

ESTUDIO DE LA MEJORÍA DE UN SUELO TROPICAL A PARTIR DE TÉCNICAS BIOTECNOLÓGICAS UTILIZADAS EN CAMPO

A FIELD STUDY ON THE IMPROVEMENT OF A TROPICAL SOIL WITH BIOTECHNOLOGICAL TECHNIQUES

YAMILE VALENCIA GONZÁLEZ

DSc. Profesora Asistente. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. yvalenc0@unal.edu.co.

JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO

DSc. Profesor Titular. Universidad de Brasilia. camapum@unb.br.

LUIS AUGUSTO LARA VALENCIA

DSc. Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. lualarava@unal.edu.co.

Recibido para revisar Julio 22 de 2011, aceptado Diciembre 12 de 2011, versión final Febrero 13 de 2012

RESUMEN: Esta investigación aborda un campo técnico de la biotecnología aplicada a la construcción civil con el objetivo de mejorar el comportamiento físico-mecánico y/o hidráulico de suelos tropicales albo de obras de ingeniería en general. El proceso de mejoría de suelos desarrollado, se distingue de los métodos normalmente utilizados donde se incorporan determinados microorganismos al suelo o conjuntamente microorganismos específicos y medios nutrientes. La técnica corresponde a un método ambientalmente limpio, en el cual se toma provecho de las bacterias nativas presentes en el suelo, apenas se promueve la adición en el medio de un nutriente B4 (15g de acetato de calcio, 4g de extracto de levadura y 5g de glucosa, para 1 litro de agua destilada, pH 8,0). Este nutriente induce la biomineralización o precipitación de minerales de carbonato de calcio, por medio de las bacterias nativas existentes en un suelo en estado natural o compactado. La mejoría del comportamiento mecánico y/o hidráulico ocurre en su gran mayoría en un intervalo de quince días después de la adición del nutriente, verificándose por medio de ensayos compatibles con la aplicación del suelo, tales como resistencia al corte, consolidación, permeabilidad, erodabilidad etc. El efecto de estas alteraciones de comportamiento se ve reflejado en la mayor estabilidad estructural del suelo. Este resultado es bastante favorable a las actividades de ingeniería civil, ligadas a la construcción, conservación, mantenimiento y prevención de las obras en general. Ella puede aún ser analizada como una técnica de estabilización de laderas y taludes en general.

PALABRAS CLAVE: Biotecnología, Suelo tropical, Carbonato de calcio, Construcciones civiles.

ABSTRAC: This research studies biotechnology applied to civil engineering construction in order to improve the physical, mechanical and hydraulic behavior of tropical soils. The method used is considered environmentally clean as this process is not a method of incorporation of certain microorganisms to the soil or addition of specific microorganisms into nutrient media. The process used consists in adding only B4 nutrient to the soil (15g of calcium acetate, 4g of yeast extract and 5g of glucose to 1 liter of distilled water, pH = 8.0), which induces the precipitation of calcium carbonate minerals (biomineralization), caused by the native bacteria existing in the soil. The improvement of the mechanical and hydraulic behavior occurs in about fifteen days after the addition of the nutrient, which is verified by tests compatible with the application of the soil such as shear strength, density, permeability, erosion potential, etc. Soil improvement is a consequence of the increase of soil structural stability. This result is quite favorable to the activities of civil engineering related to construction, maintenance and preservation of civil works in general.

KEYWORDS: Biotechnology, Tropical soil, Calcium carbonate, Civil construction.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo, especialmente tropical, presenta una amplia gama de variaciones en sus propiedades geológico-geotécnicas por estar influenciados, entre otros, por factores climáticos, geológicos, hidrológicos y por la biodiversidad. Estas características pueden no ser previsibles por los procedimientos tradicionales de

clasificación geotécnica establecidos para suelos de regiones de clima templado (Delgado, 2002). Adicionalmente, como los materiales que atienden las especificaciones tradicionales no son fácilmente encontrados en todas las regiones de clima tropical, se tornan esenciales los estudios en suelos tropicales y el uso de diferentes técnicas de mejoramiento de estos suelos. Alternativas innovadoras como la biotecnología

pueden ser usadas. Una de las técnicas biotecnológicas es la biomineralización, que busca exactamente aprovechar la biodiversidad presente en el suelo para mejorar sus propiedades y comportamiento, por medio de la acción bacteriana a partir de la incorporación de un nutriente al suelo.

La biomineralización es un proceso común en la naturaleza mediante el cual los organismos vivos forman precipitados minerales cristalinos o amorfos; ocurre por acciones químicas entre iones específicos o compuestos, como resultado de las actividades metabólicas de un organismo en ciertas condiciones ambientales. La “Carbonatogénesis” es un buen ejemplo de biomineralización en el cual se produce la precipitación de carbonatos (Lee, 2003). Entre estos precipitados se encuentran los precipitados de carbonato de calcio (CaCO_3). La ecuación (1) muestra la reacción de equilibrio para la formación de estos precipitados (CaCO_3), representado por la reacción entre iones de calcio (Ca^{+2}) y carbonato (CO_3^{-2}):



La precipitación de carbonato de calcio ocurre fácilmente en ambientes alcalinos y medios abundantes en calcio y/o iones de carbonato (Lee, 2003). De esta forma, las bacterias, microorganismos de mayor abundancia y diversidad entre las especies del suelo, tienen la función principal en el proceso de carbonatogénesis, asociado a su habilidad en crear ambientes alcalinos e incrementar la concentración del carbono inorgánico diluido (DIC) por medio de varias actividades fisiológicas (Hammes & Verstraete, 2002).

En el mundo, los estudios en biotecnología comenzaron al final del siglo XIX (1899/1903) en el lago Veisovoe en Kharkov (Rusia), en especial con la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3). Posteriormente, los trabajos con biomineralización fueron aplicados en la conservación de monumentos y en la protección contra el deterioro de materiales utilizados en la construcción civil, como las piedras ornamentales y los concretos. Investigaciones hechas en Holanda (Whiffin et al., 2005) avanzaron aplicando la técnica de “biosellado” (biosealing) que consiste en taponar los poros de suelos arenosos. Y como último proceso se tiene la “bioestabilización”, que se fundamenta en el mejoramiento de las propiedades del suelo mediante la

adición de microorganismos y nutriente en él (Gómez, 2006).

En suelos compactados con fines de pavimentación, algunos autores como Echeverri & Santander (2004) y Lo Bianco & Madonia (2007) usaron técnicas de estabilización de suelos para subrasante, diferentes a las comúnmente utilizadas de estabilización con cloruro de calcio (Orobio, A., 2011). Estos autores, trataron biológicamente los suelos, observando un aumento del CBR (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California) después del tratamiento.

Las invenciones en biotecnología desarrolladas hasta el momento se sitúan en el campo de la mejoría de las propiedades y/o comportamiento del material por medio de la incorporación de bacterias y de nutrientes con bacterias. El gran problema de estos métodos en el proceso de mejoría de suelos biotecnológicamente, está relacionado con el posible riesgo ambiental producto de la adición de microorganismos extraños al medio.

A diferencia de las otras técnicas descritas anteriormente que adicionan microorganismos, la técnica adoptada en el presente trabajo consiste en la estimulación, por medio de un nutriente, de los microorganismos nativos presentes en un suelo tropical natural y compactado para generar la precipitación de carbonato de calcio, analizando la contribución de la precipitación en la mejoría de los parámetros físico-mecánicos y/o hidráulicos del suelo. El procedimiento consistió en la aplicación del nutriente directamente en campo en un suelo en estado natural y en un suelo deformado/compactado, pretendiendo evaluar el potencial de utilización de la técnica de biomineralización a escala real.

2. METODOLOGÍA

2.1 Selección y caracterización del local de estudio

El área de estudio, seleccionada por la representatividad regional del suelo, se localiza en el campo experimental del Programa de Pos-graduación en Geotecnia de la Universidad de Brasilia – Distrito Federal, Brasil (coordenadas $15^{\circ}45'59,84''\text{S}$ y $47^{\circ}52'22,51''\text{W}$). Geológicamente, la región del Distrito Federal presenta una cobertura detrítico-laterítica terciaria, sobre rocas Pré-Cambrias, predominando ardósias, cuarzos, meta-arenitos y metarritmitos del grupo Paranoá. Los

tipos de suelos predominantes en el Distrito Federal son los Latosuelos rojos-oscuros y rojos-amarillos y los Cambisuelos. La laterización se caracteriza por ser el proceso pedogenético que controla la formación de los suelos de esta región. Con relación al clima, actualmente es caracterizado por la existencia de dos estaciones, una lluviosa y caliente entre los meses de octubre y abril, y otra fría y seca entre los meses de mayo y septiembre. La media pluviométrica anual varía entre 1500mm y 2000mm. La temperatura media

anual está entre 13°C y 22°C y una humedad relativa variando entre 11% y 75%. (Souza et al., 2004). La tabla 1 presente los resultados de la caracterización geotécnica general realizada por Guimarães (2002) al perfil de suelo del local de estudio. El horizonte de trabajo se encuentra ubicado entre 0,20m a 1,20m de profundidad; horizonte seleccionado, por permitir acondicionar la zona de trabajo con mayor facilidad y por ser el primer material disponible en una excavación como fuente de compactado.

Tabla 1. Características geotécnicas del campo experimental de la Universidad de Brasilia (Modificado de Guimarães, 2002)

Parámetro	Profundidad (m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
γ_s (kN/m ³)	26,86	26,78	26,11	25,97	26,94	25,75	26,52	26,25	27,15	27,62
γ_b (kN/m ³)	10,32	10,41	11,49	11,46	11,96	11,98	12,82	13,86	13,84	13,29
e	1,60	1,57	1,27	1,27	1,25	1,15	1,07	0,89	0,96	1,08
n (%)	61,6	61,1	56,0	55,9	55,6	53,5	51,7	47,2	49,0	51,9
w _L (%)	38	36	39	41	45	44	46	43	44	46
W _p (%)	28	26	29	29	34	33	35	34	26	30
Ip (%)	10	10	10	12	11	11	11	9	18	16
Ia	0,29	0,33	0,30	0,29	0,26	0,21	0,21	0,21	2,00	4,71

2.2. Determinación del potencial de las bacterias nativas a precipitar carbonato de calcio

Para determinar el potencial de las bacterias nativas a precipitar carbonato de calcio, se debe primero identificar las bacterias presentes en el suelo. Para ello, se recolecta muestra deformada de suelo a 1,0m de profundidad y se procede al aislamiento bacteriano, para el cual se toman aproximadamente 10g de suelo y se realiza un proceso de dilución en la proporción 1:10 en 90ml de agua peptonada al 1%. Posteriormente se colecta 1ml de la dilución y se mezcla con 9ml de agua tamponada para obtener una nueva dilución en la proporción 1:100. Cada dilución es incubada en una estufa bacteriológica a una temperatura de 25°C durante 24 horas, y distribuidas en forma de estrías con alza de platina, en placas con agar sangre de cabra al 5%, para crecimiento de la población bacteriana y posterior separación visual de las bacterias diferentes (Cardoso et. al., 1992). Si se quisiera identificar con exactitud el tipo de colonia bacteriana que se tiene, se podrían efectuar prueba bioquímicas, pero esto no es un requisito indispensable para determinar el potencial que tienen estas bacterias a precipitar carbonato de calcio. Después de aisladas, las colonias, éstas son colocadas en placas petri conteniendo el medio

nutriente precipitador de carbonato de calcio, B4 (15g de acetato de calcio, 4g de extracto de levadura, 5g de glucosa y 12g de agar, para 1 litro de agua destilada, pH 8,0), propuesto por Lee (2003) y utilizado con buenos resultados en suelos, en el trabajo de Valencia (2009).

De acuerdo con lo reportado en la literatura (Baskar et al., 2006), para tener una mayor precipitación de carbonato de calcio, son necesarios como mínimo 15 días de contacto entre las bacterias y el medio B4 a 25°C. El crecimiento de las bacterias en este medio es asociado al potencial de precipitación (Valencia, 2009).

2.3. Evaluación del efecto desagregador del nutriente

Los suelos superficiales de este perfil por su alto estado de meteorización presentan óxidos de hierro y aluminio que forman agregaciones entre las partículas, de ahí la importancia de evaluar el efecto desagregador del nutriente en el suelo. Para ello, se recolectaron muestra de suelo deformada a la profundidad de trabajo seleccionada (1,0m), las cuales se dividieron en bolsas y se les adicionó el nutriente B4, homogenizando el conjunto. Por medio de análisis granulométrico por sedimentación de las muestras en estado húmedo, se verifica el efecto desagregador, dejando actuar el nutriente durante 1 hora, 2 horas, 3 horas,

4 horas y 15 días; intervalos que permiten analizar el efecto químico del nutriente, en el tiempo que pueda llevar la compactación y los 15 días necesarios para la precipitación.

El estudio del efecto desagregador es de suma importancia para la compactación. En el caso en que el sistema desagregue, el proceso de compactación del suelo debe ser realizado antes de adicionar el nutriente. Caso contrario (cuando el suelo no desagrega) la adición del nutriente puede anteceder a la compactación del suelo.

2.4. Prototipo de campo

Para el tratamiento del suelo por medio de la adición del nutriente B4 (15g de acetato de calcio, 4g de extracto de levadura y 5g de glucosa, para 1 litro de agua destilada, pH 8,0), en campo fue construida una trinchera dejando en su interior una región intacta de suelo de 1m x 1m y 1,20m de profundidad, la cual fue aislada con una geomembrana que impide la infiltración de nutriente para el suelo lateral que no es objeto de estudio. Con un barreno se hizo un orificio de 0,05m de diámetro y 1,2m de profundidad, colocando en el fondo del agujero bentonita hidratada que funciona como tapón, para limitar el avance del nutriente a otra profundidad, y establecer la dirección horizontal como dirección preferencial de infiltración del nutriente en el estrato (0,2m a 1,2m), los primeros 0,2m no fueron considerados debido a que se encontró una capa de material granular de características muy diferentes al resto del perfil. El nutriente fue colocado, pretendiendo llenar el 60% de los vacíos del suelo no ocupados por agua (Figura 1).

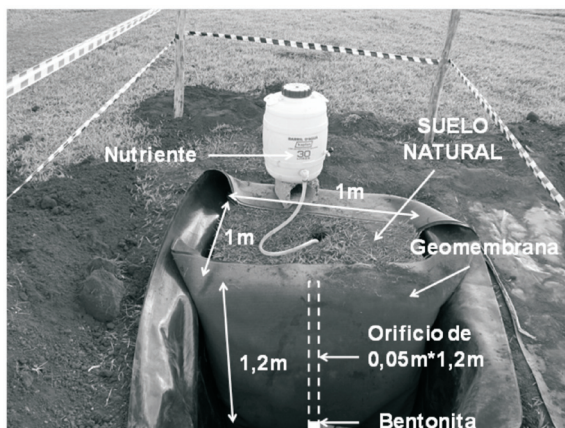


Figura 1. Prototipo en campo para adición del nutriente en el suelo natural.

En el caso del suelo compactado sin tratamiento fue realizada una excavación de 1m x 1m y 1,20m de profundidad y aislada con una geomembrana, la cual cuando se use el nutriente impedirá el paso del mismo para el suelo natural lateral. Teniendo en cuenta que el secado excesivo de los suelos puede generar destrucción de los agregados presentes en los suelos meteorizados (Roseno & Camapum de Carvalho, 2007), se seca al aire la mitad del suelo excavado hasta atender sólo la faja de humedad óptima de compactación pre-definida en laboratorio para el suelo natural; y la otra porción se deja secar hasta presentar 18% de humedad para posteriormente agregar el nutriente homogeneizándolo en toda la muestra (éste adicionado antes de la compactación por no presentar efecto desagregador), llevando la muestra a la humedad óptima de compactación definida en laboratorio. El suelo es compactado en la excavación para los dos casos hasta una altura de 0,6m en capas de 0,1m (Figura 2).

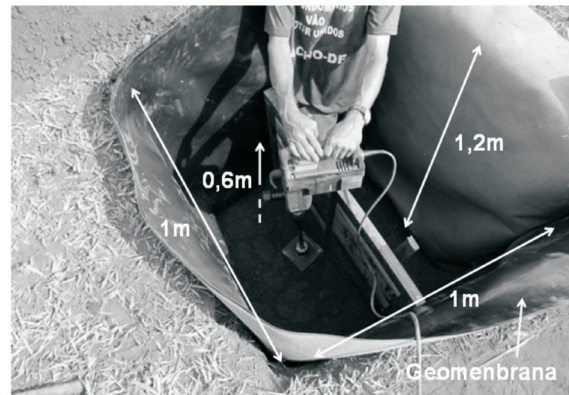


Figura 2. Proceso de compactación del suelo

El nutriente se debe dejar actuar en el suelo durante 15 días para poder verificar las mejorías obtenidas a partir de la aplicación de la técnica biotecnológica en campo (Valencia, 2009). Para efectuar las comparaciones, son recolectados bloques indeformados de 0,3m x 0,3m x 0,30m del suelo sin tratamiento y con tratado, tanto natural como compactado; así como muestras deformada para la ejecución de los ensayos de caracterización física y mecánica.

2.5. Caracterización físico-mecánica del suelo

Los ensayos de caracterización en el suelo sin tratamiento y con tratamiento, tanto natural como compactado, consistieron en la determinación del índice de vacíos, contenido de humedad (ABNT-NBR 6457, 1986), peso específico de los granos (ABNT-NBR 6508, 1984), análisis granulométrico (ABNT-NBR 7181, 1984),

plasticidad (ABNT-NBR 6459 y 7180, 1984) y en el uso de la metodología MCT (Miniatura Compactada Tropical) expedita, destinada a la clasificación de suelos tropicales en relación al estado de laterización (Nogami & Villibor, 1995). El suelo fue también clasificado segundo el Sistema Unificado de Clasificación. Además de eso, fueron realizados ensayos de permeabilidad (ABNT-NBR14545, 2000), corte directo sobre suelo en la humedad natural e inundado (ASTM D3080, 2004), ensayos de compresión simple (ABNT-NBR 12770, 1992), consolidación duploedométrica (ABNT-MB 3336, 1991); así como ensayos de degradación (Conrado et al., 2006) y “Pinhole test” (ABNT-NBR14114, 1998). Para un mejor entendimiento del comportamiento del suelo fueron determinadas, las curvas características de retención de agua en términos de succión matricial y total por el método del papel filtro y trayectoria mixta de humedecimiento y secado a partir de la humedad natural (ASTM D5298, 1992).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el suelo estudiado a 1m de profundidad, fueron encontradas un total de 8 bacterias diferentes, de las cuales todas presentaron crecimiento en el nutriente B4 que se relaciona con el potencial de precipitación de carbonato de calcio.

Con relación al efecto desagregador del nutriente, como se presenta en la Figura 3, que el nutriente solo desagrega un poco en la fracción limo, a 1 hora y 2 horas de actuación del nutriente, pero en términos generales su efecto no es desagregador. Por consiguiente el nutriente puede ser colocado antes de la compactación, pues de esta forma se permite una mejor distribución del nutriente en el suelo y por consiguiente, una condición más óptima para la actuación bacteriológica.

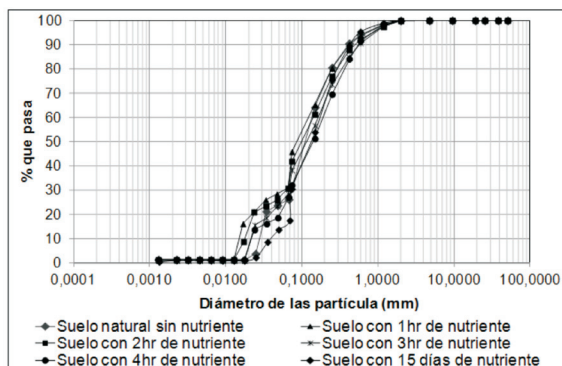


Figura 3. Ensayo de granulometría para evaluar la desagregación del nutriente

La curva de compactación del suelo sin tratamiento fue tomada de la investigación de Delgado (2002), que trabajó sobre el mismo material, en la cual la humedad óptima fue de 24,8% y la densidad seca máxima de compactación de 15,5kN/m³. Para determinar la humedad óptima de compactación del suelo con el nutriente a ser usada en campo, se dejó el nutriente actuar en el suelo por 1 hora antes de efectuar la compactación (tiempo mínimo aproximado que puede demorar en campo la colocación del nutriente). La humedad óptima del suelo tratado obtenida fue de 24,2% con una densidad seca máxima 15,2kN/m³. No siendo muy significativas las variaciones en la curva de compactación del suelo sin tratamiento y con tratamiento, se optó por compactar las muestra sin y con nutriente en la misma humedad (w=24,5%).

3.1. Clasificación física del suelo

En la tabla 2 y 3 se presenta un resumen de algunas de las propiedades físicas del suelo sin tratamiento y con tratamiento en estado natural y compactado.

Tabla 2. Propiedades físicas en el suelo natural sin tratamiento (ST) y con tratamiento (CT)

Propiedad	ST	CT
w (%) promedio	27	23
Gs (gr/cm ³) promedio	2,74	2,75
LL (%) promedio	38	37
LP (%) promedio	26	27
IP (%) promedio	13	10
Clasificación SUCS	ML	ML
Clasificación MCT	LA'-LG'	LA'
Índice de vacíos promedio	1,22	1,11

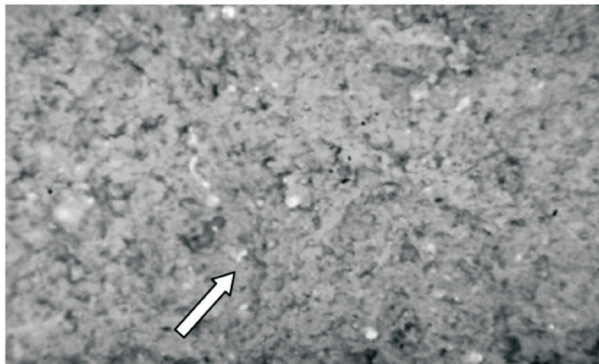
Tabla 3. Propiedades físicas del suelo compactado sin tratamiento (SN) y con tratamiento (CT)

Propiedad	ST	CT
w (%) promedio	22	24
Gs (gr/cm ³) promedio	2,74	2,75
LL (%) promedio	38	36
LP (%) promedio	26	26
IP (%) promedio	13	10
Clasificación SUCS	ML	ML
Clasificación MCT	LA'-LG'	LA'
Índice de vacíos promedio	0,92	0,78

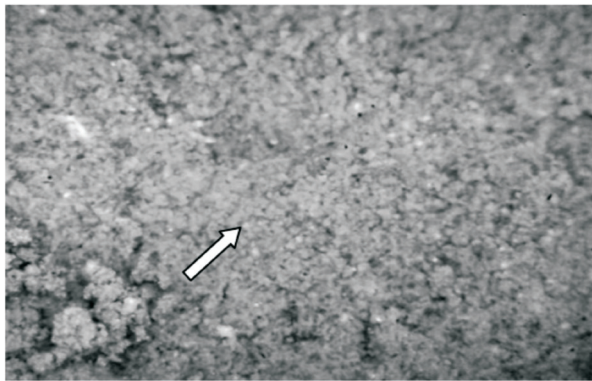
De estas tablas se puede observar que el índice de plasticidad (IP) disminuye en un 23% con el tratamiento. Adicionalmente, el nutriente confiere estabilidad a los

agregados, conduciendo la clasificación en el sistema MCT de la frontera entre arcilla laterítica y arena laterítica para arena laterítica (pasó de LA'-LG' a LA'). Con relación al índice de vacíos promedio, este disminuyó en 8,3% con el tratamiento en el suelo natural y en 15% en el suelo compactado.

Con relación a la estructura del suelo sin y con tratamiento natural y compactado, fueron analizadas las imágenes obtenidas a partir de una lupa electrónica de alta resolución con luz natural, en ellas se puede ver que cuando el suelo es tratado algunos de sus vacíos son llenados por precipitados (Figura 4). Si bien, en este caso no se efectuaron ensayos de Microscopía Electrónica de Barrido, su ejecución brindaría la posibilidad de definir si estos precipitados son de carbonato de calcio.



a)



b)

Figura 4. Estructura del suelo con tratamiento, a) natural, b) compactado. 50 veces de aumento

3.2. Curvas características de retención de agua

A partir de las curvas características de retención de agua de los suelos con tratamiento y sin tratamiento (Figura 5 y 6), se

observa en el suelo natural que en la región de los macroporos y mesoporos se tiene un aumento de la succión en el suelo tratado que puede deberse al cierre de los poros que genera el tratamiento. En el suelo compactado se puede ver como al adicionar el nutriente éste le confiere una estabilización a los agregados en la región de los poros intermedarios. Una diferencia mayor entre las curvas de succión total y succión matricial en los suelos tratados en comparación con los suelos sin tratamiento, muestra que existe un efecto químico adicional cuando colocado el nutriente.

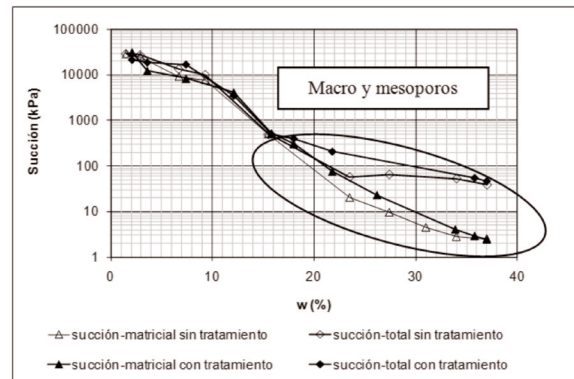


Figura 5. Curva característica del suelo natural en función de la humedad (w)

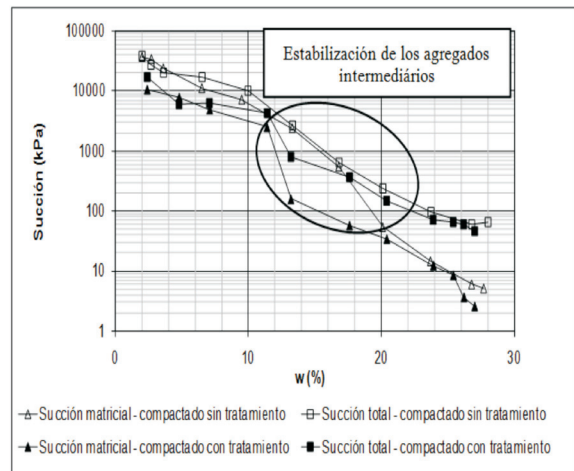


Figura 6. Curva característica del suelo compactado en función de la humedad (w)

3.3. Caracterización del comportamiento mecánico del suelo natural

3.3.1. Resistencia a la compresión simple

En las Figuras 7 y 8 se observa como el tratamiento le confiere al suelo un aumento en la resistencia a

la compresión simple hasta de un 75% para el suelo natural y de un 12% para el suelo compactado.

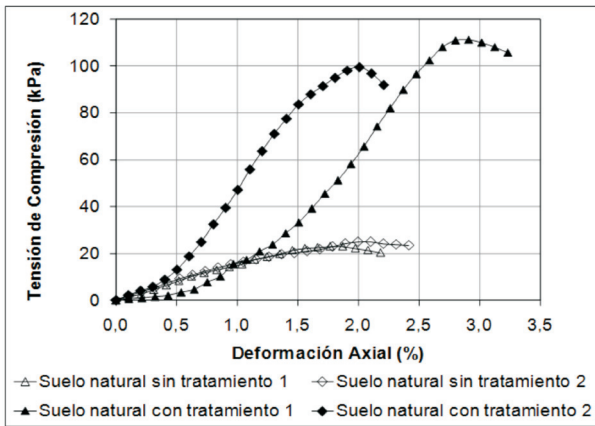


Figura 7. Resultado ensayo de resistencia a la compresión simple en el suelo natural

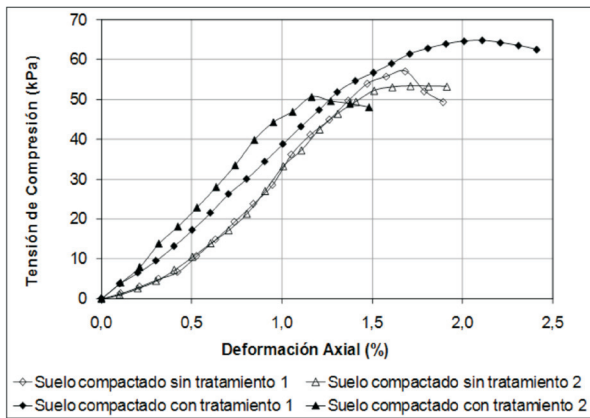


Figura 8. Resultado ensayo de resistencia a la compresión simple en el suelo compactado

3.3.2. Resistencia al corte directo

En el ensayo de corte directo (Figura 9 y 10) se obtuvieron valores de resistencia mayores para el suelo tratado que para el suelo sin tratamiento. Como los valores del ángulo de fricción prácticamente se mantienen, la ganancia de resistencia podría atribuirse a un aumento en el parámetro de cohesión debido a la cementación generada con el tratamiento. Estos resultados deben ser mirados con cautela debido al alto valor de coeficiente de variación de la cohesión (c.v. 40), por lo que se requeriría de un gran número de ensayos que permitieran una aseveración definitiva con relación a la cohesión.

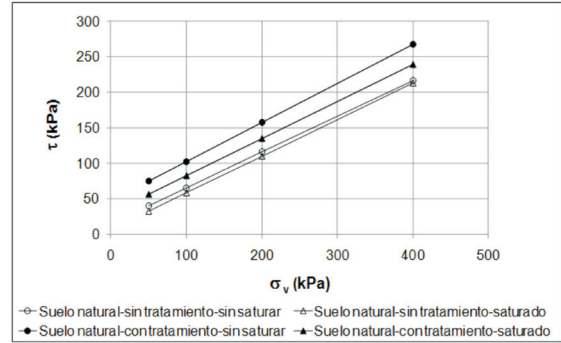


Figura 9. Resultados resistencia al corte directo del suelo natural

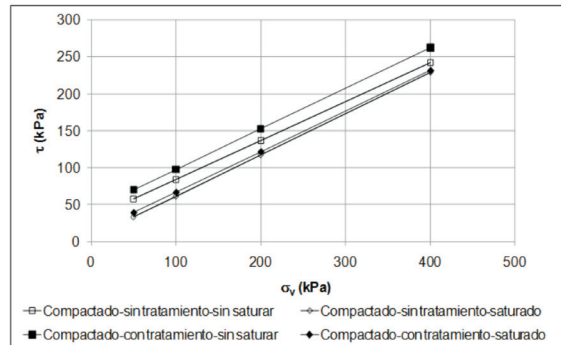


Figura 10. Resultados resistencia al corte directo del suelo compactado

3.3.3. Ensayo de consolidación duplo-edométrica

A partir de los resultados de la consolidación duplo-edométrica se determinó el índice de colapso (I.C.) del suelo en la muestra natural y compactada sin y con tratamiento (Figura 11). Esta figura muestra que en los dos suelos los índices de colapso por inundación son mucho mayores en el suelo sin tratamiento. Este hecho indica que cuando el suelo está saturado sobre una determinada tensión, el tratamiento le confiere mayor estabilidad estructural.

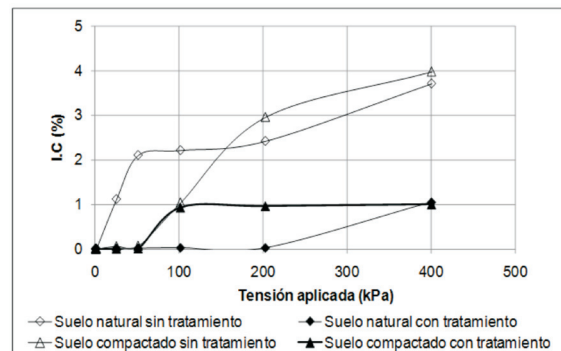


Figura 11. Resultados índice de colapso (I.C.) del suelo natural y compactado

3.3.4. Ensayo de permeabilidad

Con relación a la permeabilidad, cuando el suelo natural no está tratado, es en promedio igual a $5,6 \times 10^{-4}$ cm/s, ya cuando tratado el suelo, la permeabilidad disminuye a un valor promedio igual a $1,2 \times 10^{-4}$ cm/s. Tal comportamiento es coherente con la disminución del índice de vacíos del suelo tratado. En el suelo compactado el valor de la permeabilidad promedio no mostró variación al pasar del suelo sin tratamiento al suelo con tratamiento ($5,6 \times 10^{-5}$ cm/s). Pero cuando se analizan las velocidades medias de flujo a través del suelo ($v_s = ki/n$), la velocidad en el suelo tratado ($9,0 \times 10^{-5}$ cm/s) fue un poco menor que en el suelo sin tratamiento ($9,4 \times 10^{-5}$ cm/s) lo cual puede deberse a un cierre de los poros por el tratamiento.

3.3.5. Resultados del “Pinhole test”

Este ensayo mostró que el tratamiento actuó de manera eficiente en el suelo, al disminuir los caudales con el aumento de la carga hidráulica, así como al generar una menor diferencia entre la carga y la descarga (Figura 12), apuntando para el cierre de los poros debido al tratamiento, lo que proporciona mayor estabilidad estructural al suelo.

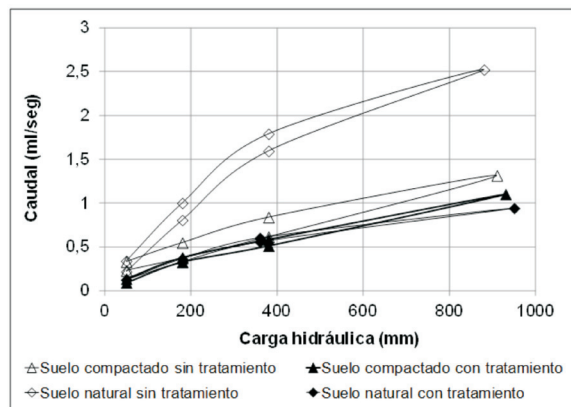


Figura 12. Resultados del ensayo de *pinhole test* en el suelo natural y compactado.

3.3.6. Ensayo de desagregación

Con relación a la desagregación, en el suelo natural es un poco difícil apreciar el efecto de una mejoría generada por el tratamiento, ya que sin tratamiento el suelo no mostró desagregación significativa (Figura 13). El único efecto apreciable es con relación a la liberación de las partículas de superficie, lo cual no

se observa en el suelo tratado y que puede indicar cierta mejoría causada por el nutriente. En el suelo compactado sin el tratamiento el suelo se desagrega y con el tratamiento los resultados muestran claramente que hubo una mejoría en la estabilidad de los suelos cuando son inundados con agua (Figura 14).

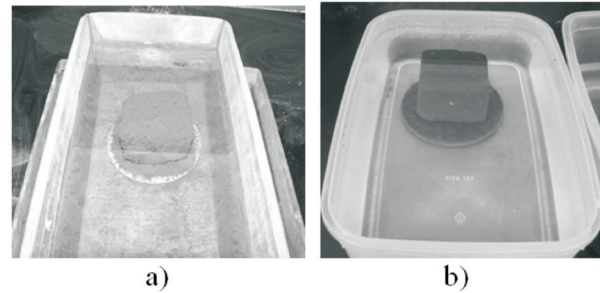


Figura 13. Ensayo de desagregación a) en el suelo natural sin tratamiento b) en el suelo natural con tratamiento, después de 24h.

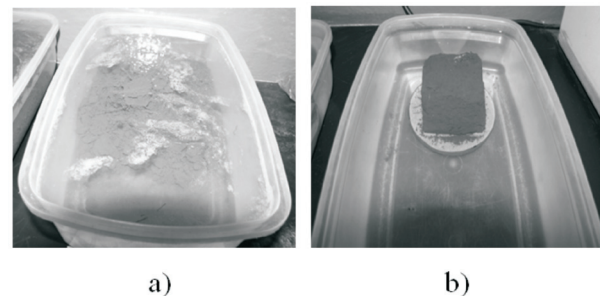


Figura 14. Ensayo de desagregación a) en el suelo compactado sin tratamiento b) en el suelo compactado con tratamiento, después de 24h

4. CONCLUSIÓN

Si bien a partir de este trabajo no se puede ser totalmente contundente en las conclusiones debido a aspectos como la representatividad estadística, el efecto de los procedimientos de los ensayos en los resultados, la variabilidad natural de los parámetros medidos etc., es un aporte importante en la biotecnología aplicada a la geotecnia y que apunta a resultados en general satisfactorios y que vislumbran un gran potencial de aplicación de la técnica. En términos generales, los resultados presentados muestran que la aplicación de la técnica de biomineralización en campo, propició mejoría en las propiedades físicas y mecánicas del suelo en estado natural y compactado. Entre las propiedades físicas alteradas por el tratamiento se destacan: la reducción

del índice de vacíos; la reducción de la plasticidad; la mayor estabilidad textural y estructural de los suelos. Son frutos de estas alteraciones: la reducción de la permeabilidad, de la colapsibilidad, de la deformabilidad y de la erodibilidad y el aumento de las resistencias a la compresión simple y de corte, bien como las variaciones de la succión. El efecto de estos cambios se vio reflejado en la mayor estabilidad estructural de los granos, en el mejor desempeño de los agregados, en la menor deformabilidad y mayor resistencia de la masa de suelo. Este resultado es bastante favorable a las actividades de ingeniería civil ligadas a la construcción, conservación, mantenimiento y preservación de las obras en general, apuntando así, como fue mencionado, al éxito de la utilización de la técnica de biomineralización en campo, y para el uso de los suelos con fines ingenieriles, de una forma ambientalmente más limpia.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al “Programa de bolsas: Pós-doutorado Júnior CNPq do INCT/Instituto Geotécnico de reabilitação do sistema encosta/planície/REAGEO” por el apoyo económico brindado para la investigación; a la Universidad de Brasilia por el soporte en todo lo relacionado con infraestructura y a la Universidad Nacional de Colombia por el tiempo otorgado al autor principal para la realización del posdoctorado.

REFERENCIAS

- [1] ABNT–MB 3336. Ensaio de adensamento unidimensional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 13 p. (1991).
- [2] ABNT. NBR 6457. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, RJ, 9 p. Origem: MB-27/84. (1986).
- [3] ABNT. NBR 6459. Solo - Determinação do limite de liquidez, Rio de Janeiro, RJ, 6 p. Origem: MB-30. (1984).
- [4] ABNT. NBR 6508. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, Rio de Janeiro, RJ, 8p. Origem: MB – 28. (1984).
- [5] ABNT. NBR 7180. Solo - Determinação do limite de plasticidade, Rio de Janeiro, RJ, 3 p. Origem: MB-31. (1984).
- [6] ABNT. NBR 7181. Solo - Análise Granulométrica, Rio de Janeiro, RJ, 13 p. Origem: MB-32. (1984).
- [7] ABNT. NBR 12770. Solo coesivo – Determinação da resistência à compressão não confinada, Rio de Janeiro, RJ, 4 p. (1992).
- [8] ABNT. NBR 14114. Solo – Solos argilosos dispersivos. Identificação e Classificação por meio do ensaio do furo de agulha (Pinhole Test), Rio de Janeiro, RJ. (1998).
- [9] ABNT. NBR 14545. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável, Rio de Janeiro, RJ, 12 p. (2000).
- [10] ASTM D-5298. Standard test method for measurement of soil potential (Suction) using filter paper. Annual Book of ASTM Standards, vol 15.09, 1312 – 1316. (1992).
- [11] ASTM D-3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, vol 04.08, 7p. (2004).
- [12] Baskar, S., Baskar, R., Mauclaire, L. and McKenzie, J. A., Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in Sahastradhara caves, Dehradun, India. *Current Science*, 90 (1) pp. 58-64. (2006).
- [13] Cardoso, E., Tsai, S. and Neves, M. C., Microbiologia do solo. Sociedade Brasileira de ciência do solo. Campinas, SP, pp. 6-72. (1992).
- [14] Conrado, E. J., Camapum de Carvalho, J., Bueno da Fonseca, F., Macedo, R. M., Cabral, R. y Lima, M., Solos tropicais e o processo erosivo. Livro: Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Ed: FINATEC, Brasília, Cap 3, pp. 93-153. (2006).
- [15] Delgado, A. K. Ch., Influencia da sucção no comportamento de um perfil de solo tropical compactado. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 181p. (2002).
- [16] Echeverri, O. y Santander, N., Aplicación de la biotecnología para la estandarización del suelo de subrasante” En: X Congreso y V Seminario Colombiano de Geotecnia. Colombia, pp. 293 – 296. (2004).
- [17] Guimarães, R. C., Análise das propriedades e comportamento de um perfil de solo laterítico aplicada ao estudo do desempenho de estacas escavadas. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 183p. (2002).
- [18] Gómez, E., Evaluación de las propiedades geotécnicas de suelos arenosos tratados con bacterias calcificantes. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 147 p. (2006).

- [19] Hammes, F. and Verstraete, W., Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. *Environmental Science & Bio/Technology* 1, pp. 3-7. (2002).
- [20] Lee, Y. N. Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. *Journal of Microbiology*, 41 (4) pp. 345-348. (2003).
- [21] Lo Bianco, A., Madonia, G., B.U.L.M. Technique for increase of the bearing capacity in the pavement layers subjected to biological treatment. In: INTERNATIONAL SIIV CONGRESS, 4th, Itália. (2007).
- [22] Nogami, J. and Villibor, D., Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos. Brasil. Ed. Vilibor, São Paulo, SP, 213P. (1995).
- [23] Orobio, A., Consideraciones para el diseño y construcción de vías en afirmado estabilizadas con cloruro de calcio. *Revista Dyna*, Nro. 165, pp. 93-100. Medellín, (2011).
- [24] Roseno, J. L. and Camapum de Carvalho, J., Avaliação granulométrica de um perfil de solo tropical usando o granulômetro a laser. III Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, Cuiabá. KCM Editora & Distribuidora, v. 1. pp. 1-11. (2007).
- [25] Santos, P. S., Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras. vol. 1 Fundamentos, Edgard Blucher Ltda, Universidade de São Paulo, 335 p. (1975).
- [26] Souza, É. R. A., Abílio de Carvalho, O. y Fontes, R., Evolução geomorfológica do Distrito Federal. EMBRAPA, documentos 122, 56 P. (2004).
- [27] Valencia, Y. G., Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, Departamento de engenharia civil e ambiental, Brasília, DF, 183P. (2009).
- [28] Whiffin, V., Lambert, J., Dert F. and Van ree, C., Biogrout and Biosealing. Pore space engineering with bacteria. September-October, pp. 13-36. (2005).