

Carbonatogénesis inducida en un perfil de suelo tropical

Carbonatogénesis induced in a profile of tropical soil

Yamile Valencia González^{1}, José Camapum de Carvalho², Luis Augusto Lara Valencia¹*

¹Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Carrera 65 N° 78-28. Medellín, Colombia.

²Facultad de Tecnología, Universidad de Brasilia, Campus Universitario Darcy Ribeiro. Brasília, Brasil.

(Recibido el 06 de agosto de 2013. Aceptado el 10 de marzo de 2014)

Resumen

En los suelos puede generarse un proceso común en la naturaleza denominado “biomineralización” o “bioprecipitación”, mediante el cual los organismos vivos presentes en él forman precipitados minerales cristalinos o amorfos. Este proceso es muy importante para la ingeniería geotécnica, ya que los minerales precipitados pueden llenar los vacíos o ligar las partículas de suelo mejorando las propiedades geológico-geotécnicas del material; sin embargo, el proceso demora muchísimos años para ocurrir de forma natural. Es por eso, que con esta investigación se buscó inducir en pocos días (15 días) la precipitación de minerales de carbonato de calcio, a partir de la adición de un nutriente precipitador sobre las bacterias nativas existentes en un perfil de suelo tropical, mejorando sus propiedades ingenieriles por medio de la disminución del índice de vacíos, la retracción, la permeabilidad, el colapso, la erodabilidad y la degradación, y del aumento de la cohesión y la fricción, causando menor impacto ambiental que otras técnicas usadas comúnmente en la ingeniería.

-----*Palabras clave:* Biomineralización, bioprecipitación, carbonatogénesis, suelo tropical

Abstract

In soils can be generated a natural process called “biomineralization” or “bioprecipitation” by which living organisms produce crystalline or

* Autor de correspondencia: Yamile Valencia Gozález, e-mail: yvalenc0@unal.edu.co; teléfono: + 57 4 4255187 (Y. Valencia)

amorphous mineral precipitates. This process is very important in geotechnical engineering because the mineral precipitates can fill the gaps or link soil particles to improve geological and geotechnical properties of the material; however, the process can take many years to occur naturally. Is for this reason that this study seeks to induce in few days (15 days) the calcium carbonate minerals precipitation, based on the addition of a nutrient precipitator over existing native bacteria in a tropical soil profile, improving their engineering properties through the reduction of the void index, shrinkage, permeability, collapse, erodibility and breakdown, and the increase of friction angles and cohesion, producing less environmental impact than other techniques commonly used in engineering.

-----**Keywords:** Bioprecipitation, biomineralization, carbonatogenesis, tropical soil

Introducción

En la naturaleza existe un proceso denominado “biomineralización” o “bioprecipitación”, el cual ocurre por reacciones químicas entre iones específicos o compuestos, como resultado de las actividades metabólicas de organismos vivos, en ciertas condiciones ambientales. Estos organismos forman precipitados minerales cristalinos o amorfos, siendo aproximadamente el 80% cristalinos y el 20% amorfos [1]. La carbonatogénesis es un ejemplo de biomineralización en el cual se produce la precipitación de carbonatos [2]. Este proceso es altamente dependiente del pH, y es aquí donde el papel principal de la bacteria, se ha asociado a su habilidad de crear ambientes alcalinos e incrementar la concentración de carbono inorgánico diluido, por medio de varias de sus actividades fisiológicas [3].

La precipitación, específicamente de carbonatos de calcio (CaCO_3), ocurre por la reacción de equilibrio que se presenta en la ecuación 1 [2]:

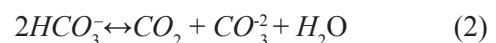


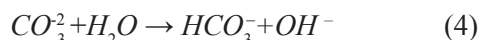
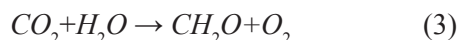
La bioprecipitación es un proceso importante en la ingeniería geotécnica, ya que los minerales precipitados pueden llenar los vacíos o ligar las partículas del suelo, mejorando las propiedades

geológico-geotécnicas del material, pero para que esto ocurra de forma natural, son necesarios, generalmente, muchos años [4]. Por ese motivo, se estudió una nueva técnica capaz de inducir en pocos días la bioprecipitación de carbonato de calcio. Esta investigación se fundamenta en la aplicación sobre la microbiota nativa existente en un perfil de suelo tropical, de un nutriente precipitador, con el objetivo de mejorar sus propiedades ingenieriles.

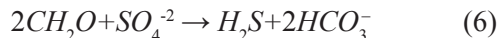
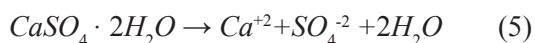
Carbonatogénesis

Uno de los procesos de la “bioprecipitación” o “biomineralización” en el cual los organismos vivos forman precipitados minerales cristalinos o amorfos, específicamente de carbonatos es la Carbonatogénesis” [2]. Dicho proceso puede darse por tres vías, una de ellas es la “fotosíntesis”, forma más común de precipitación microbiana de carbonatos [3]. Este proceso se basa en la utilización metabólica del CO_2 disuelto, que se equilibra con el HCO_3^- y el CO_2 alrededor de la bacteria (Ecuación 2). Tal reducción induce un cambio en el equilibrio del bicarbonato y consecuentemente un aumento en el pH del medio (Ecuación 3 y 4).

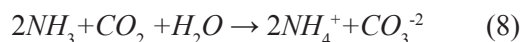




Los otros procesos de precipitación de carbonatos son aquellos asociados al ciclo del azufre, específicamente la reducción del sulfato. La reacción comienza con la disolución del yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O / CaSO_4$), (Ecuación 5). La materia orgánica puede ser consumida por la bacteria sulfato reductora y el azufre y el CO_2 metabólico son liberados (Ecuación 6) [5].



Y por último se tiene la forma de precipitación que involucra el ciclo del nitrógeno, más específicamente, la amonificación de aminoácidos, reducción del nitrato y degradación de la urea [6]. Estos tres mecanismos tienen en común la producción de CO_2 metabólico y amoníaco (NH_3), que en presencia de iones de calcio resulta en la liberación de amonio y en la precipitación de carbonato (Ecuación 7 y 8).



El estudio de la microbiota del suelo es tan vasto cuanto desconocido, debido a que el suelo es un hábitat extremadamente peculiar en relación a otros hábitats terrestres, por su naturaleza heterogénea, compleja y dinámica. Dentro de este hábitat complejo, los cinco principales grupos de microorganismos presentes son: las bacterias, los actinomicetos, los hongos, las algas y los protozoarios. Las bacterias sobresalen, de manera especial, pues forman el grupo de microorganismos de mayor abundancia y diversidad entre las especies. Esta población está estimada en 10^8 a 10^9 (unidades formadoras de colonias) por gramo de suelo [7].

El primer estudio de aplicabilidad del proceso de bioprecipitación de carbonato de calcio en la ingeniería, denominado “bioremediación”, se basó en la protección contra el deterioro de materiales utilizados en la construcción civil, como son las piedras ornamentales y los concretos, usando un medio nutriente conteniendo bacterias precipitadoras [2]. Técnicas posteriores como la “bioinducción” o “biosellado”, fueron usadas para sellar o taponar los poros de los suelos por medio de la aplicación de un nutriente con microorganismos capaz de producir una biopelícula (biofilme) que reducía la permeabilidad de los suelos [8, 9]. Finalmente, se tiene la técnica de “bioestabilización” que consiste en mejorar las propiedades del suelo mediante la adición de microorganismos calcificantes [10].

En esta investigación, en lugar de adicionar microorganismos al material, como se ha realizado hasta el momento, lo que se hace es estimular los microorganismos nativos presentes en el suelo, a partir apenas de la adición de un nutriente, para generar la precipitación de minerales de carbonato de calcio, reduciendo de esta forma, los impactos ambientales causados por otras técnicas ingenieriles usadas para mejorar suelos.

Materiales y métodos

El perfil de meteorización seleccionado para el estudio de la carbonatogénesis inducida, presenta 6m de profundidad, diferenciando en él cinco estratos de suelo: de 0 a 1,5 m, de 1,5 m a 2,5 m, de 2,5 m a 3,5 m, de 3,5 m a 4,5 m y de 4,5 m a 6,0 m. El perfil se ubica a 20 m de la margen izquierda de una cárcava en la ciudad satélite de Santa María, Distrito Federal – Brasil (coordenadas $16^{\circ}1'0.66''S$ y $47^{\circ}59'46.13''W$). Este perfil se sitúa en la unidad geológica conocida como “Metarritmito arenoso” del grupo Paranoá [11]. El “Metarritmito arenoso” está compuesto por intercalaciones de cuarcitos finos a medios, meta-limonita y pizarras [11]. El espesor máximo de esta unidad puede llegar a 150 m. Pedológicamente estos suelos se caracterizan por ser Latosuelos rojos-oscuros y rojos-amarillosos, resultado de

un alto grado de meteorización y lixiviación, formando una estructura porosa, metaestable, con índice de vacíos altos y pesos específicos bajos, bastante permeables y fuertemente drenados [12]. Geomorfológicamente se encuentra dentro de la unidad de la “Chapada da Contatem” [11], que es la colina más elevada del Distrito Federal, con cotas medias por encima de 1200 m. La región presenta un clima con temperatura inferior a los 18°C en el mes más frío y superior a los 22°C en el mes más cálido [11] y con una precipitación media anual de 1600 mm [12].

La toma de material para la realización de los diferentes ensayos, consistió en la extracción de muestras de suelo deformadas e indeformadas. Las deformadas se tomaron con barreno manual a cada 0,5 m hasta los 6 m de profundidad. Estas muestras fueron colocadas en bolsas plásticas y llevadas a una cámara húmeda hasta su empleo en la realización de los ensayos de identificación microbiológica, contenido de humedad, peso específico de los granos, límites de Atterberg, Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita, granulometría, caracterización química, mineralógica y microbiológica. Adicionalmente, se tomaron dos bloques cúbicos inalterados de 0,3 m de lado, a cada metro de profundidad (1m, 2m, 3m, 4m e 5m), uno al lado del otro. Después de ser tallados los bloques, se cubrieron con parafina y un tejido, para posteriormente introducirlos en cajas de madera y llevarlos a una cámara húmeda que conservara el contenido de humedad del suelo. Los bloques fueron usados para la ejecución de ensayos de caracterización mecánica sin tratamiento y con tratamiento, como permeabilidad, resistencia al corte, consolidación, desagregación y “*Pinhole test*”.

Para la identificación microbiológica de las bacterias presentes en el perfil de suelo, inicialmente se tomaron 10 g de suelo de cada estrato y se mezclaron con 90 ml de agua peptonada al 1% (esterilizada). De esta mezcla se retiró 1 ml y se adicionó a 9 ml de agua tamponada al 0,1% (esterilizada). Posteriormente las dos diluciones fueron incubadas en estufa bacteriológica a una temperatura de 25°C durante

24 horas, para luego distribuir las en forma de estrías con alza de platina en placas de petri conteniendo agar nutriente y agar de sangre de cordero, para permitir el crecimiento de la población bacteriana y su posterior aislamiento e identificación.

Dicha identificación de colonias bacterianas se efectuó por medio de diversos ensayos bioquímicos como: prueba de GRAM, prueba de KOH 3%, prueba de Catalasis, prueba de Oxidasis, prueba de TSI, prueba de oxidación/fermentación, prueba de Indol, prueba de la Ureasi, fermentación de Manitol, prueba de reducción de Nitrato, prueba de hidrólisis de gelatina, prueba del rojo de metilo y de Voges-Proskauer, utilización de Citrato, prueba de motilidad y fermentación de Lactosa, Sacarosa, Glicosa, Maltosa, Arabinosa, Trealosa e hidrólisis de la Esculina [13].

Después de la identificación de las bacterias presentes en el suelo, éstas fueron colocadas en placas de petri conteniendo el medio nutriente B4 (15g de acetato de calcio, 4 g de extracto de levadura, 5 g de glucosa y 12 g de agar para 1 litro de agua destilada, con pH 8), para inducir adecuadamente la precipitación de carbonato de calcio [2]. En seguida, las placas fueron incubadas en una estufa bacteriológica durante mínimo 15 días a 25°C para obtener los precipitados bacterianos [14]. Dichos precipitados fueron observados en el microscopio petrográfico y en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) para verificar si eran precipitados de carbonato de calcio, y poder definir la efectividad de las bacterias presentes en el suelo de precipitar carbonato de calcio cuando se les adiciona el nutriente B4.

Finalmente, se adicionó el nutriente a los bloques de suelo no alterado, que se colocaron dentro de un recipiente para que no sufrieran desmoronamiento al adicionar el nutriente. En el cara superior de los bloques, se hicieron unos orificios de aproximadamente 0,4cm de diámetro y 2cm de profundidad, espaciados 10 cm entre sí, introduciendo en ellos el nutriente con la ayuda

de una jeringa, pretendiendo llenar el 60% de los vacíos no ocupados por agua (valor seleccionado aleatoriamente). Los bloques fueron colocados durante mínimo 15 días dentro de una “cámara húmeda” para que pudiese ocurrir la precipitación *in situ* [2], ajustando la temperatura y la humedad relativa de la cámara a condiciones similares a las del campo en el momento del muestreo (temperatura 28°C, humedad 60%).

Para analizar si la precipitación de carbonato de calcio ocurre en los bloques de suelo de modo semejante a las placas, posibilitando la mejoría de las propiedades geotécnicas del suelo, fueron realizados para efectos comparativos, análisis de difracción de rayos X, Microscopia Electrónica de Barrido y ensayos de disolución de carbonatos con ácido clorhídrico (HCl) en muestras sin y con la adición del nutriente B4.

Las muestras para difracción de rayos X fueron analizadas por el método del polvo no orientado (análisis integral o total, natural, glicolada o calcinada), en sistemas $\theta/2\theta$, con velocidad de barrido de 0,05°/seg, de 2° a 70°. Las interpretaciones fueron realizadas utilizando el software EVA-versión 1997 del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas de la división de geotecnia de FURNAS-Brasil.

Los análisis en el Microscópio Electrónico de Barrido se realizaron también en el equipo del Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas de la división de geotecnia de FURNAS-Brasil, modelo S44oi – 1995, de alto vacío, alta resolución (30Å)

y gran foco (300 veces mejor que el microscopio óptico); adicionalmente, éste microscopio ejecuta análisis químico semiquantitativo por EDS, puntual o de área de la muestra. Debe tenerse en cuenta que la muestra ensayada necesita de una preparación previa que permita la conductividad, para ello se efectúa una metalización con una capa de oro como metal conductor.

Para determinar la posible presencia de carbonatos en el suelo tratado, se dejaron caer gotas de ácido clorhídrico (HCl) en las muestras y se observó la ocurrencia de efervescencia; efervescencia indica presencia de los carbonatos.

Para evidenciar mejor las alteraciones ocurridas en las propiedades geológico-geotécnicas del suelo, se determinaron también en muestras sin tratar y tratadas con el medio B4, los índices de vacíos, las granulometrías, los límites de Atterberg, las resistencias a la compresión simple, las resistencias al corte directo, las consolidaciones, las permeabilidades y la susceptibilidad a la erosión, basados en sus respectivas Normas ASTM y cuyos procedimientos y resultados se presentan de forma más detallada en [4].

Cada uno de los procesos descrito anteriormente se realizó como mínimo tres veces para garantizar la repetitividad de los resultados.

Resultados y discusión

Para tener una idea general del perfil de suelo, son presentadas algunas de sus características físicas en la tabla 1.

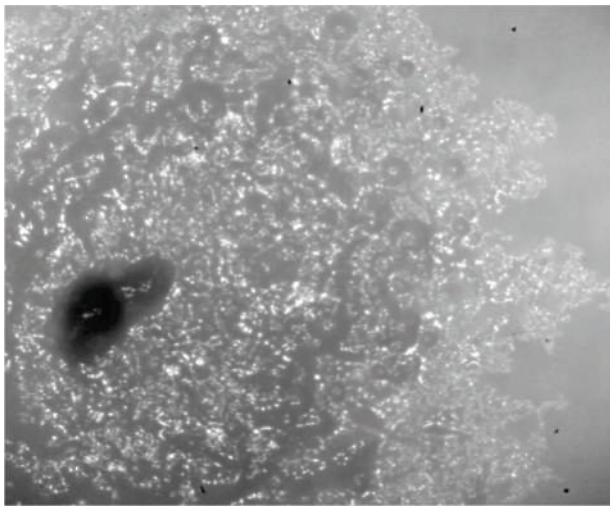
Tabla 1 Características físicas del perfil. γ_s = Peso específico de los granos (kN/m³); w = Contenido de humedad; e = Índice de vacíos; w_L = Limite líquido; IP = Índice de plasticidad; S.U.C.S = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Profundidad (m)	γ_s	w (%)	e	w_L (%)	IP (%)	Clasificación S.U.C.S.
1	26,67	34	1,86	50	18	MH
2	26,67	38	1,74	50	17	MH
3	26,77	30	1,11	48	16	ML
4	26,97	27	0,88	47	15	ML
5	26,97	27	0,85	44	13	ML

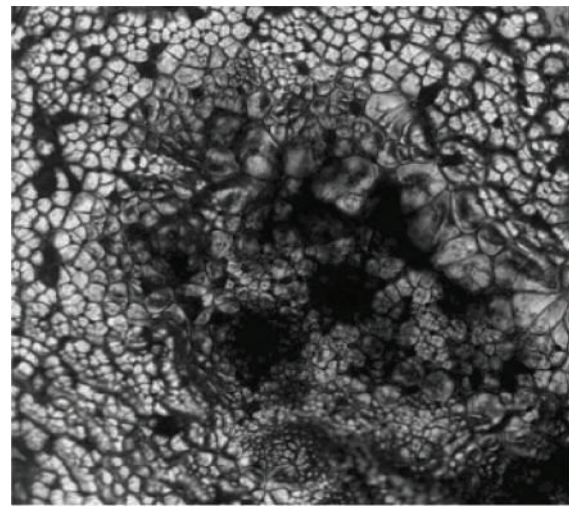
A partir de los diferentes análisis bioquímicos fue posible identificar en todo el perfil, un total de 43 tipos diferentes de bacterias, entre las cuales se tiene: *Bacillus* spp., *Pasteurella* spp., *Actinobacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Staphylococcus* spp., *Alcaligenes* spp., *Rhodococcus* spp., *Corynebacterium* spp., *Rhodococcus quei*, *Francisella tularensis*, *Enterobacter cloacae*, siendo el *Bacillus* spp. la bacteria encontrada con mayor frecuencia.

Para determinar si efectivamente las bacterias encontradas tendrían la capacidad de precipitar

carbonatos de calcio con la presencia del nutriente B4, se analizaron después de 15 días, los precipitados de las placas directamente en el microscopio petrográfico. Cabe destacar, que desde el tercer día ya se visualizaba el crecimiento de precipitados bacterianos en las placas de petri con el medio B4 (Figura 1a). De manera general, se observó que en el medio B4 se formaron elementos estructurados, que daban idea por los colores de interferencia que se obtenían al usar los nicoles cruzados del microscopio, de la presencia de cristales de calcita con tamaños variando desde 0,01 mm a 1 mm (Figura 1b).



(a)



(b)

Figura 1 Precipitados bacterianos en medio B4 para la bacteria *Bacillus* spp perteneciente al estrato de suelo a 3m de profundidad. (a) Imagen en microscopio de alta resolución con aumento de 100 veces; (b) Imagen con nicoles cruzados en microscopio petrográfico con aumento de 4 veces

Para confirmar los análisis realizados en el microscopio petrográfico, los precipitados bacterianos fueron observados de igual forma en el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM), donde a través de un análisis químico (EDS) se constató la presencia de calcio. La Figura 2 ilustra esta observación para un *Bacillus* spp. perteneciente a la profundidad de 3 m. Es importante resaltar, que en la mayoría de los

casos, cuando se tenía *Bacillus* spp. se generaron precipitados de mayor tamaño, lo que permite afirmar que, bacterias del tipo *Bacillus* son óptimas para el proceso de carbonatogénesis. Estos resultados muestran que el nutriente B4 induce en las bacterias nativas presentes en el perfil de suelo la precipitación de minerales de calcio.

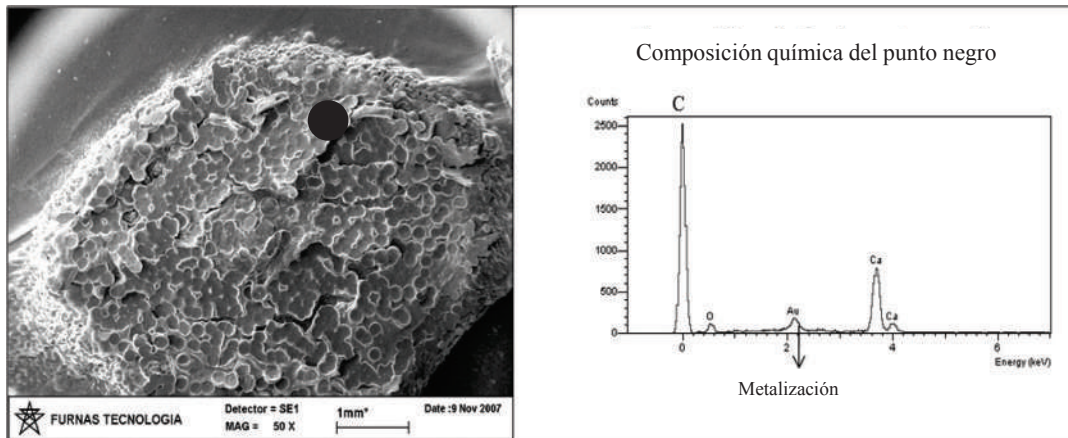


Figura 2 Microscopia Electrónica de Barrido con microanálisis química de un *Bacillus* spp en el medio B4

Después de mínimo 15 días de la adición del nutriente a las muestras de los diferentes estratos del perfil de suelo, se efectuó un reconocimiento de los minerales presentes tanto en la muestra sin tratar como en la tratada, por medio de la interpretación del difractograma de rayos X. Si bien, las intensidades de pico de los difractogramas no reflejan las cantidades exactas de los minerales, debido a que dependen de muchos factores, brindan una idea estimada de la variación de las proporciones de los minerales a través del perfil. En la figura 3 se puede observar que los minerales presentes en la muestra sin adición del nutriente fueron conservados al

colocar el nutriente; o sea, el tratamiento no afecta la composición mineralógica inicial del suelo. Se verifica también, el surgimiento de los minerales de carbonato de calcio, principalmente del tipo calcita, confirmando, que aunque en pequeña cantidad, se da una precipitación bacteriana cuando se somete el suelo a tratamiento. Es importante resaltar, que la cantidad de caolinita presente en el suelo tiene relación con la adhesión de las bacterias Gran-positivas [15], bacterias que de forma general se muestran como promisorias en la precipitación de carbonato de calcio cuando se adiciona el nutriente B4.

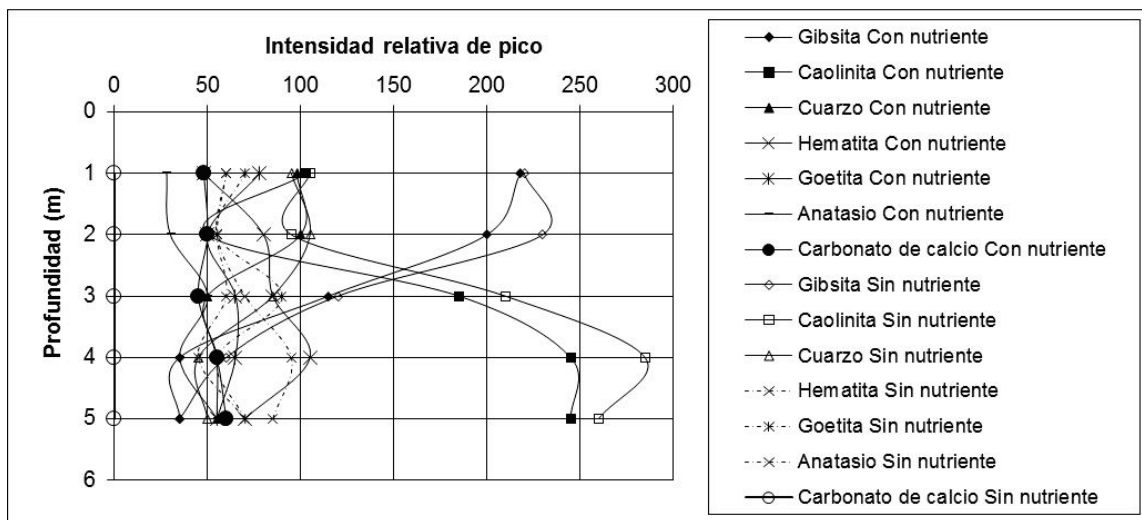
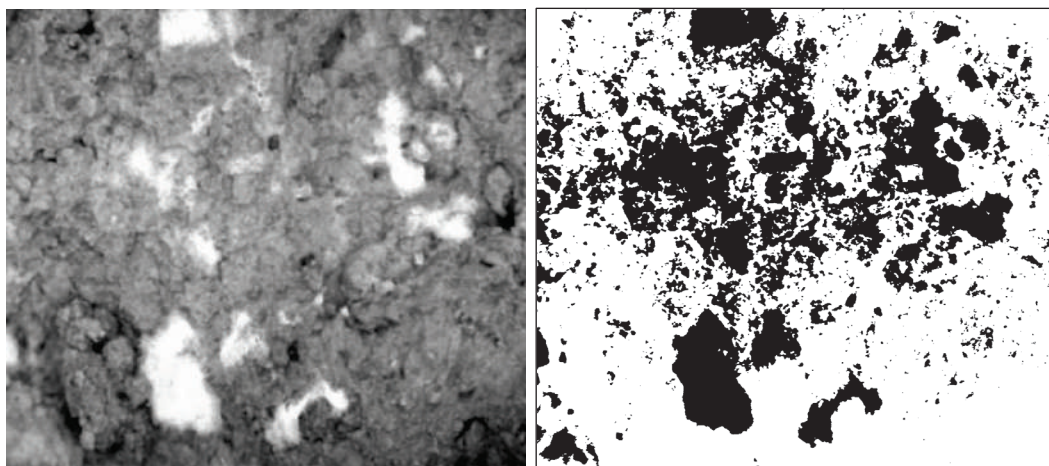


Figura 3 Intensidad relativa de los picos principales de los diferentes minerales en profundidad. Resultados ensayo de difracción de rayos X

Para confirmar la formación de carbonato de calcio, se colocaron unas gotas de ácido clorhídrico (HCl) sobre las muestras de suelo sin nutriente y con nutriente, encontrando que en todas las muestras tratadas se presentó efervescencia (en las muestras sin adición de nutriente no), ratificando la presencia de carbonatos.

Buscando validar de forma preliminar, simple y rápida los porcentajes de precipitaciones de carbonato de calcio originados en las muestras con nutriente, se utilizaron los programas “Photoshop” y “Scion”, para tratamiento de imágenes obtenidas con el microscopio de alta resolución (a 50 veces de aumento). La figura 4 muestra un ejemplo de las imágenes tratadas para 3m de profundidad. El color negro en la figura 4b representa los precipitados de carbonato de calcio.



(a) Imagen luz natural

(b) Imagen tratada

Figura 4 Tratamiento de imagen obtenida con microscopio de alta resolución con 50 veces de aumento, para la muestra con nutriente a 3m de profundidad

Los porcentajes de carbonato de calcio (áreas negras) son calculados a partir del área total de las imágenes. En la tabla 2, son presentados estos porcentajes, considerando las áreas de mayor ocurrencia de precipitados de carbonato de calcio en las muestras. En ella se observa, que las cantidades precipitadas son considerables, variando entre 30% y 43%. Este análisis debe ser visto con cuidado por ser un método preliminar, en 2D y del área de mayor cantidad de precipitación, entre otras, pudiendo subestimar o sobreestimar las cantidades de precipitados reales en las muestras.

Para tener una mejor visualización de la estructura y micro-estructura de los diferentes estratos de

suelo del perfil, fueron realizadas imágenes de las muestras a partir del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM). Los resultados sin y con nutriente son presentados respectivamente en la figura 5.

Tabla 2 Porcentajes de precipitados, calculados a partir de las imágenes tratadas para el perfil

<i>Profundidad (m)</i>	<i>Porcentaje de CaCO₃ (%)</i>
1	33,21
2	37,72
3	30,19
4	42,83
5	36,44

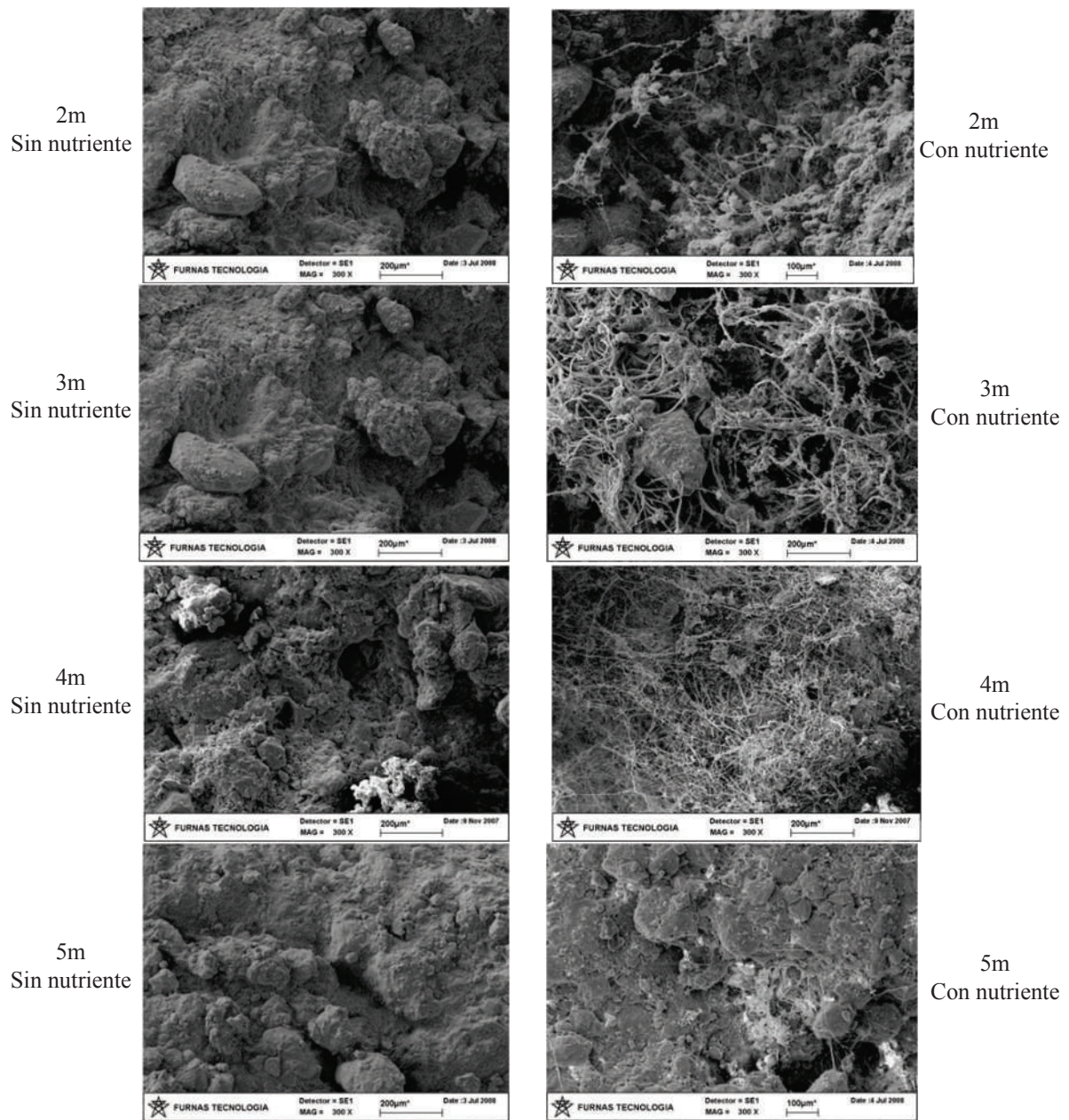


Figura 5 Imágenes en el SEM de los diferentes estratos de suelo sin y con nutriente del perfil

En el análisis químico efectuado en las muestras sin nutriente, se presentaron elementos comunes en los suelos tropicales (Si, Al, O, Fe), ya en las muestras con nutriente, además de los elementos encontrados en el suelo sin nutriente, apareció en todas las profundidades, el elemento calcio

(Ca). Con relación a la estructura de los suelos con nutriente, se observa, para todos los estratos, la presencia de precipitados fibrosos uniendo los granos de suelo. Adicionalmente, se encontraron también, en algunos casos, cristales de forma “globular” o “botroidal” (Figura 6).

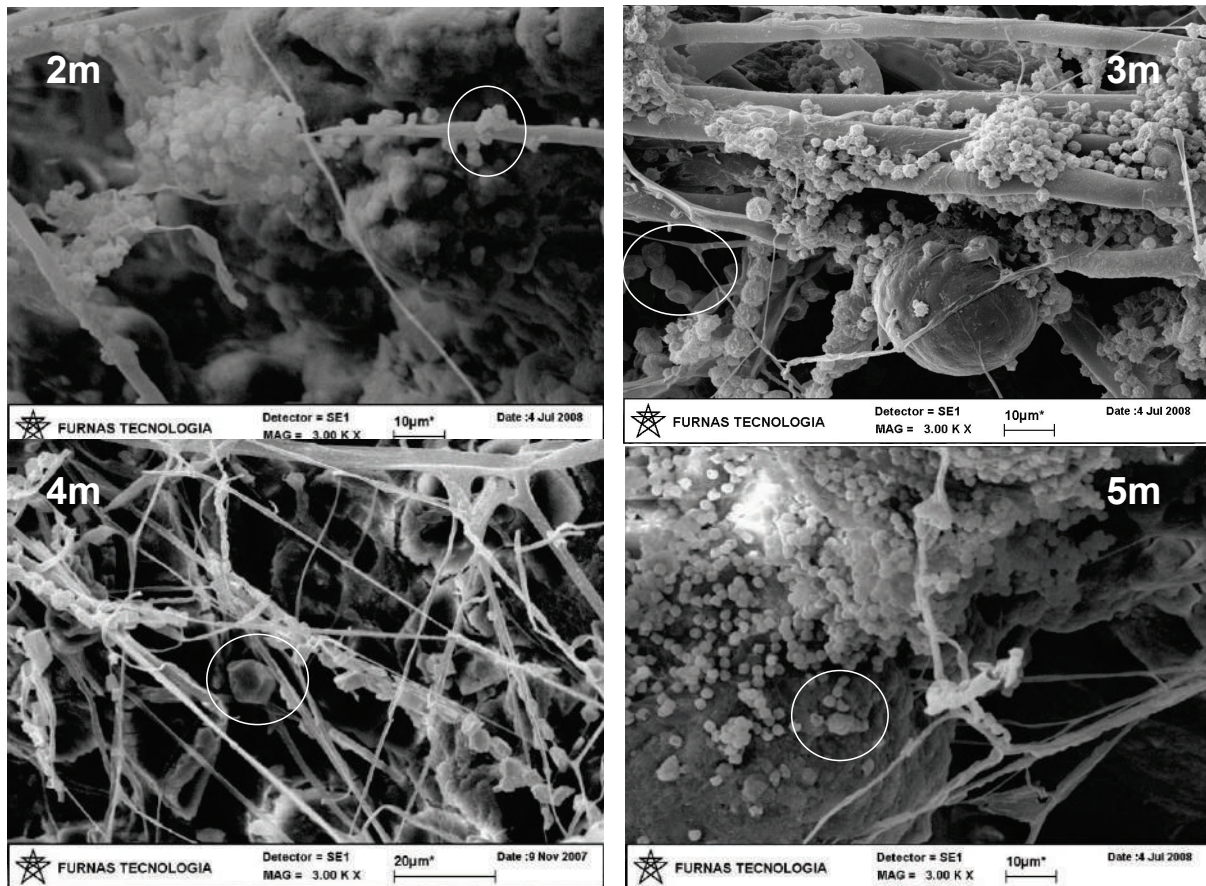


Figura 6 Imágenes en el SEM para cuatro profundidades del perfil en el suelo con nutriente, ilustrando los minerales formados con el tratamiento

El tratamiento de los suelos del perfil con la adición del nutriente provocó un cambio en el comportamiento físico y mecánico del material, causado posiblemente por las ligaciones o por llenarse los vacíos con los precipitados de carbonatos. Algunos de los cambios generados y que pueden constatarse en la tabla 3, fueron: reducción de hasta 2,2% en el índice de vacíos, de un 54% en la plasticidad, de un 28% en la retracción, de un 71% en la permeabilidad, de

un 69% (en promedio) en el colapso estructural por inundación, de un 54% (en promedio) de la erodabilidad y de un 90% en la desagregación del suelo; así como, aumentos en la cohesión hasta de un 65% y en el ángulo de fricción de un 10%. Estas variaciones indican una mejoría general de las características estructurales de los materiales, con reflejos directos sobre el comportamiento geológico-geotécnico de los suelos a partir de los procesos de tratamiento propuestos [16].

Tabla 3 Resultado de algunas características geotécnicas para el perfil sin tratamiento y con tratamiento. e = Índice de vacíos; IP = Índice de plasticidad; C = Contracción; k = Permeabilidad

Sin tratamiento									
Prof. (m)	e	IP (%)	C (mm)	k (10 ⁻⁵ m/s)	Índice Colapso (%) para carga de 100 kPa	Erodabilidad Δ Caudal (ml/seg) para Cabeza Hca. de 400mm	Desagregación Inmersión parcial	Cohesión (kPa) Estado saturado	Fricción (°) Estado saturado
1	1,86	18	2,05	4,2	9,15	1,6	Total	7	29
2	1,74	17	1,57	3,2	6,74	0,8	En pedazos	15	22
3	1,11	16	1,2	1,87	5,25	0,9	Total	6	25
4	0,88	15	1,4	2,31	4,18	1	En pedazos	5	35
5	0,85	13	1,3	7,2	2,39	0,3	Fracturada	8	38
Con tratamiento									
Prof. (m)	e	IP (%)	C (mm)	k (10 ⁻⁵ m/s)	Índice Colapso (%) para carga de 100 kPa	Erodabilidad Δ Caudal (ml/seg) para Cabeza Hca. de 400mm	Desagregación Inmersión parcial	Cohesión (kPa) Estado saturado	Fricción (°) Estado saturado
1	1,82	13	1,47	1,6	2,21	0,9	En dos puntas	5	29
2	1,72	11	1,33	1,2	4,29	0,5	En una punta	5	24
3	1,09	9	1,16	2,11	0,05	0,8	Intacta	16	26
4	0,87	7	1,02	2,33	0,57	0,1	Intacta	12	39
5	0,83	6	1,13	2,1	1,29	0,03	Intacta	23	36

Reflexión

Ante la mejoría originada en las propiedades y comportamiento de los suelos a partir de la adición del nutriente B4, debido a la aparición de precipitados de carbonato de calcio, ya sea en forma de fibras, glóbulos o textura “botroidales”, que unen los granos o llenan los vacíos; se tiene que la técnica de “carbonatogénesis inducida”, constituye una opción viable en la optimización de obras ingenieriles; reduciendo el riesgo de daño ambiental, al trabajar con una técnica ecológicamente amigable, que utiliza las bacterias nativas presentes en el suelo y no microorganismos externos, permitiendo a partir de la interacción de diversas áreas del conocimiento, un avance biotecnológico con múltiples aplicaciones.

Agradecimientos

Bolsista da CAPES/CNPq - IEL Nacional – Brasil y a la Universidad Nacional de Colombia.

Referencias

1. A. Soto. *Introducción a los Biominerales y Biomateriales*. Universidad de Chile. Santiago de Chile, Chile. 2003. pp. 31.
2. Y. Nam. “Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01”. *Journal of Microbiology*. Vol. 41. 2003. pp. 345-348.
3. F. Hammes, W. Verstraete. “Key roles and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation”. *Environmental Science & Bio/Technology*. Vol. 1. 2002. pp. 3-7.

4. Y. Valencia. *“Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos”*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 2009. pp. 183.
5. S. Castanier, M. Gaële Le, J. Perthuisot. “Carbonates precipitation and limestone genesis — the microbiogeologist point of view”. *Sedimentary Geology*. Vol. 126. 1999. pp. 9-23.
6. F. Hammes, N. Boon, J. Villiers, W. Verstraete, S. Siciliano. “Strain-Specific Ureolytic Microbial Calcium Carbonate Precipitation”. *Applied Environmental Microbiology*. Vol. 69. 2003. pp. 4901-4909.
7. J. Peña. *Introducción a la microbiología del suelo*. 1st ed. Ed. Libros y editoriales S.A. Distrito Federal, México. 1980. pp. 27-402.
8. F. Cardona, M. Usta, D. Restrepo. *Un estudio de la reducción de permeabilidad por la depositación de finos y bacterias en medios porosos*. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2002. pp. 119.
9. V. Whiffin, J. Lambert, F. Dert, D. Van Ree. “Biogrout and Biosealing. Pore space engineering with bacteria”. *Geo-Strata —Geo Institute of ASCE*. 2005. pp. 13-36.
10. E. Gómez. *Evaluación de las propiedades geotécnicas de suelos arenosos tratados con bacterias calcificantes*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2006. pp. 147.
11. M. Lima. *Degradação físico-química e mineralógica de maciços junto às voçorocas*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. Brasília, Brasil. 2006. pp. 336.
12. E. Souza, A. Carvalho, R. Fonte. *Evolução geomorfológica do Distrito Federal*, 1st ed. ED. EMBRAPA. Planaltina, Brasil. 2004. pp. 56.
13. E. Baron, L. Peterson, S. Finegold. *Diagnostic microbiology*. 9th ed. Ed. Mosby. St. Louis, USA. 1994. pp. 958.
14. S. Baskar, R. Baskar, L. Mauclaire, J. McKenzie. A. “Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in Sahastradhara caves, Dehradun, India”. *Current Science*. Vol. 90. 2006. pp. 58-64.
15. E. Cardoso, S. Tsai, M. Neves. “Microbiologia do solo”. *Sociedade Brasileira de ciência do solo*. Vol. 1. 1992. pp. 360.
16. Valencia, Y. G. *Processo para a aplicação da técnica de biomineralização na melhoria de solos. Depósito de pedido de patente. Fundação Universidade de Brasília*. Brasília, Brasil. 2010. pp. 33.