

**APLICACIÓN DE AGENTE QUÍMICO COMO ESTABILIZADOR DE SUELOS
ARCILLOSOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIAS**

ANDRES PAUL OLAYA BULLA

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA - UNAD
ESCUELA DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA
PROGRAMA QUÍMICA
BUCARAMANGA, SANTANDER
2018**

**APLICACIÓN DE AGENTE QUÍMICO COMO ESTABILIZADOR DE SUELOS
ARCILLOSOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE VIAS**

Autor:

ANDRES PAUL OLAYA BULLA

Monografía para optar por el título de Químico

Director (a):

LIZETH NATALIA RIOS

Química

**UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS, TECNOLOGÍA E INGENIERÍA
PROGRAMA QUÍMICA
BUCARAMANGA, SANTANDER
2018**

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

Director

Bucaramanga, Julio de 2018

AGRADECIMIENTOS

En el andar profesional y laboral, logré comprender un poco la ciencia del petróleo con base a la Geoquímica, ahí el camino toma un sentido hacia el conocimiento de los materiales rocosos, en especial las rocas carbonatadas. A mediados del 2015, ese camino tuvo un resalto donde cambio el objetivo laboral. Después de ese cambio, no podía hablar de petróleo sino cemento; lo interesante es que algunas rocas son la materia prima de este producto sintético, en especial los carbonatos que conforman gran parte de una caliza.

En una jornada laboral, distinguí al Geólogo Edgar Fernando Mendoza Enríquez que, en enseñanza sobre un poco de geología en mina de caliza y de esquisto, me comparte una idea sobre mi posible tesis de grado. Desde ese momento, la estabilización de un suelo arcilloso fue tomando su primera forma.

El pasar del tiempo, en ciertas actividades de generar ideas en el ámbito laboral, la cáscara de huevo arrojada como desecho fue utilizada para producir cal viva para algunas actividades. Al indagar un poco, se encuentra que los desechos de cáscara de huevo son en proporciones de miles de toneladas al año; lo que traduce que es una fuente potencial materia prima de carbonato de calcio puro. En esos momentos, observo que el carbonato pulverizado puede cambiar las propiedades del suelo arcilloso, por lo tanto, surge la idea del objeto de esta monografía. Dicha idea fue comentada al tutor de la UNAD el Químico Leonardo Jaimes Martínez con el fin de su apoyo profesional en la ejecución de dicho trabajo.

De acuerdo con lo anterior, es muy oportuno agradecer al Geólogo Edgar Fernando Mendoza Enríquez, a los Químicos Leonardo Jaimes Martínez, Lizeth Natalia Rios y a las fuentes externas que impulsaron esta monografía.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION	11
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA	12
3. OBJETIVOS	13
3.1. OBJETIVO GENERAL	13
3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
4. HIPÓTESIS	13
5. JUSTIFICACIÓN	14
6. MARCO TEORICO	16
6.1. ESTADO DEL ARTE	16
6.1.1 Cal Viva (CaO)	17
6.1.2 Cemento Portland	18
6.1.3 Sales	19
6.1.4 Hidróxido de Sodio (NaOH)	20
6.1.5 Fly Ash (Cenizas Volantes)	21
6.1.7 Residuos de minería de Yeso (Sulfato de Calcio dihidratado - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	22
6.1.8 Estabilización con Asfalto	23
6.1.9 Estabilización con compuestos Químicos en estado líquido	23
6.1.10 Polvo de Mármol	24
6.1.11 Cáscara de Huevo Pulverizada	25
6.2 PROYECTOS VIALES EN COLOMBIA – VÍAS 4G	35
6.3 GEOLOGÍA	38
6.3.1 Estructura de la Tierra	39
6.3.2 Composición de la Corteza	39
6.3.3 Tipos de rocas de la corteza terrestre	40
6.3.4 Geología de Colombia	42
6.3.5 Batolito Antioqueño	43
6.3.6 Minerales de Arcillas:	46

6.3.7 Suelos Arcillosos	52
6.3.8 Estabilización de Suelos Arcillosos.....	55
6.3.9 CÁSCARA DE HUEVO COMO AGENTE QUIMICO ESTABILIZADOR DE SUELOS ARCILLOSOS	59
7. CONCLUSIONES	67
8. RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFIA	70

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1.</i> Composición química de la corteza (Gass, Smith y Wilson, 1980).	39
<i>Tabla 2.</i> Categorización del suelo según SiO ₂	40
<i>Tabla 3.</i> Rangos de CIC para los principales grupos de arcilla (Colmenares, 2002)	48
<i>Tabla 4.</i> Composición Química en porcentaje de la Cáscara de Huevo.	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Variación del Límite Líquido al adicionar Cáscara de Huevo Pulverizada (Kumar y Tamilarasam, 2014)	26
Figura 2. Variación del Limite Plástico al adicionar Cáscara de Huevo Pulverizada (Kumar y Tamilarasam, 2014)	27
Figura 3. Comparación de Variación del Limite Plástico (Liquid Limit) del Suelo mezclado con Materiales Naturales Natural Material) como el ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), TKP (Tamarind Kernel Powder – Semilla de Tamarindo Pulverizada), J (Jaggery), C (Chebula) y Lime (Cal), (James y Kasinatha, 2013)	28
Figura 4. Comparación de Variación de Contracción del Suelo (Shrinkage limit) mezclado con Materiales Naturales (Natural Material) como el ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), TKP (Tamarind Kernel Powder – Semilla de Tamarindo Pulverizada), J (Jaggery), C (Chebula) y Lime (Cal), (James y Kasinatha, 2013)	28
Figura 5. Comparación de la Variación del Índice de Hinchamiento Libre (Free Swell Index) de Suelo Mezclado con Materiales Naturales (Natural Material) como el ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), TKP (Tamarind Kernel Powder – Semilla de Tamarindo Pulverizada), J (Jaggery), C (Chebula) y Lime (Cal) (James y Kasinatha, 2013)	29
Figura 6. Curvas Comparativas por Suelo mezclado con la Variación en porcentaje de ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), (James y Kasinatha, 2013)	29
Figura 7. Comparación de Fuerza de Compresión sin Limites (UCC Strenght) de todos los materiales naturales (Natural Material), (James y Kasinatha, 2013)	30
Figura 8. Gráfico de barras que muestra la variación de la fuerza de compresión, (Prasad, Mathachan, James y Justine, 2016)	31
Figura 9. Gráfico de Variación de Limite Liquido (LL), Limite de Plasticidad (PL) y Índice de Plasticidad (PI) con Variación del Porcentaje de ESP, (Anu, Anumol, Moideen, Jiksymol y Alka, 2014)	33
Figura 10. Gráfico de Variación de Límite Liquido (LL), Límite de Plasticidad (PL) e Índice de Plasticidad (PI) con Variación del Porcentaje de QD, (Anu, Anumol, Moideen, Jiksymol y Alka, 2014)	33
Figura 11. Efecto de varios porcentajes de peso del polvo de cáscara de huevo sobre propiedades de plasticidad en especímenes de suelo con índice de plasticidad primaria (James y Kasinatha, 2013).	34
Figura 12. Gráfico sobre las Concesiones Viales (INVIAS, 2013)	35
Figura 13. Conexión Viales Antioquia (ANI, 2013)	36
Figura 14. Gráfico de Autopistas para la Prosperidad en Antioquia (ANI, 2013)	37

Figura 15. Localización del Batolito Antioqueño (INGEOMINAS, 1999)	42
Figura 16. Perfil de Meteorización típico de un suelo residual de Batolito Antioqueño (Ocampo, Hernandez y Echeverri, 2010).	43
Figura 17. Tetraedro de sílice y una lámina de sílice (Oweis y Khera, 1998).	45
Figura 18. Esquema del proceso en la interacción electrolítica en un sistema acuosa con arcilla (Lewis, 1990).	48
Figura 19. Cohesión en un suelo arcilloso (Manual de Carreteras, 2000).	52
Figura 20. Difracción de Rayos X de polvos: Patrones de carbonato de calcio industrial (a) y carbonato de calcio de cáscara de huevo (b) (Seigi, Oening, Teixeira y Segatto, 2007).	59
Figura 21. Microscopía óptica de carbonato de calcio industrial (a) y carbonato de calcio de la cáscara de huevo (b) con un aumento de 400x (Seigi, Oening, Teixeira y Segatto, 2007).	59
Figura 22. Representación de un cristal de arcilla, su complemento de cationes adsorbidos e iones en la solución del suelo circundante (Purabi, Mahabir y Chitra, 2016).	66

RESUMEN

La presente elaboración textual como opción de grado, modalidad monografía, consiste en el análisis y determinación de la posible aplicación económica y viable de estabilizadores de suelos arcillosos, usados para la construcción de vías en el territorio colombiano. La estabilización del suelo con compuestos químicos se ha aplicado en el suelo que se usa para soportar el pavimento y posteriormente el tránsito de vehículos. Particularmente el interés de este trabajo consiste en revisar la aplicación de la cáscara de huevo pulverizado, cuya composición química mayoritaria es el Carbonato de Calcio (CaCO_3) el cual representa un 94% de su masa total, composición minoritaria del 1% de Carbonato de Magnesio (MgCO_3) y 1% Fosfato de Tricalcico ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$); estas sustancias químicas actuarán como *agentes estabilizadores*, modificando las propiedades fisicoquímicas del suelo arcilloso como la resistencia, estabilidad del volumen, durabilidad y permeabilidad.

Palabra Claves: Cáscara de huevo, carbonato de calcio, carbonato de magnesio, fosfato tricalcico estabilización y suelo arcilloso.

1. INTRODUCCION

En la actualidad, aumenta el interés por la utilización de materiales alternativos que tienen un potencial superior a los tradicionales y además son económicamente asequibles, por ejemplo, la cáscara de huevo es usado en la agricultura, tratamiento de aguas e industria farmacéutica, etc. El suelo es uno de los materiales más importantes utilizados en una variedad de proyectos de construcción, incluyendo los canales y presas de tierra. Su importancia radica en que este material puede proporcionar todas las características de resistencia necesarias para proyectos de tipo urbano, vial, terraplenes industriales, etc., ilustrando la necesidad de utilizar métodos mecánicos o químicos para mejorar su calidad. El suelo de arcilla es ampliamente utilizado en la mayoría de los proyectos de construcción y particularmente presentan buenas propiedades plásticas. En este tipo de suelos el aumento de la humedad produce menor resistencia al corte y a la compresión y cambios de volumen, que pueden ocasionar daños que pueden tener un precio irreparable en las estructuras, razón por la cual, mejorar sus propiedades es importante.

El desarrollo industrial y el aumento poblacional son proporcionales al incremento anual de millones de toneladas de residuos, lo que conduce al problema de su eliminación, que a su vez contribuye a la contaminación ambiental. La utilización de tales desechos domésticos e industriales y sus productos secundarios son alternativas eficientes en los procesos de construcción, la preservación ambiental y la minimización de los efectos adversos sobre el medio ambiente. En la presente revisión bibliográfica, se indagó sobre la utilización de la cáscara de huevo pulverizada como residuo y su combinación con el suelo arcilloso usado en construcción de vías del departamento de Antioquia, con el objetivo de mejorar propiedades como la plasticidad, resistencia y absorción de agua.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el año 2016 el gobierno colombiano y la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) da inicio al proyecto La Prosperidad en el departamento de Antioquia, una de las principales vías de cuarta generación (4G). Este departamento tiene la característica de ser “rico en arcillas plásticas” (Restrepo, 2016), que al contacto con el agua modifica las propiedades fisicoquímicas acarreando situaciones poco favorables para el proceso de la construcción de las vías 4G. Por lo tanto, dada a la necesidad de mejorar las propiedades del suelo arcilloso para hacerlo favorable en la construcción de las vías, este puede ser tratado con estabilizadores a base de calcio, con el fin de reducir el aluminio intercambiable, el agua alrededor de las partículas de arcillas y mejorar su resistencia. De esta forma, la cáscara de huevo de gallina es un material de desecho doméstico, este material contribuye a la contaminación del medio ambiente. Los residuos de este producto están dentro de la categoría de residuos de alimentos, que, sometidos a un escrutinio idóneo y proceso de pulverizado, podría ser adecuado para la estabilización del suelo, destacándose como un agente químico novedoso ya que no se ha empleado. En efecto, la revisión bibliográfica que se presenta plantea lo siguiente: ¿Cuál es el efecto del uso de la cáscara de huevo pulverizada en la estabilización de los suelos arcillosos empleados en la construcción de vías en Antioquia?

2.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Los suelos arcillosos poseen una elevada superficie específica lo que posibilita la interacción sólido-fluido, permitiendo la absorción de agua favoreciendo su hinchamiento y aumentando su plasticidad. La geografía colombiana en especial la de Antioquia presenta grandes variaciones climáticas que se atribuyen a su ubicación en la zona intertropical, por ejemplo, la humedad en temporadas de invierno incide notablemente en el comportamiento de las arcillas que componen los suelos, generando cambios paulatinos que con el tiempo producen alteraciones que tienden a ser negativas para los materiales que constituyen el suelo (Mendoza y Murillo, 2013).

La resistencia de los suelos arcillosos cambia al variar el contenido de agua, dicha relación es inversamente proporcional; esto se debe a la actividad eléctrica de los cationes que los componen. El contacto del agua con las partículas finas de la arcilla crea una interacción electroquímica ocasionando expansividad, contracción y la plasticidad (Hydram Ltda., 2015). Este fenómeno hace que la arcilla presente propiedades indeseadas al ser utilizada como soporte (subrasante) o como constitutiva de la estructura (sub-base y terraplenes) de las vías. (Hydram Ltda., 2015)

Otros problemas que presentan los suelos arcillosos al momento de ser utilizados en la construcción de tipo residencial, vial, minera, etc., son debidos al inadecuado drenaje del agua,

pérdida de soporte, elevaciones o desnivel de estructuras y colapso de estructuras o vías, por lo que el espacio no puede ser utilizado sin ser estabilizado. Con el objeto de lograr que el suelo arcilloso sea un suelo resistente y funcional, se requiere de una estabilización química o mecánica. En la presente monografía se busca dar alternativa a la estabilización del suelo arcilloso mediante el uso de la cáscara de huevo pulverizado como agente estabilizador químico, por su contenido de carbonato de calcio y magnesio, y trazas de fosfato de tricalcico.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Investigar la aplicación de cáscara de huevo pulverizado para la estabilización química de suelos arcillosos en la construcción de las vías 4G en el departamento de Antioquia.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Realizar una revisión bibliográfica de la aplicación de la cáscara de huevo pulverizada como agente químico en la estabilización el material arcilloso para la preparación del suelo en la construcción de pavimentos.

Estudiar las mejores condiciones de estabilización de los suelos arcillosos presentes en los sectores de construcción vial de Antioquia, a partir de sus propiedades físico-mecánicas y químicas.

Revisar el impacto que ha tenido en Colombia la estabilización química de suelos arcillosos para la construcción de autopistas.

4. HIPÓTESIS

Los minerales arcillosos están constituidos por partículas de tamaño pequeño y su comportamiento está dominado principalmente por la actividad electrolítica. En general, las arcillas tienen una carga negativa neta y presentan afinidad por el agua, permitiendo que interaccionen y se modifiquen propiedades del material como la cohesividad, tornando el suelo difícil para la construcción de vías. Por lo tanto, son necesarios métodos que permitan a las partículas de arcilla disminuir su afinidad con el agua, a partir de técnicas químicas y físicas.

En efecto, la cáscara de huevo pulverizada gracias a su composición química podría ser utilizada como un agente estabilizador del suelo arcilloso, esto se debe a que el Carbonato de Calcio

(CaCO₃), Carbonato de Magnesio (MgCO₃) y Fosfato Tricalcico (Ca₃(PO₄)₂) permite separar y absorber agua alrededor de las partículas de arcilla reduciendo su afinidad y mejorando la cohesividad y actividad electrolítica. Además, este material reaccionaría fácilmente con las soluciones acidas producto de la contaminación ambiental, lo que permitiría modificar la estructura de la arcilla.

5. JUSTIFICACIÓN

En conformidad con lo informado por Lleras en conferencia (2014) las concesiones viales de Cuarta Generación (4G) que se desarrollan en Antioquia requieren de una inversión cercana a los 15 billones de pesos. Este tipo de proyectos tiene la finalidad de mejorar sustancialmente la conectividad de las poblaciones de este departamento, además de impulsar la economía de la región, afirmando que *“Antioquia es la más beneficiada con las concesiones viales de Cuarta Generación”* (Vicepresidencia, 2014, Sala de Prensa). Dentro del marco de desarrollo, este departamento tiene aprobado nueve (9) proyectos 4G de doble calzada, en los cuales se requieren construir, mejorar y reacondicionar aproximadamente 1173 Km de vía primaria en toda la región.

Ahora bien, la región antioqueña tiene alta presencia de arcillas expansivas en sus suelos; debido a la continua meteorización que presenta la formación geológica “el Batolito Antioqueño” (Ocampo, Hernandez, Valencia y Echeverri, 2010). El proyecto de Autopistas para la Prosperidad se sitúa mayormente sobre zonas de influencia de esta formación geológica, por lo tanto, en la preparación del terreno para la construcción de las vías se recurre a la estabilización físico-mecánica o química. Dentro de los agentes químicos convencionales se tiene el Óxido de Calcio (Cal Viva – CaO), Cloruro de Sodio (NaCl), Sulfato de Calcio dihidratado (CaSO₄*2H₂O), Cemento Portland, Asfalto, Hidróxido de Sodio (NaOH), CON-AID, Geo-Stab, etc. Por otro lado, un agente químico no convencional es la Cáscara de Huevo Pulverizada, cuya composición química mayoritaria dada por Thapon y Bourgeois en 1994 es el Carbonato de Calcio (CaCO₃) con un valor mayor al 94% de su masa total, y composición minoritaria del 1% de Carbonato de Magnesio (MgCO₃), 1% Fosfato de Tricalcico (Ca₃(PO₄)₂) y 4% en sustancias orgánicas.

Colombia hace parte de las regiones líderes en la producción de huevos en Latinoamérica y ocupa el puesto veinticinco (25) a nivel Mundial en producción, según Andrés Valencia, presidente de la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI), con una producción de 12.817 millones de huevos para el año 2016. La cáscara de un huevo tiene un peso promedio de 5,5 gramos lo que equivale a aproximadamente 704.935 toneladas de cáscaras de huevo generado anualmente, las cuales en gran cantidad terminan en los rellenos sanitarios.

Otros de los usos de esta materia se encuentran en la industria farmacéutica, de fertilizantes (como reguladores de acidez), absorción de contaminantes en aguas, etc. Visto como residuo, este producto es catalogado por la Normativa Colombiana en el numeral tres (3) contenido en el manual del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible referente a la Construcción de criterios técnicos para el aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos como “Residuos orgánicos urbanos de origen doméstico no peligroso”, sin embargo, la legislación europea considera este material como residuo peligroso debido a que una inadecuada manipulación puede ocasionar perjuicios ambientales, además hay un costo elevado por la disposición final de la misma.

En términos generales, la cáscara de huevo es un recurso aprovechable en muchos campos de la industria y con un uso potencial en la estabilización de suelos arcillosos, ya que su alto contenido de calcio intercambia el aluminio presente en la arcilla, además, reduce el agua alrededor de las partículas del suelo evitando el hinchamiento. Asimismo, el costo de la estabilización en suelos arcillosos en los proyectos viales 4G podría reducirse en un 30%.

6. MARCO TEORICO

Las propiedades fisicoquímicas de los suelos arcillosos naturales se pueden mejorar generalmente con la adición de óxido de calcio (Cal Viva – CaO), Cemento Portland, Cloruro de Calcio, Cloruro de Sodio (NaCl), Hidróxido de Sodio (NaOH), Asfalto, CON-AID, Geo-Stab, por mencionar algunos ejemplos. Actualmente, los estabilizadores convencionales como cal viva y Cemento Portland han aumentado su demanda en la industria de la construcción provocando un incremento en los costos, por lo tanto, se ha permitido probar el uso de materiales como residuos de los procesos de fabricación y residuos orgánicos urbanos de origen doméstico. Estos residuos necesitan disposición final especial para su eliminación apropiada ya que puede promover riesgos graves para la salud y el medio ambiente si no se eliminan adecuadamente. Algunos residuos de los procesos de fabricación son el polvo de mármol, ceniza volante (Fly Ash), escoria de alto horno, residuos de minería de Sulfato de Calcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), entre otros; además de residuos orgánicos como la Cáscara de Huevo. Esta revisión bibliográfica presenta los aspectos y propiedades químicas relacionadas con el uso de la cáscara de huevo pulverizada para fortalecer los suelos arcillosos naturales. La aplicabilidad está enfocada en la región antioqueña, departamento del noroeste de colombiano, debido a la influencia de arcillas expansivas en la ejecución de proyectos viales.

6.1. ESTADO DEL ARTE

Debido a la naturaleza fisicoquímica de la arcilla expansiva, el uso de agentes químicos para mejorar sus propiedades de ingeniería es común. La estabilización de un suelo expansible depende principalmente de las reacciones químicas entre el estabilizador y los minerales del suelo para lograr el efecto deseado. Este procedimiento se lleva a cabo con el objetivo de mejorar sus propiedades geotécnicas tales como compresibilidad, resistencia, permeabilidad y durabilidad. En general, los componentes de la tecnología de estabilización incluyen suelos y sus minerales y agente estabilizante o aglutinantes (Petry y Armstrong, 1989).

Los agentes químicos permiten que la arcilla requiera menos agua para satisfacer el desequilibrio de carga, haciendo difícil que el líquido se mueva dentro y fuera del sistema floculando la arcilla y provocando la aglomeración y cementación de las partículas para que no ocasione un cambio

de volumen. Si los agentes estabilizadores químicos se mezclan íntimamente con capas de suelo, puede ser adecuado aplicar medios de compactación para mejorar el peso unitario seco alcanzable después de la floculación pesada de la arcilla. La estabilización química más eficaz se produce cuando los cationes asociados con la arcilla natural se intercambian por tipos que son bivalentes o tienen características hidrofóbicas (Petry y Armstrong, 1989).

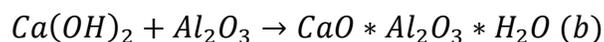
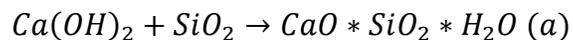
Los agentes químicos estabilizadores son materiales hidráulicos o no hidráulicos que cuando están en contacto con el agua o en presencia de minerales puzolánicos reaccionan con esta para formar materiales compuestos cementosos. Los agentes de uso común son:

6.1.1 Cal Viva (CaO)

La absorción de agua es la primera actividad que ocurre cuando la cal (particularmente cal rápida) se agrega al suelo. Eades y Grim (1960) refieren que la reacción química de cal-suelo tiene dos etapas. La primera, se conoce como tratamiento inmediato o a corto plazo, que ocurre dentro de algunas horas o días después de que se agrega la cal de acuerdo con lo sugerido por Located et al, 1990, y Abdi & Wild, 1993. En este proceso se presentan tres reacciones químicas principales, a saber: intercambio catiónico, floculación-aglomeración y carbonatación. La segunda etapa requiere varios meses o años para completarse y se considera así el tratamiento a largo plazo. La reacción puzolana es la reacción principal en esta etapa. El secado del suelo húmedo y el aumento de la capacidad de trabajo se atribuye al tratamiento inmediato, mientras que el aumento en la fuerza y la durabilidad del suelo se asocia con el tratamiento a largo plazo. (Located et al, 1990; Wild et al, 1996; Malla et al, 2004; Kassim et al, 2005, y Geiman, 2005)

La adición de cal viva al sistema de agua y suelo produce (Ca^{+2}) y (OH^-). En el intercambio catiónico, los iones de calcio bivalentes (Ca^{+2}) se sustituyen por cationes monovalentes. Los iones Ca^{+2} unen los minerales del suelo (que tienen carga negativa), reduciendo así las fuerzas de repulsión y el espesor de la capa de agua difusa. Esta capa encapsula las partículas del suelo, fortaleciendo el vínculo entre las partículas. Los aniones restantes (OH^-) en la solución son responsables del aumento de alcalinidad. (George et al, 1992; Malla et al, 2004, y Geiman, 2005).

Las siguientes ecuaciones químicas simplifican la reacción puzolánica de la cal viva con la arcilla:



Ecuación 1. Reacción química de la cal viva con componentes de la arcilla Silice SiO_2 (a) Aluminio Al_2O_3 (b). (Mallela et al, 2004; Yong & Ouhadi, 2007 y Chen & Lin, 2009).

Las reacciones puzolánicas son dependientes del tiempo y requieren largos períodos (años) debido a que tales reacciones son funciones de la temperatura, cantidad de calcio, valor de pH y el porcentaje de sílice y alúmina en los minerales del suelo (Eades & Grim, 1960 y Kassim et al, 2005).

Los factores que afectan el suelo tratado con cal viva son la cantidad agregada, el tiempo de curado, la temperatura de curado y la mineralogía del suelo. Las mezclas de cal y tierra tienen ventajas y desventajas. Entre sus ventajas se encuentran el aumento de la fuerza del suelo, la reducción de la plasticidad (aumentan la capacidad de trabajo) y el aumento de la durabilidad del suelo. Además, se observó una reducción considerable en el asentamiento de la consolidación y se mejoraron las características de compresibilidad. El comportamiento confuso fue observado para la permeabilidad de la mezcla del suelo-cal cuando estaba comparado con el suelo original. Entre las desventajas se contemplan la carbonatación, el ataque de sulfato y el impacto ambiental del suelo tratado con cal (Taha et al, 2014).

La carbonatación es la reacción que se produce entre la cal libre y el dióxido de carbono atmosférico, como se muestra en la siguiente ecuación (Umesha et al, 2009):



Ecuación 2. Reacción de carbonatación del (a) Hidróxido de Calcio $Ca(OH)_2$ (b) Oxido de Calcio (CaO)

Los autores Arman & Munfakh (1970) consideran que el Carbonato de Calcio ($CaCO_3$) es un material cementante, sin embargo, su capacidad de unión es débil en condiciones neutrales. La carbonatación es una desventaja debido a que se requiere una mayor cantidad de cal viva para lograr la cementación, lo que hace más costoso la estabilización.

6.1.2 Cemento Portland

El cemento portland es el agente vinculante más antiguo usado desde la invención de la tecnología de estabilización del suelo en 1960. Puede ser considerado como agente estabilizador primario debido a su comportamiento hidráulico (Sherwood, 1993 y EuroSoilStab, 2002). La reacción del cemento no depende de los minerales del suelo, y el papel clave es su reacción con el agua que puede estar disponible en cualquier terreno (EuroSoilStab, 2002).

En los diferentes tipos de cemento los principales constituyentes son el Silicato Tricálcico (Alita - $3CaO \cdot SiO_2$), Silicato Dicálcico (Belita - $2CaO \cdot SiO_2$), Aluminato Tricálcico ($3CaO \cdot Al_2O_3$) y Ferrialuminato Tetracalcico ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$), generalmente en la literatura de la construcción se describe como C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF , respectivamente (Circeo, 1961).

El proceso de hidratación es un proceso en el cual se produce la reacción del cemento portland. El proceso inicia cuando el cemento se mezcla con agua y otros componentes para una aplicación deseada, resultando en fenómenos de endurecimiento. El endurecimiento (ajuste) del cemento encerrará el suelo como pegamento, pero no cambiará su estructura (EuroSoilStab, 2002). La reacción de hidratación es lenta procedente de la superficie de los granos de cemento portland y el centro de los granos puede permanecer sin hidratación (Sherwood, 1993) este último es un proceso complejo con una serie de reacciones químicas desconocidas (Maclaren y blanco, 2003).

Sin embargo, este proceso puede verse afectado por:

- Presencia de materias impurezas
- Relación entre el agua y el cemento portland
- La temperatura de curado
- Presencia de aditivos
- Superficie específica de la mezcla

El hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) es otro producto de la hidratación del cemento de Portland que reacciona más lejos con los materiales puzolanicos disponibles en suelo estabilizado para producir material de cemento adicional (Sherwood, 1993). Normalmente la cantidad de cemento utilizada es pequeña pero suficiente para mejorar las propiedades de ingeniería del suelo y optimizar el intercambio catiónico de arcilla. Los suelos estabilizados con cemento tienen las siguientes propiedades mejoradas:

- Disminución de la cohesión (plasticidad)
- Disminución de la expansión o compresibilidad del volumen
- Mayor resistencia (PCA-IS, 2003).

La actividad en la investigación de cemento de suelo produjo una tercera teoría avanzada por Handy (1958): la cementación química entre el suelo arcilloso y el cemento se debe a la interacción entre los iones del hidróxido producto de la hidratación del cemento, los cuales son adsorbidos por los iones parcialmente defendidos del silicio que dan los enlaces inicialmente débiles. Con el tiempo las superficies de las partículas del suelo llegan a ser despolarizadas (activas), y los enlaces originalmente débiles se vuelen más fuertes, volviendo así la masa entera más fuerte”.

6.1.3 Sales

Los compuestos salinos se producen a partir de la neutralización de una sustancia ácida con una base. En general, en la estabilización del suelo se destacan el uso del cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) y cloruro de potasio (KCl) los cuales son sales que no poseen exceso de

iones ácidos de hidrógeno (H^+) ni tampoco básicos de hidróxilo (OH^-). (Garnica, Pérez, Góme, López y Obil, 2002). La adición de sal a un suelo arcilloso permite disminuir el límite líquido, límite plástico e índice de la plasticidad.

6.1.3.1 Cloruro de Calcio ($CaCl_2$)

La interacción de los iones de cloruro calcio con la mezcla agua-arcilla permite disminuir las fuerzas de repulsión entre las partículas de arcilla, pero hay autores que mencionan que se incrementa la cohesión debido a la interacción eléctrica ejercida en el agua que rodea las partículas. Sin embargo, la reducción de las fuerzas de repulsión está dada por el intercambio catiónico, es decir que se sustituye un (1) ión Ca^{++} por dos (2) iones Na^+ , por lo que se reducirá el potencial eléctrico (Garnica, Pérez, Gómes, López y Obil, 2002).

El cloruro de calcio en solución está más cargado de iones de calcio que la cal viva y promueve rápidamente las reacciones de intercambio del catiónico (Muthy, 1998), esta sal es eficaz en suelos con las arcillas de la celosía que se expanden (Mitchell y Radd, 1973). El cloruro de calcio tiene característica higroscópica, esto significa que este compuesto absorbe agua.

Según Bushan, Freeman y Hoppe (2004), “el cloruro de calcio se ha utilizado como supresor del polvo, pero también se usa como estabilizador debido a su capacidad de alterar características materiales tales como fuerza, compresibilidad, y permeabilidad. Esencialmente, la función de este producto químico es aglomerar partículas finas”.

6.1.3.2 Cloruro de Sodio ($NaCl$)

El cloruro de sodio ($NaCl$) es una sustancia química que se presenta en forma cristalina, la cual al entrar en contacto con el agua se ioniza. Esta sal al igual que el $CaCl_2$; es un compuesto higroscópico. La capacidad de ionización del cloruro de sodio en el agua permite que en la humedad circundante a la partícula de arcilla haya una transferencia de iones de sodio hacia su matriz, promoviendo la disminución de la permeabilidad y aumentando la resistencia del suelo arcilloso. Según Roldan (2010), al adicionar esta sal a un suelo arcilloso se produce una reducción en la formación de capa superficial, encogimiento volumétrico y disminución de la humedad.

6.1.4 Hidróxido de Sodio ($NaOH$)

Davidson, Mateos y Katti, (1959) argumentan que la adición de una pequeña cantidad de hidróxido sódico ($NaOH$) a algunas arcillas activa la acción estabilizadora de cal. El hidróxido de sodio ($NaOH$) reacciona con material de sílice para producir silicato de sodio. El silicato de

sodio reacciona posteriormente con cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar hidróxido sódico (NaOH) y silicatos de calcio insoluble de cemento. La cantidad de iones (OH^-) aumenta debido a la presencia de NaOH y estos aceleran las reacciones puzolana aumentando la solubilidad del material de silicio en la arcilla.

Los resultados mostrados por Davidson, Mateos y Katti evidencian que las soluciones de hidróxido de sodio y potasio causan dispersión de la arcilla, agregados debilitados y reducción de la conductividad hidráulica saturada de los suelos especialmente a altas concentraciones. El estudio también mostró que la destrucción observada de la estabilidad estructural del terreno fue mayor en suelos arenosos en comparación con suelos arcillosos (Nyamangara, Munotengwa, Nyamugafata y Nyamadzawo, 2007).

El hidróxido de sodio y potasio afectan la estabilidad agregada y la dispersión de arcilla de diversas maneras:

(a) El desplazamiento de cationes multivalentes de sitios de intercambio por Na^+ promueve la dispersión y no permite el atascamiento de partículas del suelo.

(b) La capa doble difusa aumenta por la concentración creciente de cationes monovalentes, debido a su mayor radio de hidratación.

(c) Los cationes monovalentes debilitan la interacción catiónica del agua debido a sus radios de mayor hidratación que no permiten que las partículas se acerquen para que los momentos dipolares actúen (Chidyal y Tripathi, 1987).

Los pH altos de las soluciones de hidróxidos aumentan la carga negativa neta en el suelo dando como resultado crecientes repulsiones inter-partículas (Oades, 1984).

6.1.5 Fly Ash (Cenizas Volantes)

La ceniza volante también se utiliza como estabilizador del suelo para modificar las propiedades fisicoquímicas, así como producir una ganancia de fuerza rápida en terrenos inestables como la arcilla (White, 2005). Las cenizas volantes contienen cantidades sustanciales de dióxido de silicio (SiO_2) (ambos amorfos y cristalinos), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de calcio (CaO), los cuales son altamente reactivos en presencia de agua.

En los trabajos de Usmen & Bowders (1990) y Nicholson & Kashyap (1993), se afirma que se presentan dos reacciones:

- **Reacción corta:** es cuando las partículas de arcilla presentan intercambio de iones con las partículas de la superficie del suelo, causando floculación y aglomeración, permitiendo mejorar el hinchamiento, la contracción y plasticidad.

- **Reacción larga:** esta reacción química está relacionada con la resistencia que puede lograr el suelo arcilloso, lo cual depende de las reacciones de hidratación de los silicatos y aluminatos.

6.1.6 Escoria Granulado de Alto Horno

Para Sherwood (1995) las escorias granuladas de alto horno son un material con características cementantes, subproducto de la fabricación del hierro que se forma por la combinación de componentes silíceos del hierro y de roca caliza.

Generalmente la composición química de este material es muy similar a la del cemento portland, lo que le permite tener un comportamiento hidráulico al interactuar con la humedad del suelo, por lo tanto, su empleo en la estabilización genera un incremento de la resistencia. De acuerdo con Ozyildirim (1990), para aumentar la resistencia intervienen cinco (5) factores en la estabilización: la composición química, concentración álcali del sistema reactivo, el contenido de cristal, la finesa de la escoria y temperatura durante la primera parte del proceso de hidratación.

Los principales componentes de la escoria de alto horno son CaO (30-50%), SiO₂ (28-38%), Al₂O₃ (8-24%) y MgO (1-18%). En general, al incrementar el contenido de CaO en la escoria eleva su basicidad y la resistencia a la compresión. El MgO y Al₂O₃ contenido muestran la misma tendencia hasta 10-12% y 14% respectivamente, más allá del cual no se puede obtener una mejora adicional.

Otra propiedad en la estabilización de un suelo arcilloso es disminuir la permeabilidad, esta dependerá de la cantidad de escoria utilizada que pueda alterar el tamaño de los poros asociado con la formación de silicato de calcio hidratados, durante la reacción de hidratación.

6.1.7 Residuos de minería de Yeso (Sulfato de Calcio dihidratado - CaSO₄*2H₂O)

El yeso fue utilizado como estabilizador para mejorar las propiedades de algunas arcillas en trabajos realizados al suroeste de Sivas. Según lo divulgado por Yilmaz & Sendir (2002), Yilmaz (2007), y Yilmaz & Yuksek (2008); las determinaciones microscópicas sobre el yeso revelaron que este material contiene arcilla muy baja, calcita y anhidrita. El valor medio obtenido del peso unitario del yeso estudiado 22,9 kN/m³ fue muy cercano al peso unitario de yeso puro propuesto 22,7 kN/m³ por Deer (1962).

En los trabajos de Yilmaz & Civelekoglu (2009), se reporta la disminución en el límite de líquido y el índice de plasticidad en muestras tratadas con yeso. Los estudios demuestran que la disminución del límite líquido y el índice de la plasticidad de la bentonita mezclada con el yeso del 5% eran 33,7% y 33,6%, respectivamente; evidenciando una mejoría en la estabilidad del suelo. El reemplazo del sodio monovalente por los iones del calcio condujo a una reducción

marcada en el grueso difuso de la capa doble que conducía a la disminución del límite líquido y del límite plástico.

Para López, Ascanio y Guerrero (2003), al usar yeso pulverizado en la construcción de una presa este presenta buena solubilidad permitiendo mejorar la resistencia del suelo a un costo relativamente bajo.

6.1.8 Estabilización con Asfalto

Como explica Baxter (1972), “el efecto estabilizador del suelo asfáltico consiste en que los glóbulos asfálticos de tamaños microscópicos permanecen suspendidos en agua sin ninguna fusión, pero estos si aglomeran las partículas de arcilla. Sin embargo, el estabilizador debe almacenarse y utilizarse a una temperatura por encima de la congelación. La congelación hace que el asfalto se asiente fuera de la emulsión y se vuelva inutilizable. Cuando el estabilizador se mezcla en un suelo arcilloso en presencia de agua, el agua transporta los glóbulos asfálticos y permite el contacto directo con la superficie de las partículas de arcilla”.

Puesto que la capacidad de carga de agua de la arcilla muchas veces excede la de la arena y las pequeñas partículas de roca, prácticamente todo el asfalto es puesto en estrecho contacto con la arcilla. A medida que avanza la evaporación de los agentes diluyente, los glóbulos asfálticos se disgregan en muy finas partículas que forman una capa prácticamente sólida cubriendo la capa superficial de la arcilla. La cantidad requerida para cubrir las partículas de arcilla es mínima en comparación con la mayoría de las otras partículas de recubrimiento. La capa es tan delgada que el suelo se oscurece sólo muy levemente. Cuando está completamente seca, la masa entera de la arcilla tratada con la emulsión del asfalto tiene una fuerza compresiva mejorada que el suelo no tratado secado mezclado con el agua solamente (Baxter, 1972).

Por otra parte, según Kimmons y Matteson (1968), el estabilizador del asfalto no disminuye las cualidades cohesivas de las partículas de la arcilla en el suelo. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, como las películas de asfalto son repelentes al agua, la arcilla no puede mojarse y volver a la tierra al estado de barro. Una cierta absorción de agua puede ocurrir sobre la exposición prolongada, pero las partículas finas de la arcilla no se amplían y pierden la cohesión en presencia de tal humedad.

6.1.9 Estabilización con compuestos Químicos en estado líquido

6.1.9.1 CON-AID (Argentina): Para Abadjieva (2011) y Ali (2012) los productos químicos líquidos formados tales como CON-AID, de cloruro de la colina y bicarbonato de colina y cloruro de potasio entre otros se han utilizado como añadidos o estabilizadores en la mejora de las características de la ingeniería de suelos especialmente arcillosos en vez de los añadidos químicos sólidos prevalentes tales como cal, cemento o cenizas volantes entre otros. Estos líquidos son químicamente no tóxicos y respetuosos del medio ambiente. Basándose en los

resultados obtenidos en el uso de estos estabilizadores líquidos, se pueden realizar las siguientes conclusiones:

- A. Reduce plasticidad y contracción eliminando la reabsorción de las moléculas de agua.
- B. Reduce el contenido óptimo de la humedad ionizando e intercambiando las moléculas de agua en la superficie de la arcilla.
- C. Aumenta la densidad seca máxima neutralizando y ordenando nuevamente las plaquetas de arcilla.
- D. Aumenta la fuerza compresiva al incrementar la unión entre partículas. Además de los resultados alentadores obtenidos con un buen rendimiento en los estabilizadores líquidos, estos productos no están disponibles localmente.

6.1.9.2 Geo-Stab (Colombia)

El Geo-Stab es un líquido miscible en agua, que se ioniza permitiendo la reacción de intercambio de cationes adheridos a las partículas del suelo arcilloso. La reacción química por parte de este líquido ocasiona que la arcilla disminuya su capacidad de aumentar su hinchamiento por causa del agua adsorbida. Una característica importante de esta reacción que permanece en el tiempo y con un carácter irreversible (Comunicaciones Publicas Colombia, 2016).

Según la empresa HYDRAM LTDA (2017), el Geo-Stab se caracteriza por reducir la humedad y permeabilidad de la arcilla, también, aumenta la densidad y la resistencia del suelo. Por otro lado, este producto permite disminuir el tiempo y los costos de sostenimiento de las vías.

6.1.10 Polvo de Mármol

El mármol es una Roca Metamórfica compuesta generalmente de carbonato de calcio y magnesio (dolomita), clasificada como una caliza modificada por temperatura, presión y erosión.

El polvo de mármol es un producto de desecho fácilmente disponible obtenido durante los procesos de corte y molienda de las piezas de mármol. También, se ha utilizado como componente en concreto del cemento, morteros y en la lechada de la resina, así como el llenador.

En el estudio “STABILIZATION OF EXPANSIVE SOILS USING WASTE MARBLE DUST” (Estabilización de suelos expansivos usando polvo de mármol, 2009), se evaluó la idoneidad de residuos de polvo de roca caliza y residuos de polvo de mármol dolomítica como estabilizadores para el potencial de hinchamiento de un suelo expansivo. De acuerdo con los datos de las pruebas, se concluyó que la adición de residuos de polvo de roca caliza y residuos de polvo de mármol dolomítico permitió reducir el límite líquido, índice de plasticidad y el índice de contracción, lo que se traduce en un aumento del límite de contracción de la muestra (Baser, 2009).

Sin embargo, tanto los residuos de polvo de roca caliza como el polvo de mármol dolomítico pueden utilizarse como estabilizantes para suelos expansivos. Pero, la eficacia de los estabilizantes depende de su contenido químico.

El polvo de mármol cumple la función de absorber el exceso de agua alrededor de la partícula de arcilla, haciendo que el proceso de hinchamiento se ha menos efectivo. Además, el mármol al tener una composición de carbonatos mayor al 90% es susceptible al ataque de ácido presente en el suelo arcilloso o a la acidez generado por la lluvia, por lo tanto, los iones calcio quedan libres para ser intercambiados por el aluminio, compactando el suelo y haciéndolo más estable y duradero, con la desventaja que este proceso es lento.

6.1.11 Cáscara de Huevo Pulverizada

En Colombia, la cáscara de huevo aún no reporta casos de su uso como agente químico estabilizador de suelos arcillosos en la construcción de vías primarias, secundarias y terciarias. La generación de los residuos de este producto en el país supera las cien mil toneladas al año, siendo así una cantidad considerable para la aplicación en la estabilización de un suelo; esto permite la posibilidad de innovar y dar los primeros pasos en el uso efectivo de este residuo no aprovechable. Como se menciona anteriormente, en la estabilización química con mármol pulverizado, se describe que este producto tiene una composición química principal de carbonatos; de igual forma la cáscara de huevo, tiene una composición mineralógica caracterizada por la presencia de carbonatos y fosfatos que a su vez están en forma de nanopartículas debido al proceso biológico de las aves en especial la gallina. Por lo tanto, se sugiere que la cáscara de huevo pulverizada podría ser un agente muy rentable en la estabilización de los suelos arcillosos.

El objetivo principal de utilizar la cáscara de huevo pulverizada (por sus siglas en inglés Eggshell power - ESP), es hacer que el suelo arcilloso plástico se estabilice a un menor costo (James y Pandian, 2013). El autor Amu (2005) estudió el uso de ESP como sustituto en la estabilización con cal viva. Para tal objetivo, realizó ensayos variando el porcentaje óptimo de cal viva y reemplazándola con un porcentaje óptimo de ESP. Resultados de este trabajo permiten concluir que el rendimiento de la estabilización de cal viva sustituido por ESP son similares a los obtenidos usando cal viva. En este contexto, la ESP se puede utilizar como un sustituto sin mucha pérdida en la fuerza, resultando en una disminución en el costo de estabilización (James y Pandian, 2013). La adición de ESP ha modificado y corregido el suelo positivamente mejorando las características y por lo tanto su uso en la estabilización del suelo arcilloso plástico se puede recomendar con otros estudios relacionados sobre sus otras características tales como absorción de agua, permeabilidad, etc. (James y Pandian, 2013).

Por otro lado, en Japón los geofísicos Croft, McGeory y Carlson (1999), realizaron estudios sobre el uso de cáscara de huevo pulverizada para estabilizar los suelos no adherentes debido a los costos que tienen agentes estabilizadores como la cal viva y la brea. La investigación ha demostrado que la cáscara de huevo es una fuente rica en cal agrícola y de proteína de modo que pueda ser utilizada como alternativa de agente estabilizador del suelo arcilloso gracias a la presencia de carbonatos y fosfatos. Generalmente, la cal agrícola (CaCO_3) es utilizada como fuente de calcio, lo que permite una reducción en los niveles de acidez; por su parte la cáscara de huevo demostró contener una cantidad considerable de esta cal.

Se describen los siguientes postulados de diferentes autores:

- De acuerdo con Kumar y Tamilarasan (2014), quienes estudiaron muestras de suelo recolectadas y estabilizadas con cáscara de huevo, las cuales fueron pulverizadas en proporciones de 0,5% a 5,5% en intervalos de 0,5, concluyeron que este material usado como aditivo mejorará la fuerza de los suelos; sin embargo, el uso de cantidades superiores al 3% (Fig. 1 y 2) no produce resultados óptimos.

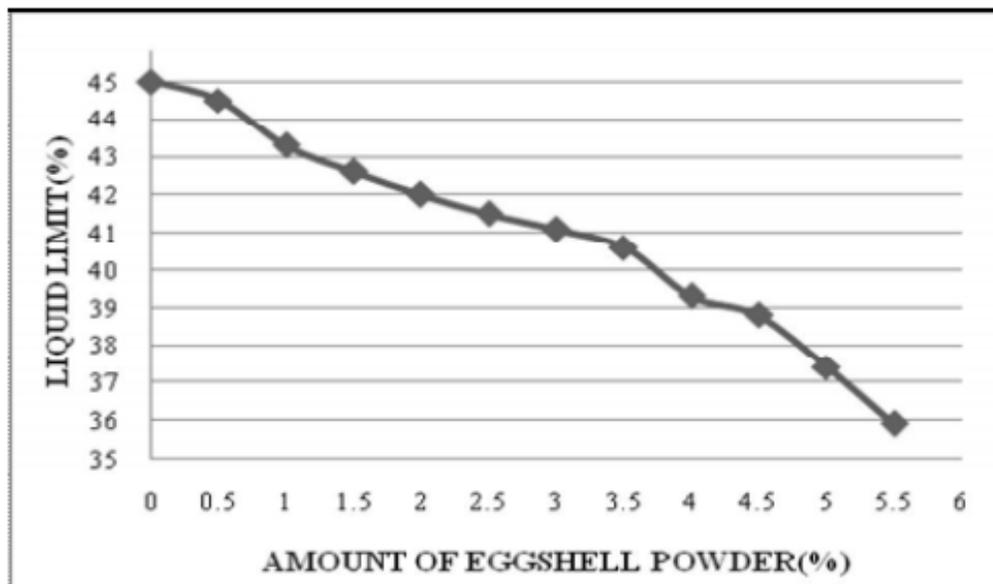


Figura 1. Variación del Límite Líquido al adicionar Cáscara de Huevo Pulverizada (Kumar y Tamilarasam, 2014)

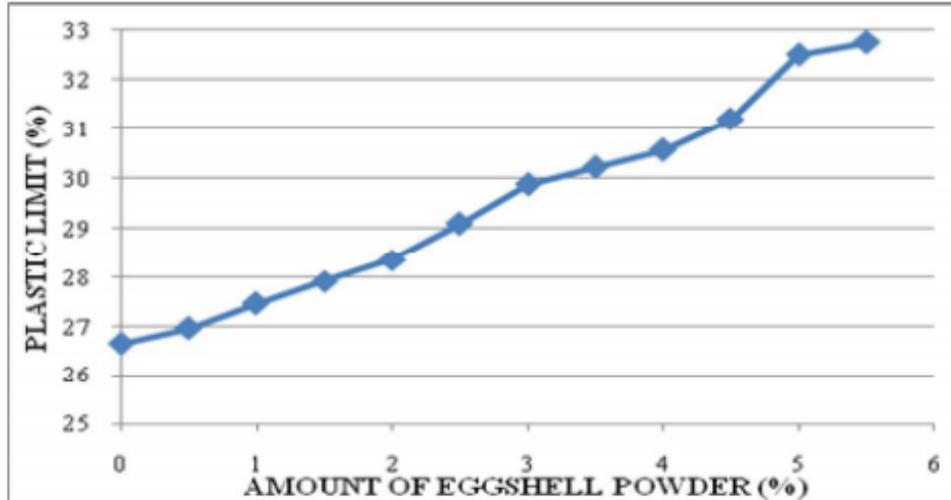


Figura 2. Variación del Limite Plástico al adicionar Cáscara de Huevo Pulverizada (Kumar y Tamilarasam, 2014)

- Resultados similares reportan, los investigadores James y Kasinatha (2013), quienes determinaron que la adición de ESP reflejó una disminución en el límite líquido del suelo de 67% a 54% al adicionar el 20% de ESP (*Fig. 3*), además, el límite de contracción del suelo aumentó del 10,2% al 13,6% (*Fig. 4*). El efecto de la ESP en el índice de hinchamiento libre del suelo fue positivo, con una disminución del 60% al 44% con la adición de un 20% de ESP (*Fig. 5*). Las propiedades de disminución de hinchamiento del suelo mostraron una mejora notable con la adición de ESP. La densidad seca máxima del suelo aumentó de 17,1 kN/m² a 17,69 kN/m² y el contenido óptimo de humedad disminuyó de 17,5 a 16,2% (*Fig. 6*) por otro lado la resistencia del suelo aumentó de 215 kN/m² a 304 kN/m² con una adición de 30% de ESP (*Fig.7*). La compresibilidad del suelo también se redujo debido a la naturaleza granular de la ESP. Por lo tanto, la adición de ESP al suelo se puede considerar como una alternativa ya que mejora las propiedades del suelo en distintos aspectos.

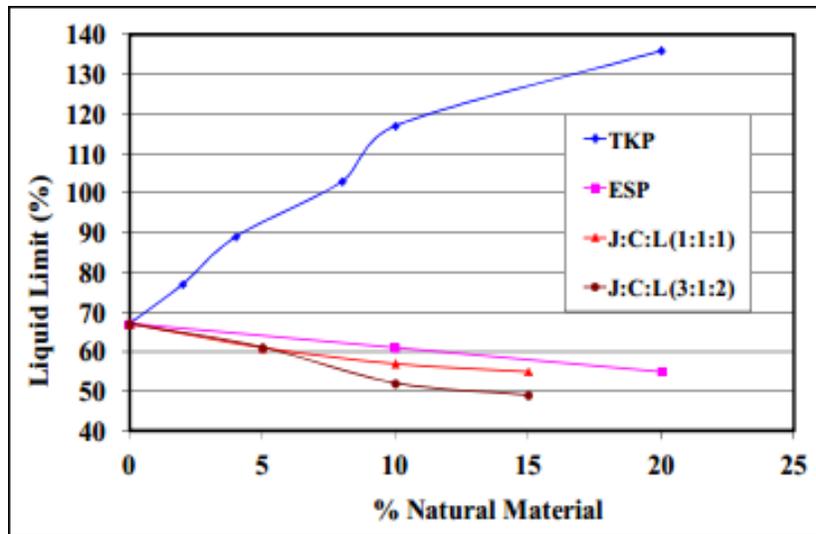


Figura 3. Comparación de Variación del Limite Plástico (Liquid Limit) del Suelo mezclado con Materiales Naturales Natural Material) como el ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), TKP (Tamarind Kernel Powder – Semilla de Tamarindo Pulverizada), J (Jaggery), C (Chebula) y Lime (Cal), (James y Kasinatha, 2013)

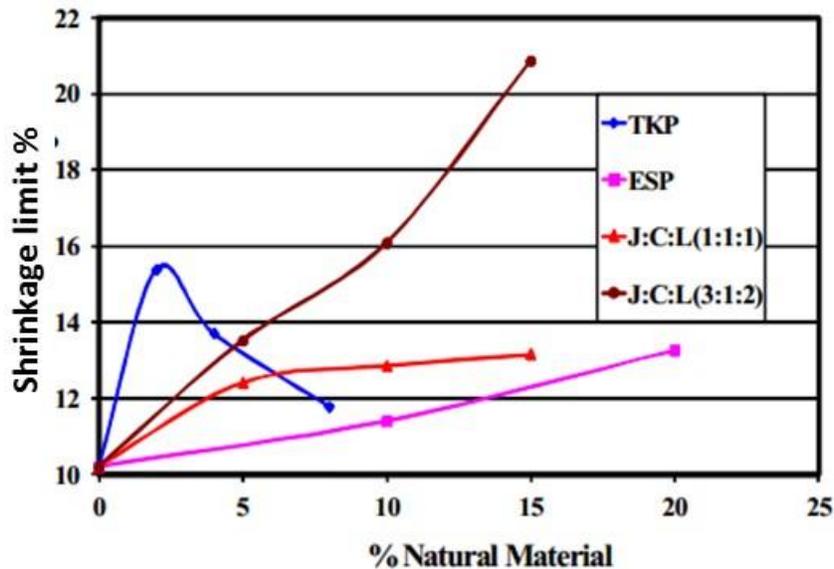


Figura 4. Comparación de Variación de Contracción del Suelo (Shrinkage limit) mezclado con Materiales Naturales (Natural Material) como el ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), TKP (Tamarind Kernel Powder – Semilla de Tamarindo Pulverizada), J (Jaggery), C (Chebula) y Lime (Cal), (James y Kasinatha, 2013)

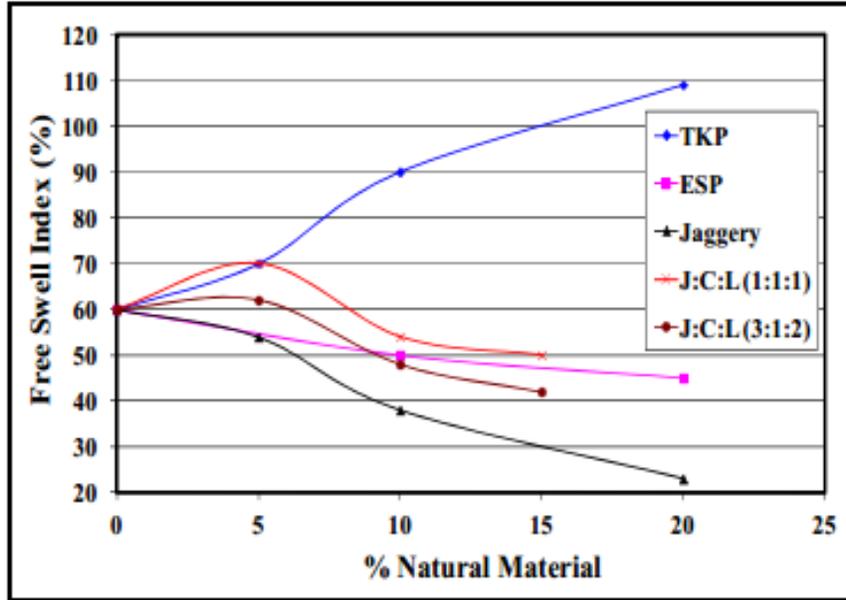


Figura 5. Comparación de la Variación del Índice de Hinchamiento Libre (Free Swell Index) de Suelo Mezclado con Materiales Naturales (Natural Material) como el ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), TKP (Tamarind Kernel Powder – Semilla de Tamarindo Pulverizada), J (Jaggery), C (Chebula) y Lime (Cal) (James y Kasinatha, 2013)

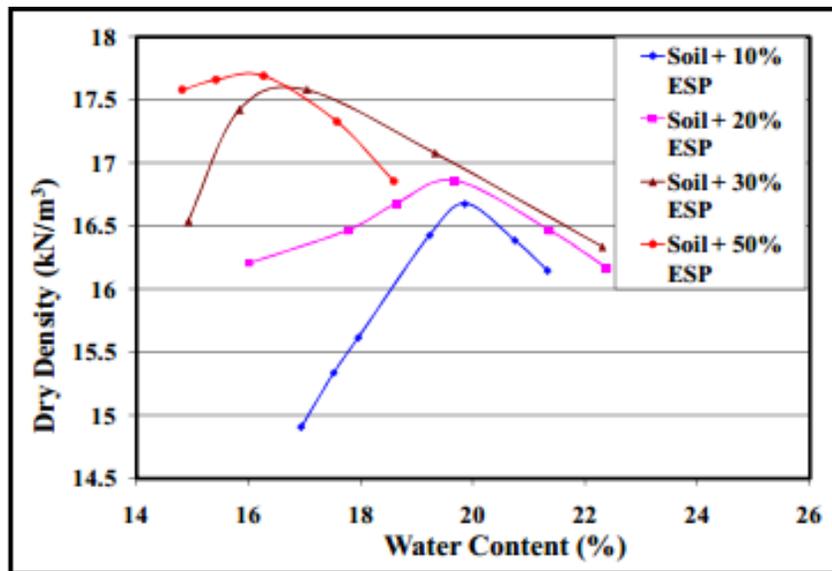


Figura 6. Curvas Comparativas por Suelo mezclado con la Variación en porcentaje de ESP (Eggshell power – Cáscara de Huevo Pulverizada), (James y Kasinatha, 2013)

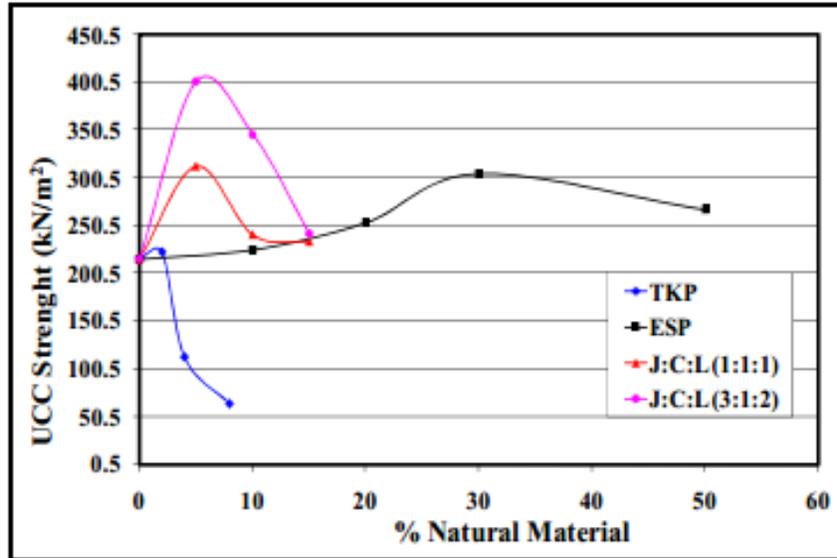


Figura 7. Comparación de Fuerza de Compresión sin Limites (UCC Strength) de todos los materiales naturales (Natural Material), (James y Kasinatha, 2013)

- Los autores Barazesh, Saba, Gharib y Yousefi (2012), presentan el estudio del efecto del polvo de cáscara de huevo sobre las propiedades de la plasticidad del suelo. Estos autores realizaron experimentos del límite líquido y plasticidad en muestras de suelo con índices primarios de plasticidad igual a 26, 31, 35, 39 y 45 usando diferentes proporciones de aditivos (1-25% en peso). Lograron concluir, que la adición de polvo de cáscara de huevo a los especímenes de suelo expansivos redujo el índice de plasticidad en las mezclas. Esta disminución conlleva una pendiente relativamente nítida en todos los especímenes que indicaban el efecto significativo del polvo de cáscara de huevo en el índice de plasticidad de los suelos arcillosos. Las diferentes proporciones de cáscara de huevo pulverizada agregadas a las muestras de suelo dieron lugar a disminuciones en el límite líquido en las muestras de modo que, en el suelo con índices primarios de la plasticidad 39 y 45, la mezcla de la cáscara de huevo ocasionó índices crecientes de la plasticidad. Sin embargo, el mismo índice disminuyó en algunas muestras. Además, las proporciones más bajas de la mezcla del polvo de cáscara de huevo con el suelo dieron lugar a mayores variaciones en el Índice de la plasticidad mientras que los porcentajes más altos no revelaron un cambio significativo en los índices.

- En el 2016, el grupo de ingenieros civiles conformado por Prasad, Mathachan, James y Justine, investigaron el efecto del curado en el suelo estabilizado con cáscara de huevo concluyendo, que este material se puede utilizar para mejorar perceptiblemente la fuerza del suelo. El resultado de la prueba compresiva no confinada con cáscara de huevo como agente estabilizador en los porcentajes de 10%, 15% y 20% después de 0, 4 y 7 días de tratamiento demostró, que la fuerza de compresión aumenta hasta un valor de 196 debido a la adición del

15% de cáscara después del curado a siete (7) días, a diferencia del 20% de adición de cáscara de huevo que se redujo drásticamente (Fig. 8). Por otro lado, se observó un cambio mínimo en el contenido óptimo de humedad, que fue del 15%, el cual se considera como un porcentaje óptimo.

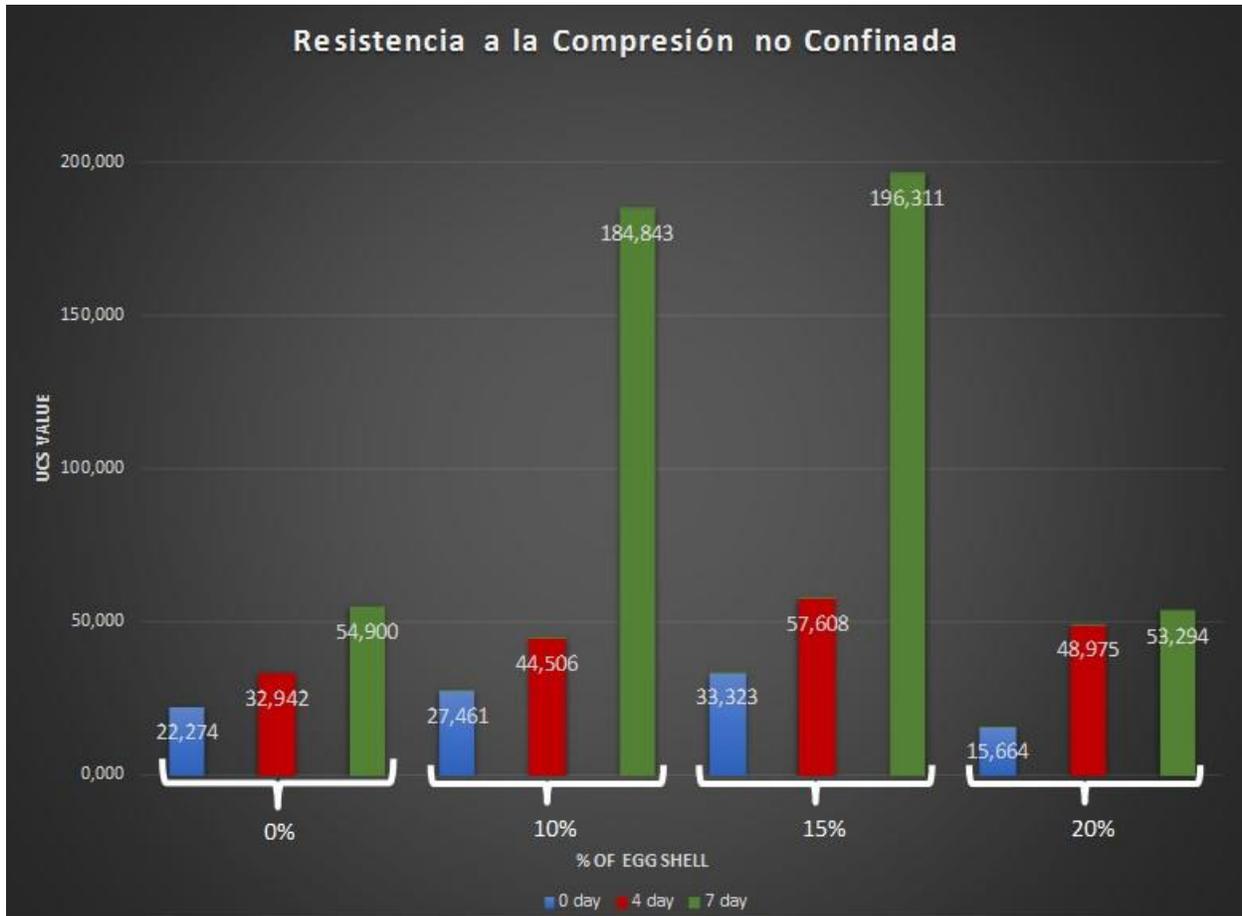


Figura 8. Gráfico de barras que muestra la variación de la fuerza de compresión, (Prasad, Mathachan, James y Justine, 2016)

A continuación, se describen estudios realizados sobre estabilización de suelos arcilloso con cáscara de huevo pulverizada mezclada con otro agente químico estabilizador:

- Amu, Fajobi y Oke (2005), recolectaron muestras en el estado de Gbogan en Nigeria, con el objetivo de estudiar el efecto de (ESP) sobre el potencial estabilizador de la cal viva en un suelo arcilloso expansivo. Realizaron ensayos para determinar la cantidad óptima de cal viva y el porcentaje óptimo de combinación cal viva-ESP; además, la cantidad óptima de cal viva se sustituyó gradualmente por cáscara de huevo pulverizada. Las mezclas estabilizadas con cal y estabilizada con cal viva-ESP se sometieron a pruebas de ingeniería. Los resultados mostraron que el porcentaje óptimo de combinación de cal viva-ESP se alcanzó en una relación de 4% de

ESP y 3% de cal viva, lo cual sirvió de control. Sin embargo, los resultados de la Densidad Seca Máxima (MDD), Coeficiente de Cobertura de California (CBR), prueba de compresión no confinada y ensayo de fuerza de cizallamiento triaxial no drenado indicaron que la estabilización de la cal viva al 7% es mejor que la combinación de 4% de ESP más 3% de cal viva.

- En el artículo “Characteristics of Stabilized Shrink-Swell Deposits Using Eggshell Powder” (Características de Depósitos Estabilizados de Shrink-Swell Utilizando Cáscara de Huevo Pulverizada) se exploró el efecto del óxido de calcio (CaO) contenido en la cáscara del huevo y su aplicación en la estabilización de suelos expansivos. El 4% y 8% en peso de polvo de cáscara de huevo se mezclaron con masas iguales de dos muestras de suelo diferentes de Dodowa (DD) y Adalekope (AD) en Ghana. Las muestras se caracterizaron por fluorescencia de rayos X (XRF), análisis de índice de plasticidad (PI), índice de hinchamiento libre (FSI), prueba de pH y prueba de clasificación. Los resultados de fluorescencia de rayos X mostraron que la cáscara de huevo contiene aproximadamente 52% en peso de CaO, que es en gran parte responsable de la estabilización del suelo. La muestra mezclada con 8% en peso de polvo de cáscara de huevo muestra una disminución PI, FSI y una alta fracción limo/arcilla. Los resultados obtenidos se han discutido y pueden influir en la aplicación de polvos de cáscara de huevo para la estabilización a gran escala de suelos expansivos.

- Por otro lado, los autores Anu, Anumol, Moideen, Jiksymol y Alka (2014), realizaron un estudio sobre el mejoramiento de suelo arcilloso con Cáscara de Huevo Pulverizada (ESP) y Polvo de Mina (por sus siglas en inglés Quarry Dust - QD), para tal motivo, estos dos materiales fueron tamizados usando un tamiz 200 (75 μ), con el objetivo de alcanzar un material de partículas finas uniformadas. La gravedad específica del polvo de cáscara de huevo usado fue 1,32 y el del polvo de mina 2.89. En el marco de los ensayos, primero se evaluó la influencia del polvo de cáscara de huevo variando los porcentajes de adición del material que iban de 0 a 30%, lo que resultó en una disminución considerable en los límites de Atterberg a medida que se aumenta el porcentaje, finalmente después del 20% el valor parece ser casi constante. Al determinar que el 20% es la cantidad óptima, se procede adicionar cantidades de 10, 20 y 30% de polvo de mina, con el fin de reducir los límites de Atterberg. Por lo tanto, se concluye que los límites de Atterberg disminuyen considerablemente con la adición del porcentaje óptimo de ESP (*Fig. 9*) y QD (*Fig. 10*). En el índice de plasticidad (PI) es casi constante para el 20% y el 30% QD con el porcentaje óptimo de cáscara del huevo. Por lo tanto, el 20% ESP y 30% QD se selecciona como porcentaje óptimo.

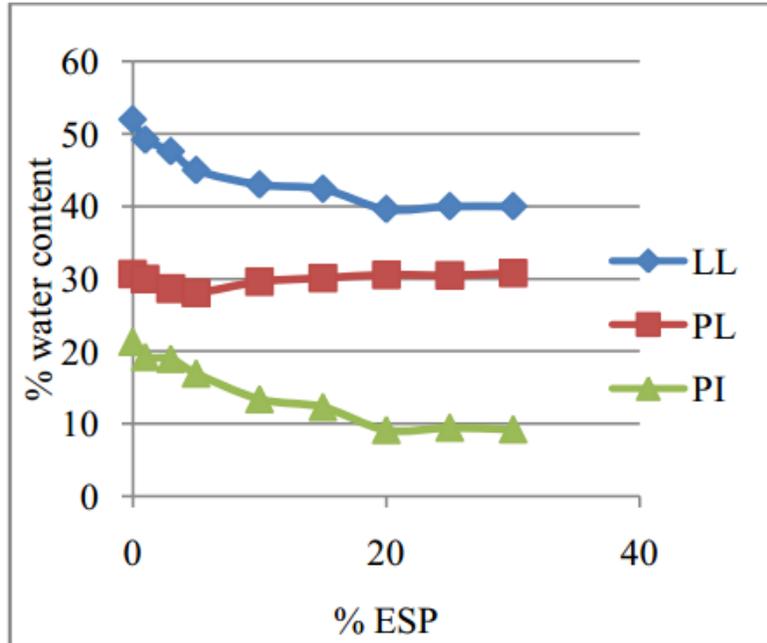


Figura 9. Gráfico de Variación de Limite Liquido (LL), Limite de Plasticidad (PL) y Índice de Plasticidad (PI) con Variación del Porcentaje de ESP, (Anu, Anumol, Moideen, Jiksymol y Alka, 2014)

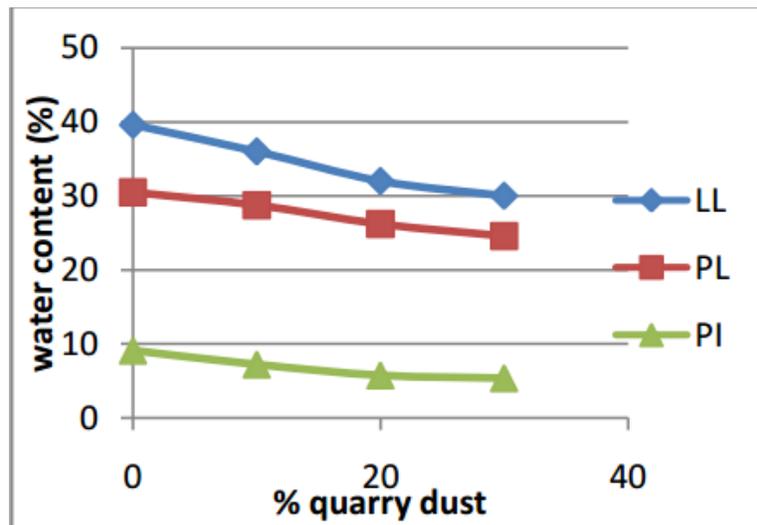


Figura 10. Gráfico de Variación de Límite Liquido (LL), Límite de Plasticidad (PL) e Índice de Plasticidad (PI) con Variación del Porcentaje de QD, (Anu, Anumol, Moideen, Jiksymol y Alka, 2014)

La adición de cáscara de huevo pulverizada da lugar a la disminución del límite de líquido del suelo de 67% a 38% para la adición de 70% ESP (*Fig. 11*). El límite de contracción del suelo aumentó de 10,2% a 13,6% (*Fig. 11*). El efecto de ESP sobre el índice de hinchamiento libre del suelo fue positivo disminuyendo del 60% al 29% sobre la adición de 25% ESP. Las características del encogimiento del suelo demostraron una mejora marcada sobre la adición de ESP. La densidad máxima seca del suelo aumentó de 17.1 kN/m² a kN/m² y el contenido óptimo de humedad disminuyó de 17,5 a 16,2% en adición de ESP (*Fig. 11*). La compresibilidad del suelo también redujo debido a la naturaleza granular de ESP. Así la adición de ESP a la tierra se puede optar por considerar la mejora en las propiedades del suelo en todos los frentes (James y Kasinatha, 2013).

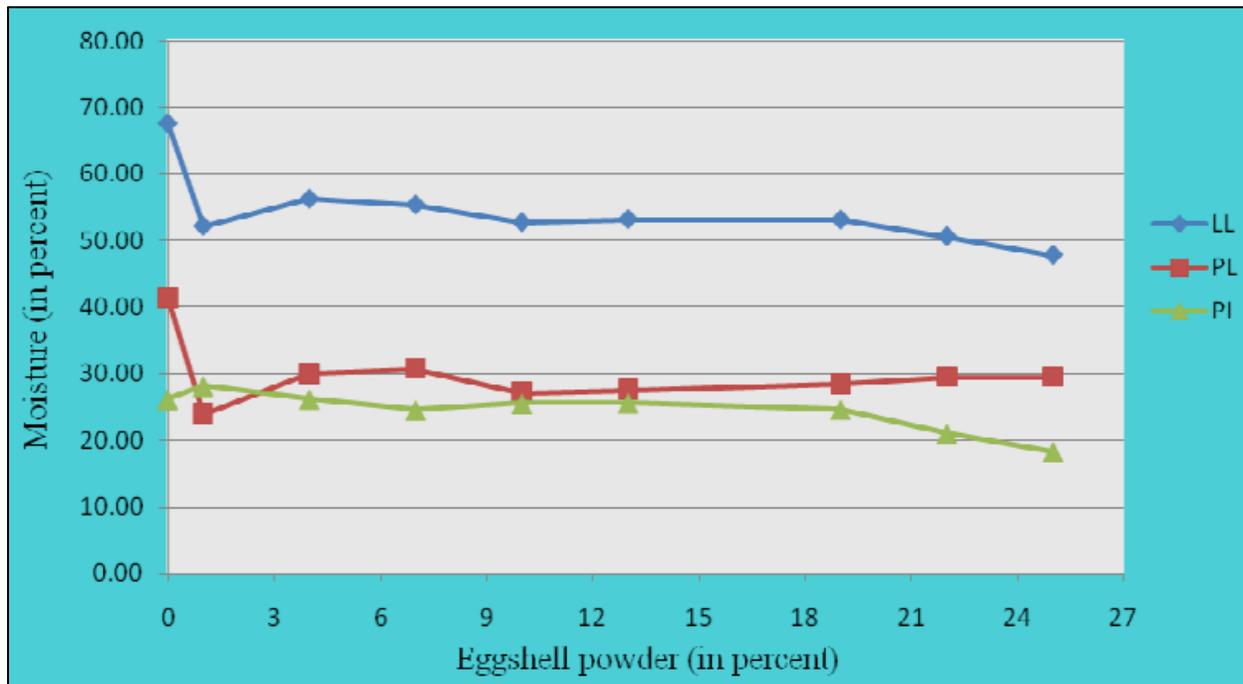


Figura 11. Efecto de varios porcentajes en peso de la cáscara de huevo pulverizada sobre propiedades de plasticidad en especímenes de suelo con índice de plasticidad primaria (James y Kasinatha, 2013).

El cambio de la succión matricial y osmótica debida a la estabilización química afectaría al comportamiento del cambio de volumen de la arcilla expansiva.

Algunos anti-aglomerantes tienen una estructura porosa fina, con su alto grado de porosidad, que puede adsorber la aglomeración de la humedad, para evitar la acumulación de aglomeración de otros materiales absorbentes.

El fondo químico de la interacción hidrófoba es principalmente un efecto entrópico que se origina de la interrupción de los enlaces de hidrógeno altamente dinámicos entre las moléculas

de agua líquida por el soluto no polar que forma una estructura parecida al caltrato alrededor de las moléculas no polares. Esta estructura formada es más ordenada que las moléculas de agua libres debido a que las moléculas de agua se organizan para interactuar lo más posible con ellas mismas y, por lo tanto, dan lugar a un estado entrópico más alto que provoca que las moléculas no polares se agrupan para reducir la superficie expuesta para regar y disminuir la entropía del sistema (James y Kasinatha, 2013).

6.2 PROYECTOS VIALES EN COLOMBIA – VÍAS 4G

En el año 2013, el Gobierno Nacional por medio del Ministerio de Transporte y de la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) ha definido un plan para apalancar el crecimiento económico, las Concesiones Viales de Cuarta Generación; este programa se llevará a cabo en gran parte del territorio colombiano (*Fig. 12*), y con esto se espera lograr la modernización de la infraestructura vial del país que tiene un rezago que perturba la competitividad. Algunos factores de impacto que impulsan el desarrollo de estos proyectos son el aumento de la competitividad, la inversión extranjera, generación de más mano de obra, reducción de los costos logísticos y aumento de la calidad de vida de los colombianos, que se podrán movilizar más rápidamente.

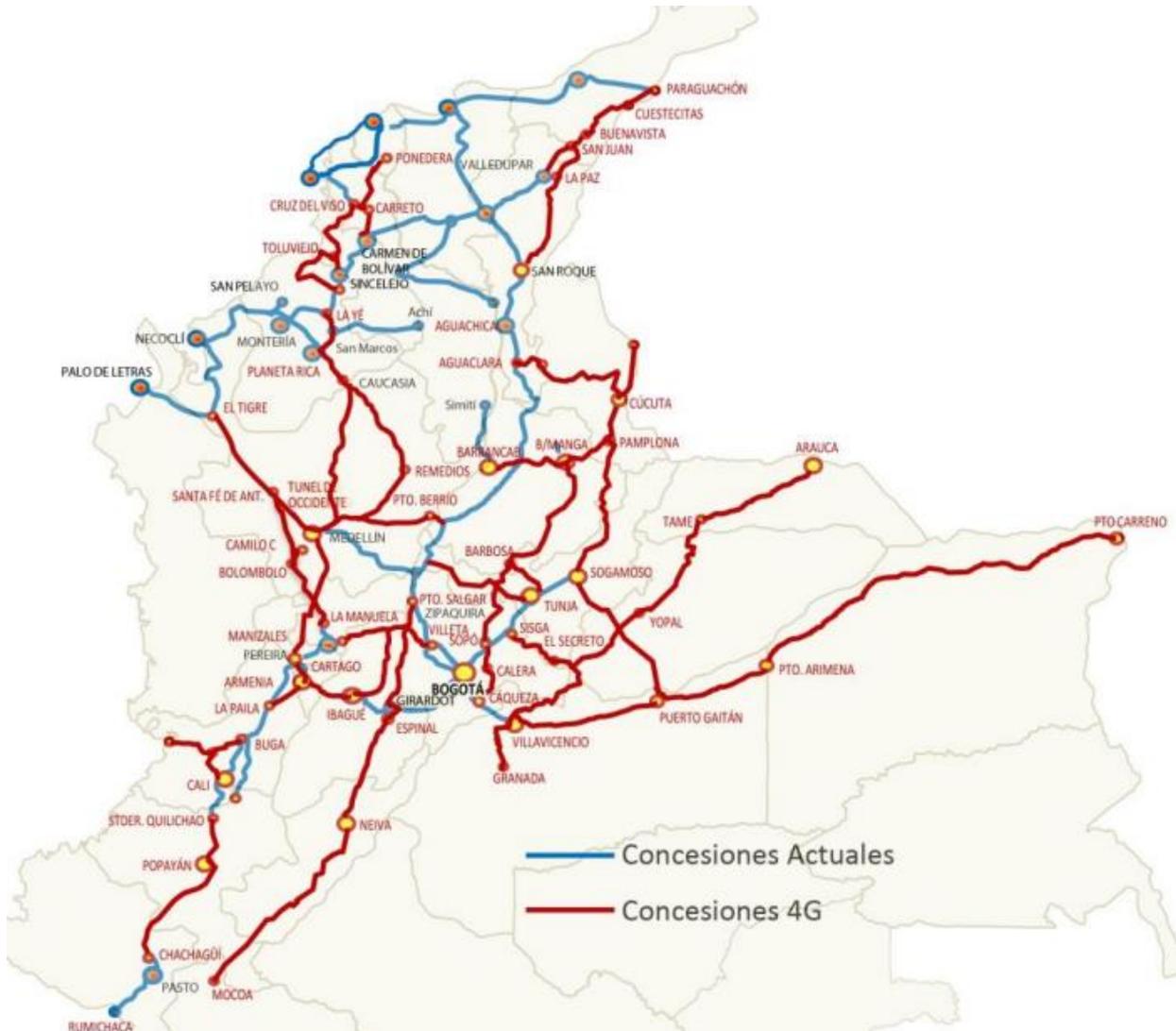


Figura 12. Gráfico sobre las Concesiones Viales (INVIAS, 2013)

Las Concesiones Viales de Cuarta Generación están conformadas por más de treinta (30) proyectos en todo el país, uno de los más importantes es Autopistas para la Prosperidad. Este proyecto interconectará Antioquia y el Noroeste del país con el Valle del Cauca, la Costa Pacífica, el Eje Cafetero, El centro del País, la Costa Caribe y el Magdalena Medio (*Fig. 13*). Tendrá una inversión estimada de 13 billones de pesos, que será financiada por el sector privado y respaldada principalmente con aportes del gobierno del nacional, de la Gobernación de Antioquia y la Alcaldía de Medellín; además, se intervendrán novecientos (900) Km de carretera para realizar la operación y mantenimiento de alrededor de 1200 Km (ANI, 2013).

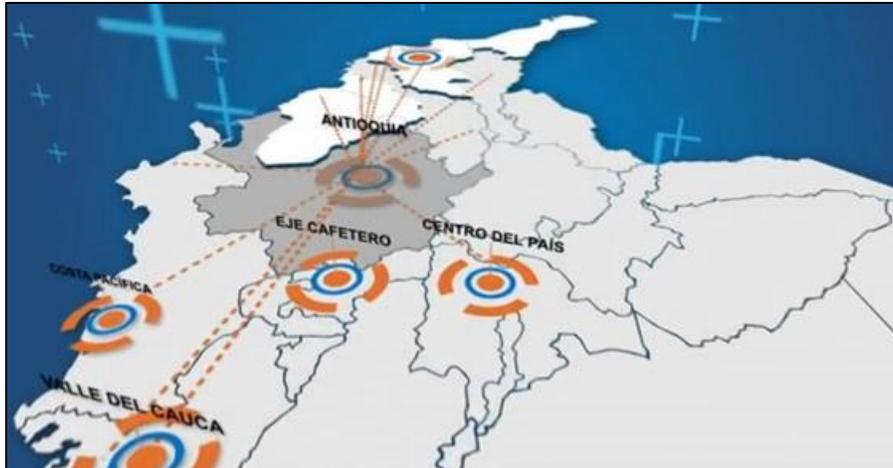


Figura 13. Conexión Viales Antioquia (ANI, 2013)

Las primeras cinco (5) concesiones dan inicio del proyecto Autopista para la Prosperidad de la siguiente forma:

1. Concesión Autopista, Conexión Norte: Inicia en Remedios, pasando por Zaragoza y finalizando en Caucasia con una variante que enlaza con las concesiones del grupo cuatro (4) norte. Conecta centros de insumos y producción en el centro del país con la Costa Atlántica.
2. Concesión Autopista, Rio Magdalena 2: Inicia desde Remedios, pasa por el Alto de Dolores, para luego llegar a Puerto Berrio a través de una variante, que la unirá con el proyecto Ruta del Sol. Conecta centro de insumos y producción del occidente del país con el Rio Magdalena y el Noriente del país.
3. Concesión Autopista, Conexión Pacifico 1: Inicia en Ancon Sur, pasando por La Primavera y Camilo C. hasta Bolombolo.
4. Concesión Autopista, Conexión Pacifico 2: Inicia en Bolombolo, pasando por La Pintada y Santa Bárbara hasta llegar a La Primavera.
5. Concesión Autopista, Conexión Pacifico 3: Inicia en La Pintada, pasando por la Felisa, Irra, Tres Puertas hasta la Manuela, incluyendo la variante de Tesalia hasta la Virginia. Esta tres (3) concesiones Pacífico buscan conectar los centros de insumos y producción del norte del país con la zona Cafetera, Valle del Cauca y el Pacífico.

Luego, continua la realización de las restantes concesiones del proyecto Autopista para la Prosperidad (*Fig. 14*) de la siguiente forma:

1. Concesión Autopista al Mar 1: Inicia en Medellín, pasando por Santa Fe de Antioquia hasta Cañasgordas, incluye el tramo entre Santa Fe de Antioquia y Bolombolo.
2. Concesión Autopista al Mar 2: Inicia en Cañasgordas, pasando por Uramita, Dabeiba y Mutatá hasta llegar a El Tigre; enlazando con la Conseción Transversal de las Americas.

3. Concesión Autopista al Río Magdalena 1: Inicia en Bello, pasando por Hatillo, Porcesito y Cisneros hasta al Alto de Dolores. Incluye el tramo entre Hatillo y Donmatías.
4. Concesión Donmatías – Caucaasia: Inicia en Donmatías, pasando por Yarumal y Taraza hasta llegar a Caucaasia.

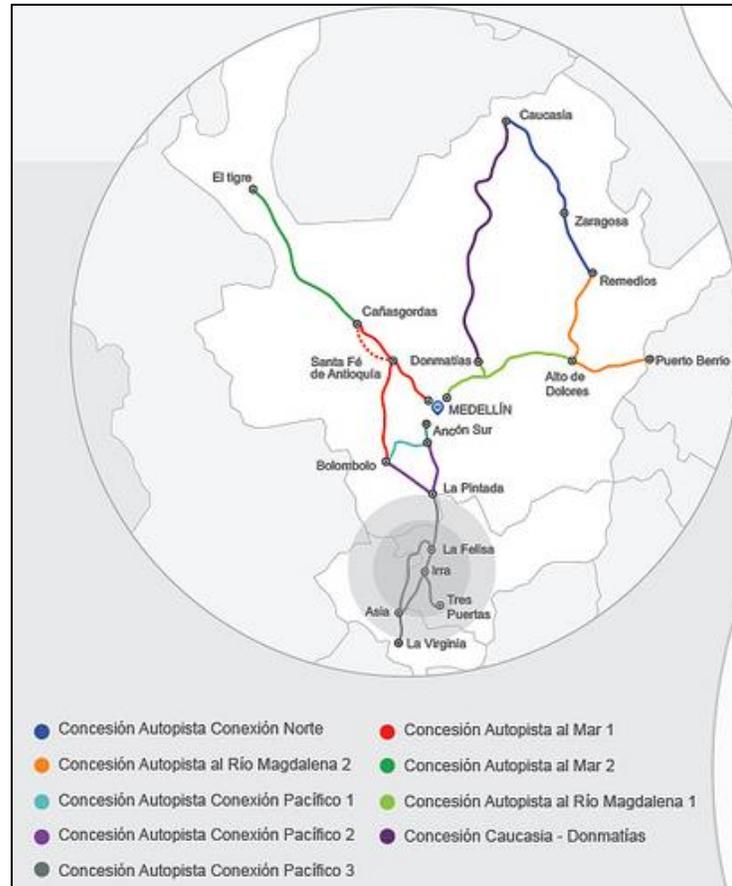


Figura 14. Gráfico de Autopistas para la Prosperidad en Antioquia (ANI, 2013)

Este proyecto tiene como finalidad mejorar sustancialmente la conectividad de las poblaciones de Antioquia, además de impulsar la economía de la región; “Antioquia es la más beneficiada con las concesiones viales de Cuarta Generación” (Vicepresidencia de la Republica de Colombia, 2014).

6.3 GEOLOGÍA

La geología es la ciencia que tiene como propósito el estudio de las rocas que componen la corteza terrestre, tratando sobre el origen, la historia y las estructuras de la Tierra, de acuerdo con su registro en las rocas.

6.3.1 Estructura de la Tierra

A través de la Sismología se ha podido determinar las capas que componen el interior de la Tierra mediante la propagación de las ondas sísmicas que viajan en su interior, producidas por causas naturales (terremotos) o artificiales (prospección sísmica) y las propiedades físicas de las rocas.

A través de esa metodología se determinó que la estructura interna de la tierra se divide en tres (3) grandes capas: Corteza, Manto y Núcleo.

a) La Corteza, es la capa más superficial y la más delgada presentando un espesor variable, en los océanos (corteza oceánica) alcanza espesores de diez (10) Km y en los continentes (corteza continental) hasta 40 Km. Se le estima una densidad de 2.8 g/cm^3 . Algunas investigaciones que se han realizado a 16 Km de profundidad se han encontrado que la corteza está constituida por un 95% de rocas ígneas, 4% de lutitas, 0.75% de areniscas y 0.25 % calizas.

b) El Manto, representa el 40% de la masa terrestre, tiene un espesor de 2,840 Km y una densidad media de 4.6 g/cm^3 . Se divide en manto inferior y manto superior. Se considera que está compuesto principalmente por rocas de constitución basáltica (ferro-magnesiana).

c) El Núcleo, el cual tiene un espesor aproximado de 3,480 Km y una densidad de 10.6 g/cm^3 , está formado por un núcleo interno sólido y un núcleo externo líquido. Está constituido principalmente por Hierro (Fe) y Níquel (Ni) (Cemex México, 2004).

6.3.2 Composición de la Corteza

Para el conocimiento completo de las rocas, es indispensable identificar la edad de formación de estas. En las rocas sedimentarias es posible gracias a los fósiles-índice, estos fueron organismos (macro y microscópicos), que se extinguieron después de una existencia relativamente corta en el tiempo, y algunos de ellos presentan una distribución muy amplia en el mundo. En las rocas ígneas y en las metamórficas, la edad se determina por radiometría, es decir, basándose en la velocidad de desintegración de los minerales radiactivos que las constituyen.

En cuanto a la composición de la corteza terrestre, el oxígeno es el elemento más abundante, con un 46% del total de los elementos, le siguen: Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg y Ti (Gass, Smith y Wilson, 1980).

Corteza Terrestre		
Elementos principales de la Corteza Terrestre	O	46.0%
	Si	27.0%
	Al	8.0%
	Fe	5.0%
	Ca	3.50%
	Na	2.50%
	K	2.50%
	Mg	2.10%
	Ti	0.40%
Elementos minoritarios de la Corteza Terrestre	H	0.10%
	P	0.10%
	Mn	0.10%
	F	0.07%
	S	0.05%
	Sr	0.04%
	C	0.03%
	Ba	0.02%
	Cl	0.02%
	Cr	0.02%
	Zr	0.01%
	Rb	0.01%
	V	0.01%
	Resto es 0.01%	

Tabla 1. Composición química de la corteza (Gass, Smith y Wilson, 1980).

6.3.3 Tipos de rocas de la corteza terrestre

Las rocas se clasifican de acuerdo con su origen, lugar de formación y su composición mineralógica. De acuerdo con estos tres criterios, existen tres grupos:

- Rocas Ígneas
- Rocas Metamórficas
- Rocas Sedimentarias

6.3.3.1 Rocas Ígneas

Son las rocas más extensas de la corteza terrestre constituyendo el 95% de la estructura de la geosfera y se forman a partir del enfriamiento y consolidación de un magma. Si el enfriamiento sucede en la superficie de la tierra se les llama extrusivas caracterizándose por estar formadas básicamente por cristales muy pequeños que no pueden distinguirse a simple vista. Cuando el enfriamiento se da en el interior de la tierra se les llama intrusivas y se caracteriza por la formación de cristales de los minerales que la constituyen que se pueden observar a simple vista, esto se debe a que el enfriamiento lento les da oportunidad a las moléculas de ordenarse y crecer.

Si el enfriamiento ocurre en algún punto intermedio entre los dos (2) anteriores se les llama hipabísales y se caracterizan por la formación de cristales grandes "embebidos" en una matriz de grano fino (Gass, Smith y Wilson 1980).

Dependiendo de su composición química, cada una de las tres (3) subdivisiones anteriores se clasifican en ácidas, básicas e intermedias tomando como criterio su contenido de SiO₂ como constituyente primario (Gass, Smith y Wilson 1980).

Ácidas	>66% de SiO ₂
Intermedias	Entre 52% y 66% de SiO ₂
Básica	Entre 45% y 52% de SiO ₂
Ultra básicas	<45% de SiO ₂

Tabla 2. Categorización del suelo según SiO₂

6.3.3.2 Rocas metamórficas

Son originadas a partir de rocas sedimentarias o ígneas, que han sido transformadas en su estructura original, por efectos de la presión y/o temperatura a las que fueron sometidas y que provocaron en ellas recristalización y formación de nuevos minerales. Existen dos (2) tipos básicos de metamorfismo, de contacto y regional (Cemex México, 2004).

6.3.3.3 Rocas Sedimentarias

Las rocas sedimentarias constituyen el 5% de la corteza terrestre, y se originaron por la destrucción química y/o mecánica de rocas preexistentes. El proceso implica intemperismo, erosión, transporte de los sedimentos y el depósito de éstos en forma estratificada, acumulándose capa por capa hasta alcanzar espesores que en ocasiones sobrepasan las decenas de millares de metros.

6.3.3.3.1 Clasificación de las rocas sedimentarias

La primera subdivisión de las rocas sedimentarias se hace atendiendo al mecanismo predominante que les dio origen, siendo las siguientes:

a) Clásticas: La mayoría de los sedimentos que les dieron origen fueron depositados mecánicamente (aire, corrientes fluviales y glaciares). Consisten en detritos provenientes de tierras altas que fueron intemperizados erosionados y transportados. Su composición está íntimamente ligada a las rocas que les dieron origen (Suárez, 2001).

Las rocas clásticas se clasifican de acuerdo con el tamaño de su grano, relacionándolas con sedimentos clásticos no consolidados como son: grava, arena, limo y arcilla, de los cuales surge la nomenclatura familiar de las rocas detríticas: conglomerado, arenisca, limolita y lutita.

b) Químicas: Las rocas químicas se constituyen principalmente de moléculas tales como carbonáticas, silíceas, haluros y sulfatos, en donde los cristales característicos están enlazados

químicamente. La mayoría de rocas químicas se originaron por precipitación en ramificaciones de agua, pudiendo ser causadas por evaporación, reacciones inorgánicas entre las sales diluidas o por organismos tales como bacterias, corales y moluscos (ejemplo: Caliza, dolomita, yeso, sal gema, etc.).

c) Biogénicas: Son las formadas por el depósito y acumulación de abundantes secreciones esqueléticas o fósiles, (silíceas, calcáreas) o por acumulaciones de restos de plantas, por ejemplo, coquinas (fósiles marinos), lutitas sapropélicas (con materia orgánica -azufre elemental emisión de SO_2 -), diatomitas (restos de algas), fosforitas (sedimentos de fósforo), turba (restos vegetales), carbón mineral, etc. (Suárez, 2001).

6.3.4 Geología de Colombia

La geología de Colombia es particular y variada: se constituye de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, pertenecientes a diferentes períodos geológicos. En la cordillera Occidental prevalece material sedimentario; en la cordillera Central, las formaciones ígneas y metamórficas irrumpen la amplificación inmensa y en la Oriental hay superioridad de material sedimentario con incrustaciones ígneo-metamórficas aisladas (Knox y Maldonado, 1969).

En Colombia, las variaciones climáticas que se atribuyen a su ubicación en la zona intertropical, por ejemplo, de humedad en las temporadas de invierno, inciden notablemente en la actuación de las arcillas que componen los suelos, generando cambios paulatinos que con el tiempo producen alteraciones que tienden a ser negativas para los materiales que constituyen el suelo.

Dentro de los fenómenos geológicos, según el Geólogo Alberto Lobo Guerrero el territorio colombiano se acentúa sobre el periodo denominado Silúrico, dentro de ese tiempo ocurrió la formación y levantamiento de montañas, por lo tanto, se da inicio a la erosión de los minerales. Además, durante de ese periodo se produjo el asentamiento de arcillas de mares poco profundos en la región donde se levantó la Cordillera Central. Los sedimentos marinos se compactan formando conglomerados, areniscas, arcillolitas y calizas (Lobo, 1987).

De acuerdo con su investigación, Meza (2012) afirma que el departamento de Antioquia está ubicado en una zona tropical, por lo tanto, el suelo está parcialmente saturado, lo que implica problemas geotécnicos como la estabilidad de taludes y laderas, esfuerzos laterales sobre estructuras de contención, conformación de terraplenes y presas.

6.3.5 Batolito Antioqueño

En 1998 Londoño destaca del batolito tres (3) aspectos importantes:

- El macizo conocido como batolito antioqueño es una formación geológica situada principalmente en el Departamento de Antioquia, República de Colombia (*Fig. 15*).
- Radica en una masa amplia de roca de granito con una extensión de cerca de 7.800 km².
- Está asentado sobre la Cordillera Central donde irrumpe la parte axial de su extremo septentrional. El Batolito Antioqueño tiene una forma trapezoidal con su mayor extensión en sentido Noroccidente-Sureste.

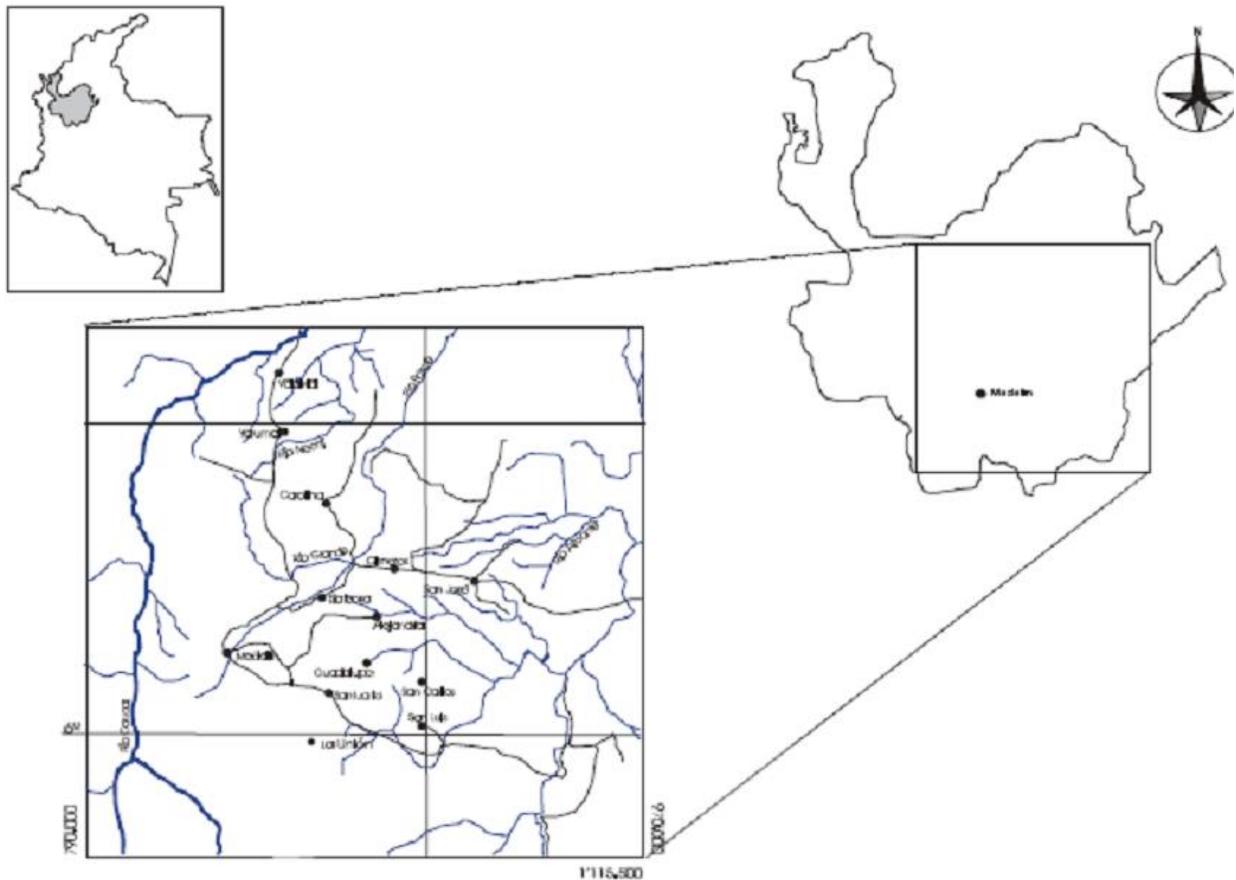


Figura 15. Localización del Batolito Antioqueño (INGEOMINAS, 1999)

Por otro lado, Restrepo y Toussaint (1987) indican que la Zona Norte de la Cordillera Central donde se ubica Antioquia, está conformada por rocas metamórficas que afloran y corresponden a serpentinitas, granulitas, migmatitas, esquistos y anfibolitas.

Para los autores Gonzalez y Londoño (1999), el Batolito Antioqueño se encaja en la Formación San Pablo y el Gabro de Yarumal del Cretácico Inferior, la Dunita de Medellín del Cretácico

Inferior, las sedimentitas del Aptiano – Albiano en San Luis, y metamorfitas paleozoicas en el flanco este de la Cordillera Central y forma, generalmente un amplio cerco de contacto. Las interacciones de los contactos con las estructuras en las rocas fronterizas son opuestas y aun donde el rumbo del contacto del batolito y a la distribución de las rocas encajantes concuerda, la cartografía detallada muestra que los desniveles son diferentes.

Según Botero (1963), la roca del Batolito Antioqueño que constituye estos peñoles corresponde a la facies normal y, por lo tanto, no es la mayor resistente a la meteorización debido a variaciones en la composición mineralógica acentúan este proceso, luego es posible que hayan sido originalmente núcleos de exfoliación exentos de fracturamiento que rápidamente fueron expuestos a la intemperie por erosión.

Una característica principal de los peñoles según Botero (1963):

Son las aguas meteóricas, las cuales son el principal agente de meteorización y descomponen la roca en varias etapas hasta llegar a arcillas lateríticas. El núcleo se conserva relativamente fresco y está encerrado por capas concéntricas de exfoliación, producidos por hidratación por remanentes de esfuerzos mecánicos. Por lo tanto, Antioquia presenta masas extensas de arcilla en sus suelos, llamado saprolito, el cual hace que las construcciones de vías en la región sean complejas y es donde se recurre a la estabilización.

El Batolito Antioqueño se caracteriza por estar en un medio ecuatorial húmedo lo cual beneficia la acción de agentes meteorizantes sobre el macizo rocoso fragmentado. Por lo tanto, se presenta un perfil de meteorización generalizado de esta unidad para los primeros siete (7) metros (Ocampo, Hernandez, Valencia y Echeverri, 2010) (*Fig. 16*).

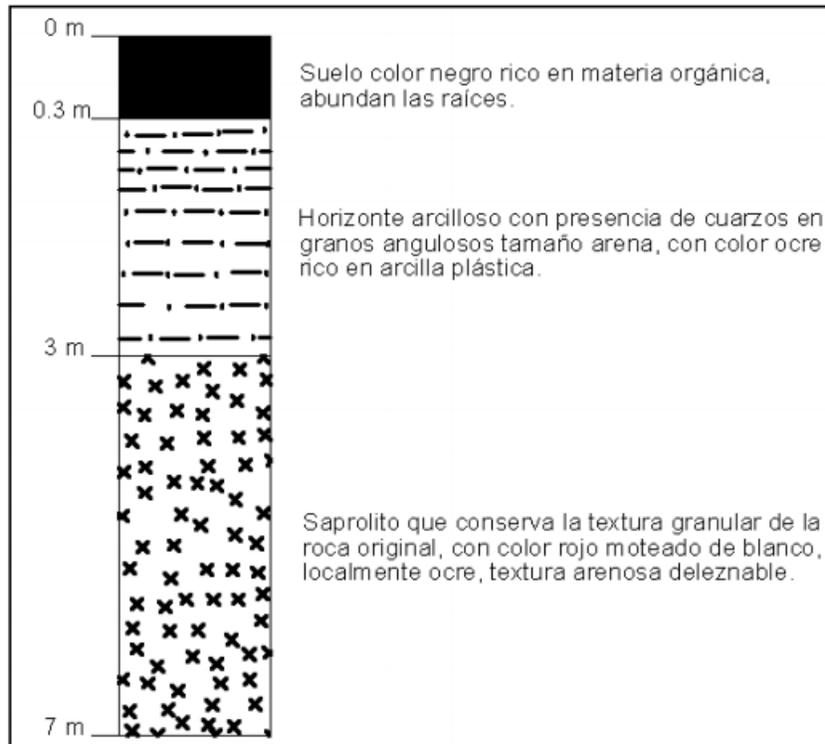


Figura 16. Perfil de Meteorización típico de un suelo residual de Batolito Antioqueño (Ocampo, Hernandez y Echeverri, 2010).

Este perfil presenta que a 0.3 m de profundidad hay presencia de arcilla plástica la cual tiene un espesor de 2.7 metros. Este tipo de roca hace que el terreno sea inestable y difícil de construir, de tal forma, que la estabilización del suelo arcilloso toma gran importancia. Para el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), dentro de las especificaciones generales de construcciones de carretera con actualización en 2012, en el apartado 200.4.2 de remociones o descapote de excavaciones menciona que los troncos, raíces y materiales no deseados, deben ser retirados hasta una profundidad mínima de sesenta centímetros (60 cm) y para terraplenes una profundidad mínima a treinta centímetros (30 cm). Por lo tanto, la construcción y el mantenimiento de la Concesión Autopista, Conexión Norte: entre Remedios y Zaragoza; Concesión Autopista, Río Magdalena 2: Entre Remedios, el Alto de Dolores y Puerto Berrio; Concesión Autopista, Conexión Pacífico 1: Entre Ancon Sur, la Primavera, Camilo C. y Bolombolo; Concesión Autopista, Conexión Pacífico 2: Entre Bolombolo, La Pintada, Santa Bárbara y la Primavera; Concesión Autopista, Conexión Pacífico 3: Entre La Pintada, la Felisa, Irra, Tres Puertas, la Manuela, Tesalia y la Virginia; Concesión Autopista al Mar 1: Entre Medellín, Santa Fe de Antioquia, Cañasgordas y Bolombolo; Concesión Autopista al Río Magdalena 1: Entre Bello, Hatillo, Porcesito, Cisneros y Alto de Dolores; y la Concesión Donmatías – Caucasia: Entre Donmatías, Yarumal y Taraza, estará afectada por las arcillas expansivas. En el caso del municipio de Caucasia, este se presenta como un territorio plano y por

acción del río Cauca se dispersa la arcilla por toda la región, sin embargo, no hay masas densas de este material.

Para la Concesión Autopista al Mar 2: Entre Cañasgordas, Uramita, Dabeiba, Mutata y El Tigre, que están ubicadas sobre de la Cordillera Occidental de acuerdo con estudios realizados por Padilla (2009) sobre estratificación de las rocas sedimentarias de sus flancos, se menciona que existe una masa muy densa terreno arcilloso en esta región. Por otra parte, los suelos de la región de Donmatias son fuertemente ácidos y en menor medida los municipios como Remedios, Segovia y Puerto Berrio, contiene suelos de acidez moderada. Este tipo de suelos se deben a la alta concentración de aluminio Al^{+3} soluble, el cual se puede regular por la adición de Carbonato de Calcio, por lo que la reacción de la arcilla con la cáscara de huevo pulverizada podría ser efectiva.

6.3.6 Minerales de Arcillas:

De acuerdo con los estudios de Grim (1968) y Selby (1993), se determinaron que en general los minerales de arcilla presentan partículas de fracción fina y su variedad mineralógica puede agruparse en tres (3) clases:

- Filosilicatos ($(Si_2O_5^{2-})_n$).
- Aluminosilicatos de corta estructura
- Hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso.

Los suelos arcillosos se constituyen de filossilicatos como la caolinita, haloisita, montmorillonita, illita, vermiculita y clorita. Para Selby (1993) las capas de silicatos presentan dos (2) clases de estructura organizadas en diversas combinaciones:

- Tetraedros de sílice: Están conformados por átomos de silicio y oxígeno, donde el ion de silicio se ubica en el eje central, mientras que los enlaces del oxígeno establecen las cuatro esquinas (*Fig. 17*).

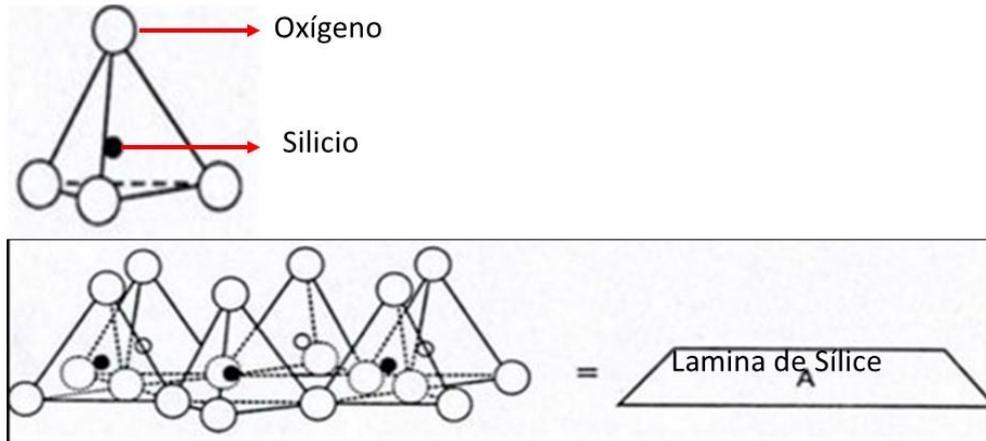


Figura 17. Tetraedro de sílice y una lámina de sílice (Oweis y Khera, 1998).

- Octaedros de aluminio. Consisten en átomos de aluminio en el eje central y átomos de oxígeno formando ocho (8) esquinas.

Además, Selby (1993) postula que las hojas de octaedros poseen un arreglo estructural similar a la gibbsita, $\text{Al}(\text{OH})_3$. El Al^{+3} tiene la particularidad de presentar una sustitución isomorfa por cationes bivalentes como Mg^{+2} o Fe^{+2} . Al igual, el autor menciona que el catión silicio Si^{+4} puede intercambiarse por el Al^{+3} en la capa del tetraedro.

En el trabajo realizado por Mendoza y Murillo (2013), se plantearon las siguientes propiedades físicas de las arcillas:

- Plasticidad
- Resistencia a presión
- Retracción
- Temperatura de cocción
- Vitricación
- Color de calcinación

Dos factores importantes son la composición y su naturaleza, que determinan el uso y el valor de la arcilla. El cuarzo es una forma del óxido de silicio que disminuye la plasticidad y la retracción, y contribuye a hacerla refractaria. Por su parte la sílice en forma coloidal aumenta la plasticidad mientras que la alúmina la hace refractaria. El óxido de hierro, al igual que el feldespato, reduce la temperatura de fusión, actúa como fundente y también es un poderoso agente colorante. El color de la arcilla es imputado a la presencia de óxido de hierro, lo que puede variar en los diferentes tonos el rojo.

Las arcillas se dividen en dos clases:

1. Arcilla residual - encontrada en el lugar de origen
2. Arcilla transportada, también conocida como arcilla sedimentaria, extraída del lugar de origen por un agente de erosión y depositada en una posición nueva y posiblemente lejana.

Las arcillas residuales se forman con mayor frecuencia por la intemperie superficial, que da lugar a la arcilla de tres maneras:

- Descomposición química de rocas, como el granito, que contiene sílice y alumina.
- Solución de rocas, como piedra caliza, que contienen impurezas arcillosas que, al ser insolubles, se depositan como arcilla.
- Desintegración y solución de esquisto.

Por otro lado, en los trabajos de Mitchell y Soga (2005) se describen algunas características relevantes de los conjuntos de arcillas, que se enumeran de la siguiente forma:

1. Caolinita: Su estructura tiene la particularidad de ser cristalina y hexagonal bien definidas, estas se repiten en sus tres ejes. Adicionalmente, la fuerte unión entre el tetraedro de sílice y octaedro de aluminio se debe a los enlaces de hidrogeno, lo que permite una estructura rígida.
2. Montmorillonita: Es un mineral con una especial característica en su estructura octaédrica, la cual presenta un átomo de magnesio que reemplaza a un átomo de los seis de aluminio. Este intercambio promueve un desequilibrio en el balance de carga que comúnmente se subsana con iones de Ca^{+2} o Na^{+} . El tamaño de partícula de este mineral es muy pequeño, lo que facilita la afinidad con el agua. Esta característica permite la expansión y plasticidad.
3. Hidrómica: Se forma a partir de la meteorización del mineral mica. En su estructura química tiene moléculas de agua y presenta átomos de potasio. La estructura particular de este mineral reduce la capacidad de expansión y contracción.

6.3.6.1 Carga eléctrica en las unidades estructurales

La superficie de la arcilla cargada negativamente también atrae los cationes cargados positivamente que están presentes en el agua intersticial. Los cationes provienen del proceso de erosión provocado por la filtración de agua en los poros. La concentración de cationes en el agua intersticial disminuye al aumentar el espacio desde la superficie de la partícula. Cerca de la superficie, la suspensión de agua y cationes forman una capa con carga positiva que, junto con la superficie de arcilla con carga negativa, forma una doble capa eléctrica.

El entorno de la doble capa eléctrica afecta la estructura de las partículas de arcilla y, por lo tanto, las propiedades físicas del suelo.

Los cationes no están unidos inalterablemente a la superficie de las partículas de arcilla y pueden ser sustituidos por otros cationes, un proceso conocido como intercambio de cationes (Sharma, 1998).

6.3.6.2 Enlaces y arreglos de partículas en una unidad estructural laminar

El autor Sharma (1998) deduce que una estructura plana horizontal de un mineral arcilloso alcanza contener hasta veinte (20) unidades estructurales conformadas una sobre la otra.

Para cada tipo de arcilla, sus estructuras individuales están enlazadas de la siguiente forma:

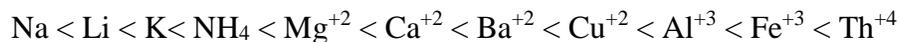
- Caolin: La unión se debe a enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals.
- Montmorillonita: La unión se debe a los cationes o a las fuerzas de van der Waals.
- Hidrómica: Fuerzas de van der Waals

6.3.6.3 Intercambio catiónico en arcillas

El intercambio de iones en arcillas depende de la estructura cristalina del mineral y de la composición química de la solución en contacto con este. El intercambio de iones en estos minerales es una reacción química reversible que tiene lugar entre los iones que se mantienen cerca de una superficie mineral por cargas eléctricas desequilibradas dentro del marco mineral y los iones en una solución en contacto con el mineral. Por lo tanto, el exceso de carga en el mineral es negativo y atrae cationes de la solución para neutralizar esta carga. Las reacciones químicas en el intercambio iónico siguen la ley de acción de masas, pero las reacciones están restringidas por el número de sitios de intercambio en el mineral y por la fuerza de la unión de los cationes intercambiables en la superficie (Colmenares, 2002).

El intercambio del catión modifica la característica de la doble capa y, por lo tanto, las propiedades físicas del suelo. Por ejemplo, al agregar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a montmorillonita, la propiedad de hinchamiento del suelo se reduce debido a que el Ca^{+2} reemplaza Na^+ provocando una arcilla más firme. Es menos sensible al cambio en el contenido de agua.

El autor Sharma (1998), considera a los elementos H^+ , K^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} como cationes intercambiables frecuentes en las arcillas y su reemplazo varía por la valencia y el radio del ion. A continuación, se enlistan los cationes en orden ascendente de acuerdo con la capacidad de intercambio:



Según Colmenares (2002), la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) dependerá del tamaño de partícula, temperatura y factores ambientales. La expansión de la arcilla debido a la humedad está determinada por el tipo de catión intercambiable (*Fig. 18*).

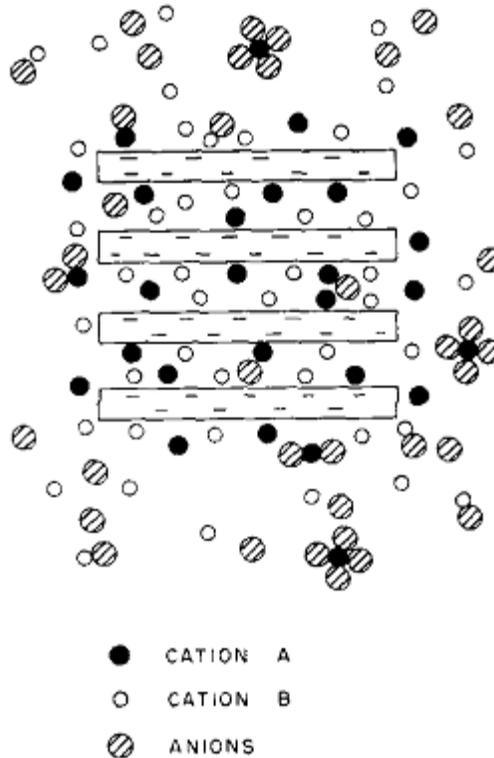


Figura 18. Esquema del proceso en la interacción electrofítica en un sistema acuoso con arcilla (Lewis, 1990)

El valor de la CIC depende del mineral, en la Tabla 3 se describen los rangos:

Mineral	CEC (meq/100 gr)
Caolinita	<10
Hidrónica	20-40
Montmorillonita	80-150

Tabla 3. Rangos de CIC para los principales grupos de arcilla (Colmenares, 2002).

Colmenares (2002) concluye que la hidrónica a pesar de tener una CIC alta, su capacidad de expansión se ve minimizada por los iones de potasio presentes. Sin embargo, la montmorillonita presenta una superficie específica entre 50 y 120 m²/g, alcanzando superficies por expansión de hasta 840 m²/g, promoviendo mayor capacidad de intercambio catiónico y permitiendo expansión y plasticidad.

6.3.6.4 Expansión de arcillas

Las partículas de arcilla generalmente están rodeadas estructuralmente por moléculas de agua. Este fluido influye en características físicas como resistencia, plasticidad y permeabilidad. Para Sharma (1998), la adherencia de agua en la superficie de la arcilla ocasiona una hidratación en la

estructura cristalina, lo que permite la afinidad entre la superficie sólida del mineral y el agua del entorno.

El agua adsorbida alrededor de la arcilla cumple con la teoría de Capa Doble Difusa (CDD) propuesta por Gouy (1910) y Chapman (1913), la cual ha sido empleada para evaluar el comportamiento volumétrico de las arcillas. Adicionalmente, el trabajo realizado por Selby (1993), se basa en el modelo de Helmholtz, para postular que la capa de arcilla está cargada negativamente debido a que se produce atracción de los cationes, lo que se traduce en un balance superficial.

6.3.6.5 Interacciones de la Capa Doble Difusa (CDD)

La CDD es la interacción arcilla-agua/electrolito. En ella, los cationes permanecen fuertemente unidos en la superficie cargada negativamente de la arcilla. Estos cationes se denominan cationes adsorbidos. Aquellos cationes que exceden los necesarios para neutralizar la electronegatividad de partículas de arcilla y aniones agrupados están presentes a medida que la sal precipita. Cuando las arcillas secas entran en contacto con el agua, los precipitados pueden entrar en solución, los cationes adsorbidos tratan de difundirse lejos de la superficie de la arcilla e intentan igualar la concentración a través del agua intersticial.

Para Mitchell y Soga (2005), se presentan dos (2) casos:

- Las fuerzas moleculares repulsivas entre si están dadas por la interacción CDD de la arcilla vecina.
- Las fuerzas moleculares de atracción entre si están dadas por la interacción de dos (2) CDD, es decir, la fluctuación de dipolos que tienen carga eléctrica opuesta permite la atracción.

Por otro lado, London (1937) y Colmenares (2002) determinan lo siguiente:

- Las fuerzas moleculares de repulsión son ocasionadas por la distancia entre las CDD paralelas.
- Las fuerzas moleculares de atracción son producto tanto del espesor de las láminas de arcilla como del espesor de las CDD.

6.3.6.6 Presión Osmótica

Los cambios de volumen en las arcillas pueden ocurrir como resultado de cambios en la química del fluido de poro debido a la alteración de las interacciones electrostáticas entre las partículas. El concepto de presión osmótica y la teoría de doble capa difusa proporcionan un modelo conceptual de la naturaleza de las presiones repulsivas entre partículas. En períodos largos, las dispersiones se acercan al equilibrio osmótico, que se puede definir como el límite común de los procesos de hinchamiento (Mitchell & Soga, 2005).

Por otra parte, el estrés efectivo es mayor que el estrés total, ya que la presión del agua intersticial en estos suelos parcialmente saturados es realmente negativa. Esto se debe principalmente a la tensión superficial del agua intersticial en los huecos en toda la zona vadosa que causa un efecto de succión sobre las partículas circundantes.

La consolidación osmótica ocurre como resultado de un cambio en la capacidad repulsiva entre partículas de arcilla. La consolidación inducida osmóticamente ocurre como resultado del movimiento de fluido de la arcilla en respuesta a gradientes osmóticos. El volumen de una muestra de arcilla cambiará como resultado de los procesos combinados de flujo osmótico y compresibilidad osmótica cuando la arcilla se expone a una solución salina concentrada. Se producen cambios en las tensiones repulsivas interpartículas a medida que la sal se mueve hacia la arcilla.

6.3.7 Suelos Arcillosos

Este es un suelo fino con tamaños de partícula de menos de 0,002 mm. Típicamente las partículas se unen en forma de láminas y por lo tanto su área superficial es muy grande (Odit, 1998). La arcilla exhibe plasticidad y cohesión en este tipo de terrenos.

Los suelos arcillosos conservan una elevada superficie específica lo que posibilita la interacción sólido - fluido, y, por lo tanto, permite la absorción del agua. Al interactuar el líquido con la arcilla facilita el hinchamiento, produciendo su plasticidad inmediata. La geografía colombiana en especial Antioquia, presenta grandes variaciones climáticas que se atribuyen a su ubicación en la zona intertropical, por ejemplo, la humedad en las temporadas de invierno incide notablemente en la conducta de las arcillas que componen los suelos, generando cambios paulatinos que con el tiempo producen alteraciones que tienden a ser negativas para los materiales que constituyen el suelo (Mendoza y Murillo, 2013).

El suelo arcilloso crea siempre un problema en el diseño y cimentación de estructuras de ingeniería civil. Cuando el suelo arcilloso entra en contacto con el agua, ocurre su hinchazón, así mismo su encogimiento cuando el contenido de agua disminuye.

El índice de plasticidad es el parámetro principal para clasificar el suelo de grano fino. Las moléculas de agua son dipolares y son atraídas hacia la superficie de la arcilla, este fenómeno se conoce como adsorción. El comportamiento del suelo arcilloso depende en gran medida de la cuantía de diferentes minerales arcillosos illita, caolinita y montmorillinita presentes en el suelo. Entre los tres, la montmorillinita tiene la máxima capacidad de hincharse, además, minerales arcillosos imparten otras propiedades como cohesión y plasticidad (Arora, 1984).

6.3.7.1 Hidratación e hinchamiento

En los estudios realizados por Henzen y Smit (2002), se determina que el hinchamiento de la arcilla se produce a través de la migración de contraiones que están inicialmente unidos a la superficie del mineral hasta el plano central de la capa intermedia donde se hidratan por completo. La extensión de la expansión de la arcilla depende en gran medida de la posición de la carga.

Para Hendricks (1940), la hidratación de arcilla implica la adsorción de moléculas de agua en la superficie expuesta. Generalmente, se pueden identificar tres modos de hidratación dependientes del pH: 1. hidratación interlaminar, que produce la hidratación de las superficies internas de las partículas de arcilla primarias; 2. hidratación continua, que está relacionada con una adsorción ilimitada del agua en las superficies internas y externas de las partículas primarias; 3. Condensación capilar de agua libre en microporos. Los elementos principales de la hidratación de arcilla interlaminar son: 1. la hidratación del catión intercalado en esmécticas; 2. la interacción de superficies de arcilla con moléculas de agua y cationes intercalados; 3. la actividad del agua en el sistema de arcilla-agua.

El hinchamiento de las láminas de arcilla se produce debido al balance entre la afinidad electrostática catión-lamina y la energía de hidratación del catión que se crea en el espacio interlaminar. Es decir, aumenta la distancia entre láminas y las fuerzas de repulsión electrostática entre láminas prevalecen, lo que favorece la separación completamente unas láminas de otras.

6.3.7.2 Plasticidad

La plasticidad de las arcillas se relaciona con la morfología de las partículas minerales similares a las placas que se deslizan sobre las otras cuando se agrega agua, la cual actúa como lubricante. A medida que incrementa el contenido de agua, la plasticidad aumenta hasta un máximo, dependiendo de la naturaleza de la arcilla.

Esta tiene una propiedad básica de las arcillas que permite formar un cuerpo de plástico. Cuando un cuerpo de este tipo se somete a la acción de una fuerza, se deforma y conserva esa forma perfectamente después de que la aplicación de la fuerza ha cesado. Las arcillas están formadas predominantemente por silicatos de aluminio hidratados. Son productos de alteración de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, principalmente granitos, feldespatos y pegmatitas, causados por la acción de agentes atmosféricos, que les proporcionan su característica plástica (Hendricks, 1940).

Para Jimenez (1975), los índices de Atterberg (Límite Líquido, Plástico y de Retracción) determinan la plasticidad. Estos índices se caracterizan por clasificar el estado del suelo arcilloso, es decir si es sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso. En general, la

plasticidad está influenciada por la distancia basal plana de los constituyentes minerales de arcilla; sin embargo, cuanto mayor esta distancia, mayor es su capacidad de absorción de agua.

6.3.7.3 Cohesión y adhesión

Estas dos propiedades son causantes de la retención de agua en la arcilla. La cohesión se define como la atracción de moléculas entre sí (*Fig. 19*) que se diferencia de la adhesión que es la atracción de las moléculas de agua por la superficie sólida de la arcilla. Mediante la adhesión, los sólidos retienen las moléculas de agua de forma rígida en las interfaces arcilla-agua, estas moléculas de agua a su vez se mantienen por cohesión. Juntas, estas fuerzas hacen posible que los sólidos del suelo retengan agua.

Combinadas las fuerzas de adhesión/cohesión provocan que las películas de agua de un grosor considerable se mantengan sobre las partículas de la superficie del suelo. Debido a que las fuerzas que sostienen el agua son fuerzas atractivas en la superficie, cuanto mayor es la superficie de un suelo, mayor es la cantidad de agua adsorbida. Esto significa que el suelo más arcilloso u orgánico puede contener mucha más agua que el suelo arenoso (Arora, 1984).

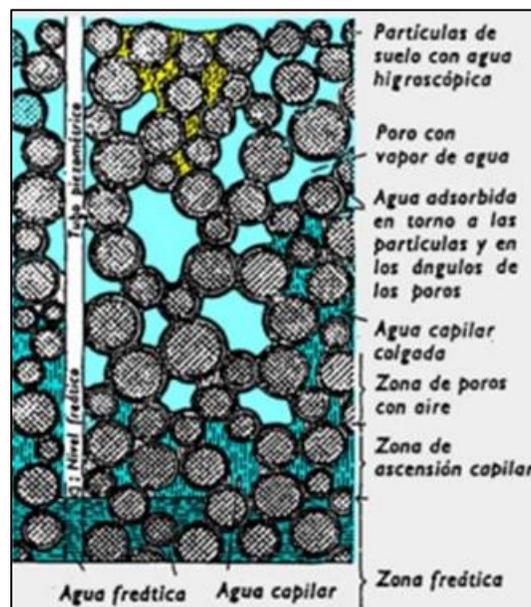


Figura 19. Cohesión en un suelo arcilloso (Manual de Carreteras, 2000).

6.3.7.4 Propiedades de los suelos arcillosos

Las propiedades de los minerales arcillosos incluyen plasticidad, contracción al exponerse a temperaturas altas y el secado al aire, finura del grano, color después de la cocción, dureza, cohesión y capacidad de la superficie para tomar la decoración. Los suelos arcillosos pueden

adsorber cationes y aniones y retenerlos alrededor del exterior de la unidad estructural en un estado intercambiable, generalmente sin afectar la estructura básica del silicato.

A medida que la cantidad de agua aumenta, las arcillas presentan una característica plástica y luego cambian a un estado casi líquido. Las cantidades de agua requeridas para los dos estados están definidas por el Límite Plástico y Líquido, que varían con el tipo de cationes intercambiables y la concentración de sal en el agua adsorbida.

Cuando en un suelo predomina material arcilloso, sus características físicas y mecánicas a nivel macroscópica están sujetas por las propiedades del tamaño de partícula, absorción de agua, compactación, carga, pH, etc. Jimenez (1975).

6.3.7.4.1 Límite Líquido (LL): Según la Norma del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) I.N.V.E-125-07, lo define como el contenido de humedad expresado en porcentaje.

6.3.7.4.2 Límite Plástico (LP): Según la Norma de INVIAS I.N.V.E-126-07, el límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua.

6.3.7.4.3 Índice de Plasticidad (IP): Según la Norma de INVIAS I.N.V.E-126-07, el IP es un rango de humedad en el que un suelo permanece en estado plástico mientras pasa de un estado semisólido a un estado líquido. Diferencia numérica entre Límite Líquido y Límite Plástico de un suelo.

6.3.7.4.4 Límite de Encogimiento (LE): Para Londoño y Alvarez (2008), LE se define como la cantidad de humedad en el que el suelo desiste de permanecer como un semisólido para comportarse como un sólido.

6.3.7.2.5 Gravedad específica: Según la Norma de INVIAS I.N.V.E-128-07, se define como una unidad adimensional que es la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua a una temperatura determinada.

6.3.8 Estabilización de Suelos Arcillosos

La modificación de los suelos arcillosos se realiza con el fin de mejorar las propiedades de ingeniería, es una estrategia reconocida y ampliamente practicada. A través de esta técnica, se reduce la plasticidad del suelo, se mejora la manejabilidad y resistencia a la compresión, así como las propiedades de carga. La necesidad de mejorar las propiedades de ingeniería de los suelos ha sido reconocida mientras la construcción haya existido (Caterpillar, 2006).

Algunas de las ventajas de la estabilización del suelo son: Impermeabilización el suelo, mejoramiento de la resistencia, la durabilidad, secado del suelo húmedo, reducción en el costo de construcción y conservación de la energía.

Los suelos inestables pueden crear problemas importantes para la realización de pavimentos o estructuras. Por lo tanto, existe una gran necesidad de estabilizar estos terrenos inestables para mejorar sus propiedades de ingeniería debido a los recursos financieros limitados y la óptima utilización del suelo disponible localmente. La estabilización del suelo significa la mejora de la estabilidad o el poder de carga del suelo mediante el uso de compactación controlada, dosificación y / o la adición de una mezcla o estabilizadores adecuados (Naranjo y Alvares, 2008).

Sherwood (1992), describe las propiedades más significativas que se obtienen al mejorar el suelo arcilloso con la estabilización:

- **Resistencia:** El aumento de la resistencia promueve la estabilidad y capacidad de carga. La resistencia al cizallamiento de una masa de suelo es la resistencia por unidad de área que la masa del suelo que puede resistir y deslizarse a lo largo de cualquier plano dentro de ella. Se debe comprender la naturaleza de la resistencia al corte para analizar los problemas de estabilidad del suelo, como la capacidad de carga.

La resistencia del suelo arcilloso está influenciada por la relación de espacios vacíos, la composición y el ángulo de resistencia a la vibración. El grado de saturación también juega un papel importante en la determinación de la resistencia. Las características de la composición de los suelos cohesivos se definen en términos de plasticidad, donde una mayor plasticidad generalmente produce niveles más bajos de resistencia al cizallamiento (Iannacchione & Vallejo, 2000).

- **Estabilidad del volumen:** Interviene en la disminución de la hidratación de la arcilla. Las arcillas absorben agua en su estructura cristalina y aumentan de tamaño, produciendo un sello entre los espacios de los poros de la lámina.

La estabilidad del volumen depende de factores como el tipo y la cantidad de minerales de la arcilla, superficie específica, la estructura, la concentración de sal del agua intersticial, la valencia del catión, la cementación y la presencia de materiales orgánicos.

- **Durabilidad:** Esta propiedad genera resistencia al desgaste del suelo por el ambiente y el tráfico.

Para Dempsey y Thompson (1968), definen la durabilidad como la capacidad del material para retener la estabilidad y la integridad durante años de exposición a las fuerzas destructivas de la intemperie y acción humana. Además, un aspecto importante es el estudio del rendimiento de los estabilizadores, por lo que permitirá evaluar la funcionalidad en el tiempo.

- Permeabilidad: Al disminuir la circulación de agua por las partículas de la arcilla, mejora la estabilidad.

La permeabilidad es la propiedad o capacidad de una roca porosa, sedimento o suelo para transmitir un fluido; es una medida de la relativa facilidad del flujo de fluidos bajo una presión desigual (Bates y Jackson, 1980)

- Disminución de la Plastisidad: Esta propiedad se caracteriza por deformarse bajo una fuerza. Cuando se elimina o reduce la fuerza, la forma se mantiene. Esta puede mejorar con adición de agentes que intervienen en la interacción del agua con la arcilla.
- Disminución de la expansión: La expansión es dada por la interacción entre el suelo arcilloso y la estructura eléctrica de las moléculas de agua, lo que se denomina como Capa Doble Difusa (CDD). Cuando se satura la matriz arcillosa, se acumulan dipolos de agua entre las láminas de la arcilla, lo que hace que el volumen del suelo se incremente o se hinche. La incorporación del agua en la estructura química de la arcilla también causará una reducción en la capacidad o la fuerza del suelo (Deriszadeh & Wong, 2013).

La expansión de los suelos arcillosos es un proceso de dos fases dividido en expansión cristalina y osmótica (Horn & Strydom, 1998). El primero, es la expansión cristalina esta se da por la hidratación de los cationes intercalados intercambiables. Esto resulta en la ampliación del espacio entre las capas de partículas de arcilla de hasta 10-20 μm (McFarlane, et al., 2005b). El aumento en el volumen continuará a medida que se absorban más capas de agua. La segunda, es la expansión osmótica que corresponde a un proceso indefinido. Este tipo de expansión se produce debido a un gradiente de concentración entre el agua intersticial y los iones unidos electrostáticamente. Las presiones resultantes de la hinchazón pueden ser mayores que las débiles fuerzas de atracción de Van der Waals.

Para desarrollar la estabilización de un suelo arcilloso se requieren los siguientes procesos:

- Reducción de la granulometría del material.
- Saturación o deshidratación del suelo.
- Reacción química a corto plazo.
- Compactación.
- Construcción
- Curado y protección superficial.

Existen dos métodos principales de estabilización del suelo utilizados hoy en día: mecánicos y químicos. La forma más común es el método mecánico de estabilización de suelos por medio de compactación, mientras que la adición de cemento, calizas bituminosas u otros agentes se refiere al método químico de estabilización (Caterpillar, 2006).

6.3.8.1 Tipos de Estabilización

6.3.8.1.1 Estabilización mecánica.

Para Bada (2016), los tipos de estabilización mecánica del suelo incluyen medidas físicas para su mejoría. Los más utilizados son la compresión y el drenaje. Hay cuatro mecanismos diferentes de compresión: vibración, impacto, amasamiento y presión. Estas clases de estabilización del suelo se encuentran en los dos tipos principales de fuerza de compactación: estática y vibratoria. La compactación estática usa el peso muerto de la máquina como fuerza descendente en la superficie del suelo. Para cambiar la intensidad de la fuerza de compactación, el peso de la máquina debe reducirse o aumentarse, este tipo de compresión se limita a las capas superiores del suelo. La compactación vibratoria usa un mecanismo impulsado por el motor para aplicar fuerza hacia abajo además del peso estático de la máquina. El mecanismo se conforma por un peso excéntrico giratorio o combinación de pistón/muelle que impone una secuencia rápida de impactos a la superficie. Este método se encuentra entre los tipos de estabilización del suelo que afectan tanto a la capa superior como a la más profunda. El drenaje involucra sistemas subterráneos de tuberías y bombas para extraer el exceso de agua del suelo. Los métodos de drenaje comunes son los sistemas de punto de pozo, el drenaje de pozos profundos, el desagüe al vacío y la deshidratación por electro-ósmosis. Los métodos mecánicos de estabilización del suelo tienen serios inconvenientes, ya que requieren energía, maquinaria y equipo exigentes.

6.3.8.1.2 Estabilización Química

En el reporte “Military Soil Engineering Report (1992)”, señala que la estabilización de la arcilla por aditivos químicos ha estado en existencia por muchos años y ha sido utilizada por ingenieros para la construcción de caminos, puentes, presas, y de otras actividades constructivas.

La estabilización química ayuda en el control del polvo en carreteras y autopistas, particularmente en caminos no pavimentados, así como en los controles de la erosión hídrica y fijación y lixiviación de desechos y materiales reciclados.

Las principales ventajas de la estabilización química son que el tiempo de fraguado y el tiempo de curado pueden controlarse, además se presenta un aumento de la fuerza del suelo, densidad

compactada y mejora en la permeabilidad. Sin embargo, la estabilización química es generalmente más costosa que otros tipos de estabilización y puede causar riesgos ambientales.

Los agentes químicos reaccionan con la arcilla para modificar las características y propiedades físicas del suelo, de esta forma se mejora la estabilidad y resistencia para realizar procesos constructivos sobre el terreno (Bada, 2016).

Los estabilizadores químicos pueden tener tres (3) divisiones según su objetivo:

- Cubrir e impermeabilizar las partículas de arcilla.
- Establecer una mejor unión entre las partículas de arcilla; suministrando fuerza y estabilidad.
- Modificar el entorno del sistema agua-arcilla, con la cual se tendrá una menor plasticidad; posibles cambios de volumen creando uniones cementantes que corregirá la resistencia.

Las sustancias químicas o agente estabilizadores más comunes, son algunas mencionadas anteriormente: Cal viva, Cemento portland, Producto Asfáltico, Cloruro de Sodio y Calcio, Hidróxido de Sodio, Escorias de fundición, Fly Ash, Residuos de minería de Sulfato de Sodio dihidratado, CON-AID (Argentina), Geo-Stab (Colombia) y Polvo de Mármol expuestos anteriormente.

6.3.9 CÁSCARA DE HUEVO COMO AGENTE QUIMICO ESTABILIZADOR DE SUELOS ARCILLOSOS

Debido al crecimiento de la avicultura y a su vez el aumento de los residuos de cáscaras de huevo en Colombia es importante gestionar integralmente los residuos sólidos generados con el fin de contribuir al ciclo cerrado de este material.

La cáscara de huevo son una fuente rica de minerales, sirviendo como excipiente farmacéutico, un material de base para el desarrollo de preparaciones medicinales y dentales, un aditivo alimenticio y suplementos de calcio, un diluyente de formas de dosificación sólida, uso como un componente de fertilizante agrícola, y como un componente para los implantes óseos (Murakami, 2007).

Al consultar las diferentes fuentes bibliográficas en Colombia, se evidencian que la cáscara de huevo pulverizada aún no se ha usado como un agente químico estabilizador de suelos arcillosos en la construcción de vías primarias, secundaria y terciarias. La generación de residuos de cáscara de huevo en el país supera las cien mil toneladas al año, siendo así una cantidad considerable para implementar su uso como un agente químico estabilizador de un suelo arcilloso; esto permite realizar un recopilatorio de información, con el objeto de dar los primeros

pasos en el uso efectivo de este residuo no aprovechable. Como se menciona anteriormente, en la estabilización química con mármol pulverizado, este material tiene una composición química principalmente de carbonatos, similar a la que constituye la cáscara de huevo. Este residuo está constituido de minerales como carbonatos y fosfatos, que a su vez se encuentran en forma de nanopartículas. Por lo tanto, se soporta la idea del uso de la cáscara de huevo pulverizada como un agente químico muy rentable en la estabilización de los suelos arcillosos, los cuales son característicos de la región antioqueña.

El mejoramiento del suelo con métodos químicos y físicos ha demostrado ser de gran utilidad en su optimización, proporcionando un alcance satisfactorio para el uso de la tierra de otra manera, así como la generación de un impacto en la calidad del ambiente. En los últimos años se ha hecho hincapié en la protección del medio ambiente a través la reducción de las actividades de contaminación y el uso de métodos alternativos que minimicen el impacto negativo. Dentro del avance científico y tecnológico sobre la tierra, se puede lograr lentamente mediante la eliminación gradual de los métodos contaminantes la mejora del suelo y el uso de materiales naturales que tengan un impacto mínimo en el medio ambiente, en este caso, el suelo y el agua subterránea.

6.3.9.1 Definiciones:

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC1240, se define el huevo de gallina como el producto de figura ovoide, proveniente de la ovoposición de la gallina (*Gallus gallus*), constituida por la cáscara, membranas, cámara de aire, chalazas, yema y germen. Así mismo, es relevante conocer una definición clara de ovoproductos para poder focalizar el trabajo, según el Real Decreto 1348/1992, son: “Los productos obtenidos a partir del huevo, de sus diferentes componentes o sus mezclas, una vez quitadas la cáscara y las membranas y que están destinados al consumo humano; podrán estar parcialmente completados por otros productos alimenticios o aditivos; podrán hallarse en estado líquido, concentrado, desecado, cristalizado, congelado, ultracongelado o coagulado”.

6.3.9.2 Composición del huevo

Un huevo promedio pesa entre 50 y 60 gramos, de los cuales el 10% es el peso de la cáscara (5 a 6 gramos); del 58% al 60%, es el de la clara (32-36 gramos); y del 30% al 32% restante, es el de la yema (16-18 gramos) (Zuluaga y Fernandez, 2014).

Según Thapon y Bourgeois (1994), la cáscara tiene aproximadamente el 11% del peso total del huevo y presenta contenidos de: carbonato de calcio (94%), fosfato de calcio (1%), carbonato de magnesio (1%) y sustancias orgánicas 4%). Por lo tanto, la cáscara de huevo es una rica fuente de sales minerales, principalmente carbonato de calcio. Desafortunadamente, la cáscara del huevo es un residuo de la industria de este producto, sin embargo, este aspecto abre la posibilidad para proponer nuevos usos de este material.

La composición química de la cáscara de huevo pulverizada, realizada por el método de perla fundida y analizada por Fluorescencia de Rayos X en un equipo ARL9900 fabricado por Thermo Fisher Scientific, en el Laboratorio de Aseguramiento de Calidad de CEMEX, da como resultado los siguientes valores:

ID NAME	COMPOSICIÓN QUÍMICA								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅
Cascara de Huevo Pulverizada	0.25	0.04	0.00	52.17	0.52	0.22	0.04	0.01	0.30

Tabla 4. Composición Química en porcentaje de la Cáscara de Huevo

6.3.9.2.1 Carbonato de Calcio (CaCO₃)

La cáscara de huevo se compone de varias capas de carbonato de calcio que crecen mutuamente; desde la capa más interna de la capa maxilar (=100 μm) a la membrana más externa del huevo creando la base sobre la que la capa de empalizada constituye la parte más gruesa (igual a 200 μ) de la cáscara. La capa superior es una capa vertical (igual a 5,8 μ) cubierta por la cutícula orgánica (Lea, 1990).

Es un compuesto químico con fórmula CaCO₃, el cual tiene propiedades reactivas con los ácidos y el dióxido de carbono y azufre. La forma termodinámicamente estable de CaCO₃ en condiciones normales es hexagonal β-CaCO₃.

El carbonato de calcio es una sustancia común encontrada como roca en todas partes del mundo. Es el componente principal de cáscaras de organismos marinos, de caracoles y de las cáscaras del huevo y el ingrediente activo en la cal agrícola, además, es generalmente el origen principal del agua dura. Este compuesto es comúnmente utilizado en medicina como un agregado de calcio o como un antiácido, pero su alto consumo puede ser peligroso (Ramesh, Narasimha y Krishna, 2012).

La cáscara de huevo tiene la particularidad de absorber el dióxido de carbono para formar hidrógeno puro y convertirse en una fuente de energía, así que posee una gran cantidad de carbonato de calcio, un compuesto que tiene la propiedad de ser un potente absorbente (captura el 78% del dióxido de carbono); este se calienta a una determinada temperatura para obtener óxido de calcio que tiene la propiedad de reaccionar con cualquier gas ácido con el fin de aislar el dióxido de carbono del hidrógeno (Perez y Villegas 2009).

De acuerdo con el estudio fisicoquímico del carbonato de calcio de la cáscara de huevo realizado por Murakami y colaboradores, se determinó que el carbonato de calcio (B) contenido presenta picos o señales en los difractogramas similares al patrón de Carbonato de Calcio (A) obtenido por la técnica analítica de Difracción de Rayos X, además los picos son agudos, lo cual

representa una alta cristalinidad como se representa en la Figura 20 (Seigi, Oening, Teixeira y Segatto, 2007).

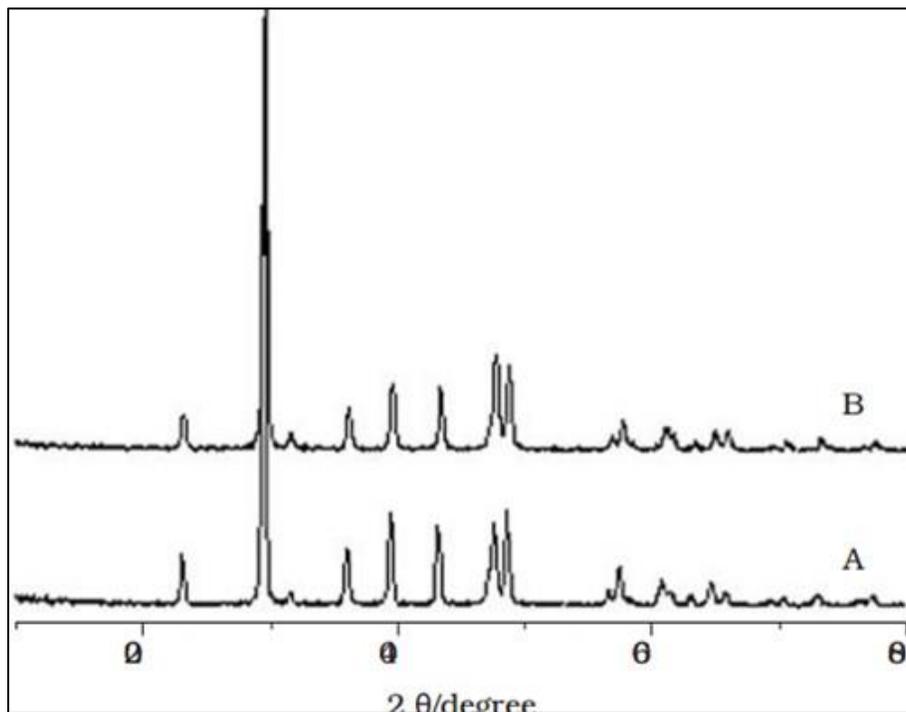


Figura 20. Difracción de Rayos X de polvos: Patrones de carbonato de calcio industrial (A) y carbonato de calcio de cáscara de huevo (B) (Seigi, Oening, Teixeira y Segatto, 2007).

Los autores anteriormente mencionados, estudiaron la morfología de las partículas por microscopía óptica para ambos tipos de carbonatos de calcio. Las fotomicrografías de los productos se muestran en la Figura 21. Las imágenes de producto industrial (*Fig. 21a*) y producto de cáscara de huevo (*Fig. 21b*) indican que estos polvos son preferiblemente cristalinos y el tamaño del producto de la cáscara de huevo es mayor que los cristales de carbonato de calcio industriales. La diferencia encontrada entre el tamaño de los cristales puede relacionarse con la estabilidad térmica del producto de cáscara, una vez que la estructura y el tamaño de los cristales están directamente correlacionados con la estabilidad.

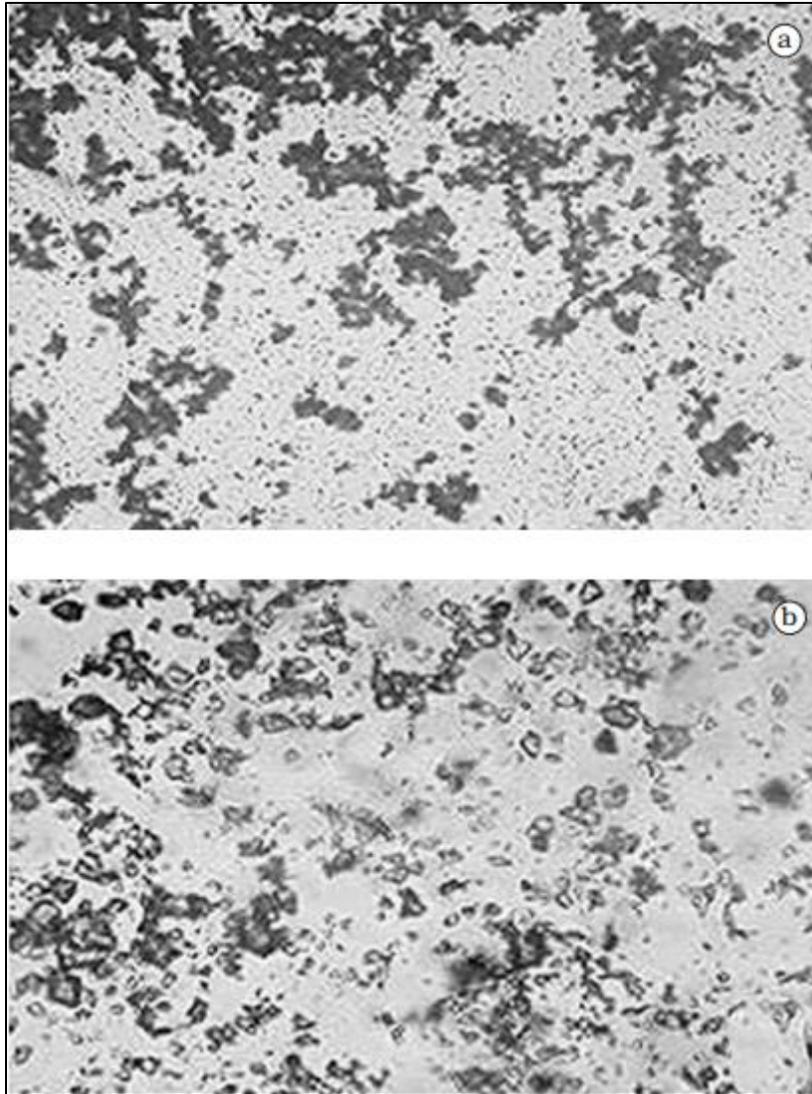


Figura 21. Microscopía óptica de carbonato de calcio industrial (a) y carbonato de calcio de la cáscara de huevo (b) con un aumento de 400x (Seigi, Oening, Teixeira y Segatto, 2007).

6.3.9.2.2 Carbonato de Magnesio ($MgCO_3$)

La fórmula química es $MgCO_3$ (nombre arcaico magnesia alba), es una sal inorgánica cuya apariencia es un sólido blanco. En la naturaleza se presenta de diferentes formas, dependiendo de la meteorización o a la exposición de presión y temperatura (Thomas Scientific, 2018).

El principal uso de esta sal es la producción de óxido de magnesio por calcinación. Magnesita y dolomita son los minerales que se utilizan para producir ladrillos refractarios, siendo esta una de sus principales aplicaciones. Seeger, Otto, Flick, Bickelhaupt y Akkerman (2005) refiere que el $MgCO_3$ también se utiliza en suelo, protección contra incendios, composiciones de extinción de incendios, cosméticos, polvo de espolvoreo, y pasta de dientes. Otras aplicaciones son su uso

como material de relleno, supresor de humo en plásticos, un agente de refuerzo en neopreno de goma, un agente de secado, un laxante para aflojar los intestinos, antiaglomerante en fármacos y la retención del color en los alimentos. Además, en alta pureza el carbonato de magnesio se usa como antiácido y como aditivo en la sal de mesa.

Debido a su baja solubilidad en agua y propiedades higroscópicas, el $MgCO_3$ se añadió primero a la sal en 1911 para hacerla fluir más libremente. Este compuesto que a menudo es llamado “tiza”, también se utiliza como un agente de secado en las palmas de atleta en la escalada en roca, gimnasia y levantamiento de pesas.

6.3.9.2.3 Fosfato Tricalcico

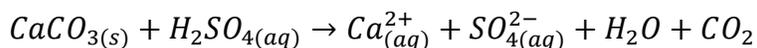
La fórmula química es $Ca_3(PO_4)_2$. También se conoce como fosfato tribásico de calcio y fosfato de hueso de cal (BPL) cuya apariencia es un sólido blanco de baja solubilidad. La mayoría de las muestras comerciales de "fosfato tricálcico" son, de hecho, la hidroxiapatita (Schrödter et al.2008).

El fosfato tricálcico se utiliza en especias en polvo como un agente antiaglutinante, por ejemplo, para evitar apelmazamiento de la sal de mesa (Schrödter et al.2008).

6.3.9.3 Comportamiento fisicoquímico de la cáscara de huevo pulverizada en las vías

Básicamente, las cáscaras de huevo resultantes de los procesos industriales se utilizan para la agricultura, con el fin de corregir el pH de los suelos ácidos. Aunque son de valor económico cuando se utilizan de esta manera, este producto de desecho está actualmente infravalorado. Además, las implicaciones medioambientales deben considerarse en los intentos de añadir valor a los materiales de cáscara de huevo en lugar de descartarlos. Además, el uso de estas cáscaras como fuente alternativa de $CaCO_3$ (Carbonato Cálcico) puede reducir el impacto sobre las reservas naturales de caliza, una fuente natural no renovable Neves (1998) y Boron (2004).

Al utilizar la cáscara de huevo pulverizada en suelos de característica ácida (generalmente sulfatos ácidos), este compuesto reacciona liberando iones de calcio y el magnesio (1) y promueve la desestabilización de los iones de aluminio en la arcilla como se ilustra en la ecuación 3:

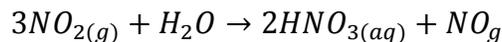
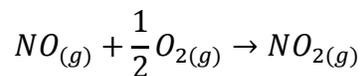
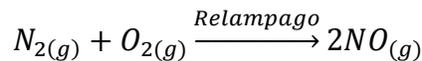
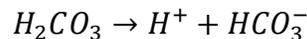
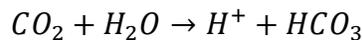
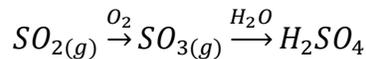


Ecuación 3. Reacción de Carbonato de Calcio con el Ácido Sulfúrico producto del agua lluvia

En los suelos arcillosos la acidez es debido a las lluvias ácidas producidas por la contaminación ambiental. En Antioquia y en otras ciudades de Colombia, se debe por ejemplo al uso de

vehículos, quemas inadecuadas, liberación de gases de fábricas, etc. Datos correspondientes a marzo del presente año de acuerdo con el informe de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá operada por el Sistema de Alertas Tempranas de Medellín, una de las cinco estaciones de monitoreo la PM2.5 reportó un Índice de Calidad del Aire Naranja, clasificado como dañino para grupos sensibles. Por lo tanto, las concentraciones de NO_x, CO₂ y SO_x son altas, lo que posibilita que la región antioqueña tenga precipitaciones de lluvias ácidas. Además, en el 2015 según Paola Morales Escobar periodista El Tiempo, menciona datos de un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en la cual Medellín es la novena ciudad con mayor índice de gases de efecto invernadero en Latinoamérica, después de Cochabamba (Bolivia), Lima (Perú), Río de Janeiro (Brasil), Monterrey y Toluca, (México), Guatemala, Tegucigalpa (Honduras) y Belo Horizonte (Brasil) (Morales, 2016).

Siendo así, la erosión de los carbonatos aplicados a los suelos arcillosos es inmediata, ya que los contenidos de NO_x, CO₂ y SO_x en presencia de lluvia reaccionan formando compuestos ácidos tanto débiles como fuertes (Ecuación 4). Por lo tanto, la liberación de iones de calcio y magnesio es inminente y contribuyen a el origen de la cementación. Las reacciones que se presentan son lentas debido a la concentración del ácido en el sistema de arcilla.



Ecuación 4. Reacciones de Acidificación por influencia de agua lluvia

El carbonato de Calcio y Magnesio, y el Fosfato Tricalcico, presentes en la cáscara de huevo pulverizada cumplen la función de agentes antiaglutinantes "naturales". Algunos agentes antiaglutinantes son solubles en agua, mientras que otros son solubles en alcoholes u otros disolventes orgánicos. Estos funcionan absorbiendo el exceso de humedad o recubriendo las partículas y haciéndolas hidrófobas.

Los científicos Purabi Sen, Mahabir y R Chitra (2016), determinaron que la naturaleza diferente de la arcilla se debe a la carga eléctrica neta sobre ella (*Fig. 22*).

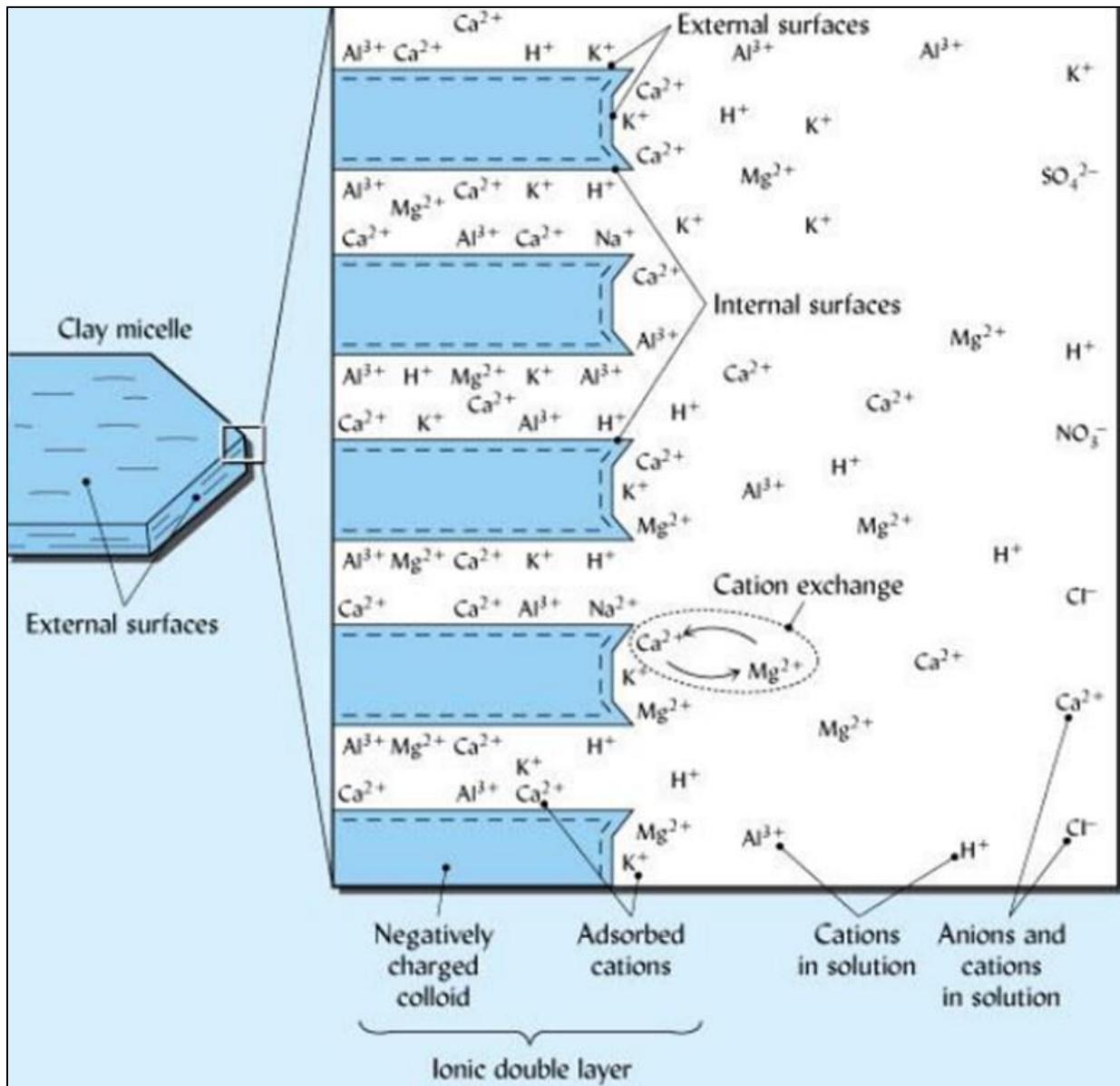


Figura 22. Representación de un cristal de arcilla, su complemento de cationes adsorbidos e iones en la solución del suelo circundante (Purabi, Mahabir y Chitra, 2016).

En general, la superficie de las partículas de arcilla está cargada negativamente mientras que sus bordes están cargados positivamente. Para preservar la neutralidad eléctrica, la carga negativa de la partícula de arcilla se equilibra por la atracción de cationes que se mantienen entre las capas y sobre la superficie de las partículas. La superficie de arcilla cargada junto con los contra-iones en el agua de poro forma doble la capa difusa que está influenciada por la valencia de los contra-iones y la temperatura.

7. CONCLUSIONES

La estabilización del suelo es una técnica dirigida a aumentar o mantener la integridad de la masa de material y química con el objetivo de mejorar sus propiedades de ingeniería. La estabilización se puede utilizar para tratar una amplia gama de los materiales del subgrado, desde la arcilla expansiva a los materiales granulares. Esto permite el establecimiento de criterios de diseño, así como la determinación del aditivo químico adecuado y la tasa de adición que se utilizará para lograr las propiedades deseadas. Las ventajas del proceso de la estabilización pueden incluir valores más altos de la resistencia, reducción en plasticidad, una permeabilidad más baja, reducción del grueso del pavimento, eliminación del material de la excavación que acarrea o que maneja. La estabilización de suelos expansivos con aditivos controla el potencial de los suelos para un cambio de volumen y mejora la fuerza de los mismos.

De acuerdo con la información recolectada, el carbonato de calcio y magnesio, y el fosfato de calcio de la cáscara de huevo no presentan reacción química inmediata sobre el suelo arcilloso. Sin embargo, cuando se pulveriza el material, este presenta afinidad con el agua contenida en la superficie de la arcilla, provocando una leve solubilidad, favoreciendo que el calcio reaccione con la arcilla. Por lo tanto, la adición de cáscara de huevo pulverizada da lugar a la mejora de la fuerza del suelo y favorece el aumento de la UCC (Resistencia a la Compresión no Confinada). Por otro lado, se observó que la cáscara de huevo adicionada en determinadas proporciones con otros agentes químicos permite importantes progresos en límites de Atterberg y en la mejora de la resistencia del suelo estabilizado.

En los diferentes estudios consultados, se identifica que la cantidad de cáscara de huevo pulverizada utilizada para estabilización efectiva de arcillas no supera el veinte por ciento (20%), sin embargo, cuando es mezclada con otros agentes estabilizadores su efecto puede ser mayor. Lo anterior sugiere que la cáscara de huevo no se puede reemplazar al cien por ciento (100%) como un material para una estabilización efectiva a menos que se lleven a cabo algunas investigaciones adicionales. Sin embargo, este material se puede utilizar para la estabilización de suelo donde no sea necesario el alto rendimiento de subgrado.

La alta demanda del consumo de huevo de gallina en Colombia, genera el desecho de la cáscara que es tratado con un residuo doméstico. La cáscara de huevo es una alternativa eficiente y rentable que lograría disminuir la utilización de otros agentes químicos y a su vez reducir el costo de la construcción de Autopistas como por ejemplo las planificadas en Antioquia. Además, debido a las condiciones ambientales que presenta el departamento como la acidez en sus suelos arcillosos y las lluvias ácidas, se favorece la adecuada reacción química que posibilita la modificación de la arcilla debida a este tipo de agente químico, lo cual podría aumentar la resistencia del suelo para la construcción y restructuración de las vías.

Para los proyectos que se ejecutaran en los sitios de Donmatias, Remedios, Segovia y Puerto Berrio, la estabilización del suelo arcilloso con la cáscara de huevo tendría un mejor impacto dado la alta concentración de acidez presente en esos suelos. El Al^{+3} presente en la arcilla el causante de la condición ácida de estas regiones facilita el intercambio de iones con la cáscara de huevo pulverizada. Por último, el uso de la cáscara como agente estabilizador de suelos expansivos para la construcción de vías lograría reducir la contaminación de fuentes hídricas y suelos que se presentar como consecuencia del uso de otros agentes químicos. Además, se incentiva el uso de materiales catalogados como residuos en el país.

8. RECOMENDACIONES

La adición de cáscara de huevo pulverizada permite modificar la afinidad con el agua y la estructura química de la arcilla, impactando positivamente en los límites líquido, plástico y de encogimiento, aumentando la resistencia del suelo arcilloso, por lo tanto, se recomienda realizar otros estudios como la absorción de agua, permeabilidad, variación en el tiempo de compactación, resistencia al corte directo, ensayos triaxial bajo diferentes condiciones de carga, tiempo de reacción química con suelos ácidos y alcalinos, y ensayos de Microscopia Electrónica de Barrido y Difracción de Rayos X sobre las especies químicas que se generan en el proceso y que hacen parte del mecanismo de reacción.

BIBLIOGRAFIA

Arora K (1984). Soil Mechanics and Foundation Engineering. Springer, 54(1), 56-78. Recuperado de <https://link.springer.com/journal/11204>

Avícola, Portal Financiero, Económico y Empresarial (17 de abril de 2017). El Auge del Huevo. SECTORIAL. Recuperado de <https://www.sectorial.co/informativa-avicola/item/52703-el-auge-del-huevo-en-colombia>.

Bada, D, F. (2016). Aplicación del Aditivo Químico Conaid para Atenuar la Plasticidad del Material Granular del Tramo de la Carretera Tauca – Bambas (Km 73+54-Km132+537) de la Ruta Nacional pe-3na (tesis de postgrado). Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo – Perú.

Baser O. (2009). STABILIZATION OF EXPANSIVE SOILS USING WASTE MARBLE DUST (Tesis de Postgrado). Middle East Technical University, Metu, Turquía.

Bushman W. H., Freeman T. E., y Hoppe E. J. (2004). Stabilization Techniques for Unpaved Roads. Charlottesville, Virginia. Recuperado de http://www.virginiadot.org/vtrc/main/online_reports/pdf/04-r18.pdf

CEMEX MEXICO (2004). Prontuario para Diagnostico del Proceso, Capitulo 1 Canteras (pag. 5 -14). Código DP-001.

Circeo, L. J. (1961). Strength-maturity relations of soil cement mixtures. Unpublished M. S. thesis. Ames, Iowa. Library, Iowa State University of Science and Technology. Recuperado de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbulletin/353/353-005.pdf>

Competitividad y Desarrollo Colombia (2016). En Marcha, Grandes Proyectos de Desarrollo Nacional. Comunicaciones Publicas Colombia, edición 1, 20-21.

Comparerocks (1985-2016). Encyclopaedia Britannica [versión electrónica]. New York, EU: <http://www.comparerocks.com/en/properties-of-marble/model-4-6>.

Croft C. P., McGeory D. y Carlson D. H. (1999). Physical Geology, 8th Ed. New York: McGraw Hill Companies Inc. 48-56.

Garnica P. A., Pérez A., Góme J. A., López Z. y Obil E. Y. (2002). Estabilización de Suelos con Cloruro de Sodio para su Uso en las Vías Terrestres. Publicación Técnica No.20, Sanfandila. Recuperado de <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt201.pdf>.

Gass I, Peter J. Smith y R. C. L. Wilson (1980). Introducción a la Ciencias de la Tierra. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=GAZs7W6IEKMC&printsec=frontcover&dq=Composici%C3%B3n+de+la+Corteza+terrestre+libro&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj09->

uqt8zYAhXwkeAKHWVYC3AQ6AEIKzAB#v=onpage&q=Composici%C3%B3n%20de%20la%20Corteza%20terrestre%20libro&f=false.

Handy, R. L. (1958) Cementation of soil minerals with Portland cement or alkalis. Highway Research Board Bulletin 198. Recuperado de <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwii26O3jovYAhXMKCYKHZelDNgQFggpMAA&url=http%3A%2F%2Fonlinepubs.trb.org%2FOnlinepubs%2Fhrbbulletin%2F198%2F198-006.pdf&usg=AOvVaw18DqA0OhsiQG-a5zXH8uH4>

HYDRAM LTDA. (2015). Estabilizador electroquímico de arcillas. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://hydrاملtda.com/geostab.html>.

James J. y Kasinatha P. (2013). Performance Study on Soil Stabilisation using Natural Materials. International Journal of Earth Sciences and Engineering. 6 (1), 194-203.

Knox E. y F. Maldonado (1969). Suelos de Cenizas Volcánicas; Excursión al volcán Irazú (pág. A.3.1). Centro de Enseñanza e Investigación del IICA, Turrialba, Costa Rica.

Lea F. (1990). Pozzolans and Lime Pozzolan Mixed. Building Research Technical Paper, 27(1), 20-25.

Lewis D, (1990). Ion Exchange Reactions of Clays. Senior Chemist, Exploration and Production Research Division, 201(1), 54-68. Recuperado de <http://www.clays.org/journal/archive/volume%201/1-1-54.pdf>.

Lobo A. (1987). Geología de Colombia. Dirección Nacional Para la Prevención y Atención de Desastres. 1187, p. 2-3.

Londoño (1998). Geoformas asociadas al Batolito Antioqueño (pág. 133- 143). Geología Colombiana. Santafé de Bogotá.

Londoño C. y Alvarez J. (2008). Manual de diseño de pavimentos de concreto: para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito. Instituto Colombiano de Productores de Cemento – Medellín. 114p. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3807-manual-de-diseno-de-pavimentos-de-concreto-para-vias-con-bajos-medios-y-altos-volumenes-de-transito/file>.

López V., Ascanio G., Guerrero V. (2003). Rocas Industriales de Venezuela / Fundacite Aragua. Recuperado de http://www.fundacite-aragua.gob.ve/pdf/rocas_industriales.pdf

Mendoza E. & Murillo Y. (2013). Evaluación de la aplicación de residuos de minería de yeso (Mesa de los Santos, Santander) en la estabilización química de suelos (Tesis de Pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Meza E. (2012). Suelos Parcialmente Saturados, de la Investigación a la Cátedra Universitaria. Revista digital UNAL, (31), 23-38.

Mitchell J. K. y Radd L. (1973). Of workshop on expansive clays and shales in highway design and construction. Washington D.C. EE.UU., p. 200 – 217. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/298659416_WORKSHOP_ON_EXPANSIVE_CLAYS_AND_SHALES_IN_HIGHWAY_DESIGN_AND_CONSTRUCTION_PROCEEDINGS_1972_3_VOLUMES.

Morales E. P. (05 de abril de 2016). Pese a tener metro y tranvía, Medellín sufre por la contaminación. El tiempo, 1.

Morton J. (1914). MortonSalt: When it rains it pours. Chicago – EU. Recuperado de www.mortonsalt.com.

Muthy R.V. (1998). Study on swell pressure and method of controlling swell of expansive soil (Tesis de Postgrado). Kakatiya University, REC, Warangal.

Nyamangara J., Munotengwa S., Nyamugafata P. y Nyamadzawo G. (2007). The effect of hydroxide solutions on the structural stability and saturated hydraulic conductivity of four tropical soils. South African Journal of Plant and Soil, 24:1, p. 1-7. DOI: 10.1080/02571862.2007.10634773.

Ocampo D., Hernández L., Valencia Y. y Echeverri O. (2010). Análisis de las alteraciones físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas de un suelo residual de Batolito Antioqueño contaminado con gasolina. Medellín. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/306254875>.

Odit G (1998). Basic Soil Mechanics. New York, EE. UU: McGraw Hill Companies Inc.

Oficina de Comunicaciones (2013). Cuarta Generación de Concesiones, Autopistas para la Prosperidad. Agencia Nacional de Infraestructura – ANI, Bogotá D.C, Colombia. Recuperado de <http://www.ani.gov.co/article/conexion-pacifico-de-autopistas-para-la-prosperidad-enorme-progreso-para-colombia-5155>

Perez M, & Villegas R. (2009). Procedimientos para el Manejo de Residuos Orgánicos Avícolas (tesis de pregrado). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Petry T. M. & Armstrong J. C. (1989). Stabilization of Expansive Clay Soils. Transportation Research Record 1219 (p. 7). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/294158827_Stabilization_of_expansive_clay_soils.

Purabi S., Mahabir D. y Chitra R. (2016). Effect of Chemicals on Index Properties of Soil. (4), 352-359. Recuperado de <http://pnrsolution.org/Datacenter/Vol4/Issue1/47.pdf>

Ramesh P, Narasimha A y Krishna A, (2012). Efficacy of Sodium Carbonate and Calcium Carbonate in Stabilizing a Black Cotton. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(10), 197-201. Recuperado de <http://www.ijetae.com>.

Restrepo N. G. (2016). *Influencia de las élites patronales de Antioquia en la Políticas Socioeconómicas Colombianas*; Recuperado de <https://books.google.com.co/books?isbn=9589219020>.

Roldan de Paz J. (2010). *Estabilización de Suelos con Cloruro de Sodio (NaCl) para Bases y Sub-Bases (Tesis de Pregrado)*. Universidad de San Carlos, Guatemala.

Schrödter K., Bettermann G., Staffel T., Wahl F., Klein T. y Hofmann T. (2008). Phosphoric Acid and Phosphates. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, 33(2), 55-76. doi: 10.1002/14356007.a19_465.pub3.

Seeger M., Otto W., Flick W., Bickelhaupt F. y Akkerman O. (2005). Magnesium Compounds. doi: 10.1002/14356007.a15_595.pub2

Iannacchione A. T. & Vallejo L. E. (2000). Shear Strength Evaluation of Clay-Rock Mixtures. doi: 10.1061/40512(289)16

Seigi F, Oening P, Teixeira C y Segatto M. (2007). Physicochemical study of CaCO₃ from egg shells. 27(3), p.658-662.

Suarez J. (2001). *Geología Tropical*. División Editorial y de Publicaciones – Universidad de Santander. Bucaramanga, Colombia. P. 456.

Taha I., Raihan M., Hameed Z y Khan T. (2014). Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative. *Maxwell Scientific Organization, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 8(4): 510-520. doi: 10.19026/rjaset.8.1000

Thomas Scientific (2018). *Spectrum Chemical Magnesium Carbonate*. Estado Unidos. Recuperado de https://www.thomassci.com/Chemicals/Salts/_/Magnesium-Carbonate-Light-Powder-USP?q=Magnesium%20Carbonate.

Vicepresidencia de la Republica de Colombia (2014). Sala de Prensa: "Antioquia es el departamento más beneficiado con concesiones viales 4G": Vargas Lleras. Recuperado de <http://www.vicepresidencia.gov.co/prensa/2014/Paginas/Antioquia-es-el-departamento-mas-beneficiado-con-concesiones-viales-4G-141210.aspx>.

Yilmaz I. y Civelekoglu B. (2009). Gypsum: An additive for stabilization of swelling clay soils. *ELSEVIER, ScienceDirect*, 44 (1-2), 166-172.

Zuluaga D. & Fernandez P, (2014). Estudio de Mercado del Huevo como Materia Prima para la Elaboración de Ovoproductos (tesis de postgrado). Universidad EAFIT, Medellin.

HORN, G.F.J. y STRYDOM, J.H. (1998). Mineral resource of South Africa. p.106–109.

MCFARLANE, A.J., BREMMEL, K.E., y ADDAI-MENSAH, J. (2005) Optimising the dewatering behaviour of clay tailings through interfacial chemistry, orthokinetic flocculation and controlled shear, Powder Technology, vol. 160. pp. 27–34.

Dempsey, B. J. y Thompson, M. R. (1968). Durability Properties of Lime – soil Mixtures. Highway Research Record, n°. 235, p. 61-75.