sobrelacal.wordpress.com/que-es-la-cal/historia-de-la-cal/>
54. Anaypoma, R. J. (2014). *EFEECTO DE LA CAL COMO ESTABILIZANTE DE UNA*. Cajamarca, Perú.
55. Castelló, J. D. (2003). ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL. *Mezclas con cemento en las infraestructuras del transporte*, (pág. 36). Madrid.
56. Escobar, G. D., & Enrique Escobar Potes., C. (2016). *GEOMECÁNICA PARA INGENIEROS*. Medellín, Antioquia, Colombia.
57. Ing. Eliana Marcela Montoya Cadavid. (13 de Agosto de 2019). BENEFICIOS DE LA CAL EN LA CONSTRUCCIÓN.
58. Malpica, R. J. (2019). *CAPACIDAD PORTANTE DE SUELO COHESIVO ESTABILIZADO CON CAL Y SULFATO DE CALCIO EN 10%, 15% Y 25%*. Cajamarca, Perú.
59. Moreno, R., Alberto, M., Montoya, H., & Augusto, C. (2005). Comportamiento de suelos residuales de diorita estabilizados con cal y su evolución en el tiempo. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 111-122.
60. Sofcar. (3 de Octubre de 2019). *Sofcar soluciones técnicas*. Recuperado el 1 de junio de 2020, de <http://sofcar.es/2019/10/03/la-cal-historia-presente-y-futuro/>
61. Forsmann, A. (11 de Diciembre de 2018). *National Geographic*. Obtenido de https://historia.nationalgeographic.com.es/a/hallazgo-arqueologico-unico-mascara-neolitica-9000-anos-antiguedad_13564/1
62. INVIAS. (2020 de Junio de 30). Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/2-principal/57-estado-de-la-red-vial#2020>

63. *Zafeco Geotechnisch Adviesbureau*. (22 de Agosto de 2020). Recuperado el 22 de Agosto de 2020, de <http://www.zafeco.nl/index.php/es/investigacion-del-suelo/ensayos-de-laboratorio-de-suelos>