

# Estudio de la microestructura y composición química de dos suelos limo-arcillosos, tratados con nano-sílice

Ramírez Calderón Omar Gabriel<sup>1\*</sup>, Almanza Hernández Fernando<sup>1</sup>, García Benítez Silvia Raquel<sup>2</sup>, Hernández Gómez Nidia Yazmín<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

<sup>2</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. Circuito Escolar CU, Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510. México.

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional, ESIA. Av. Miguel Bernard s/n, Gustavo A. Madero, Ciudad de México. C.P. 07738.

\* Autor para correspondencia: [ogrc@correo.azc.uam.mx](mailto:ogrc@correo.azc.uam.mx)

## Recibido:

13/mayo/2018

## Aceptado:

25/agosto/2018

## Palabras clave:

MEB, nano-SiO<sub>2</sub>, limo

## Keywords:

MEB, nano-SiO<sub>2</sub>, silty

## RESUMEN

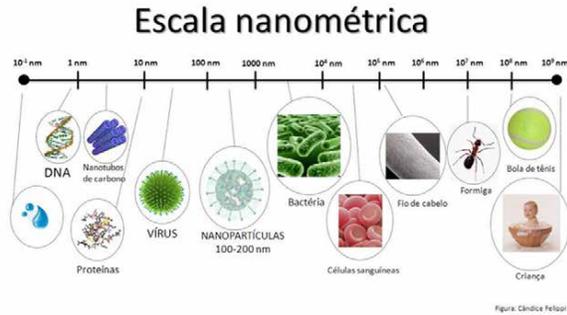
En el presente trabajo se lleva a cabo la caracterización de dos suelos limo-arcillosos con contenidos de agua diferentes, recolectados en el Estado de México. Por medio del microscopio electrónico de barrido (MEB) se observaron partículas aglutinantes de nano-sílice adheridas a las partículas de limo y a cenizas volcánicas presentes en los suelos, lo cual modificó y mejoró algunas características mecánicas e hidráulicas del mismo. Por difracción de Rayos X en polvo (DRX) la muestra presenta abundante silicio y aluminio, una gravedad específica en promedio de 2.4, el tamaño predominante es del orden de 0.01 a 0.001 mm correspondiente al 49% en peso de la muestra analizada.

## ABSTRACT

In the present work, the characterization of two silty-clayey soils with different water contents, collected in the State of Mexico, is carried out. Through the scanning electron microscope (SEM) nano-silica binding particles were observed adhered to the silt particles and volcanic ash present in the soils, which modified some mechanical and hydraulic characteristics of the same. By X-Ray powder diffraction (XRD) the sample Present abundant silicon and aluminum, an average specific gravity of 2.4, the predominant size is of the order of 0.01 to 0.001 mm corresponding to 49% by weight of the analyzed sample.

**Introducción**

La nanotecnología se ha convertido en los últimos años en uno de los principales y más importantes campos de investigación (Cruz, 2014), siendo ésta, generada con objetos cuyo tamaño oscila desde una décima hasta una centena de nanómetro, la más importante y de relevancia en la actualidad. (Briones et al., 2009) Figura 1.



**Figura 1.** Magnitud de diferentes objetos en escala nanométrica. (Filippi, 2015)

Con la aplicación de la nanotecnología se han desarrollado nuevos materiales con propiedades físicas distintas a las de sus partes constituyentes, siendo algunos de los ejemplos más asombrosos los productos denominados materiales “inteligentes”, que pueden replicarse y repararse a sí mismos y también autodestruirse, si fuese necesario (Sebastián, 2013) Figura 2.

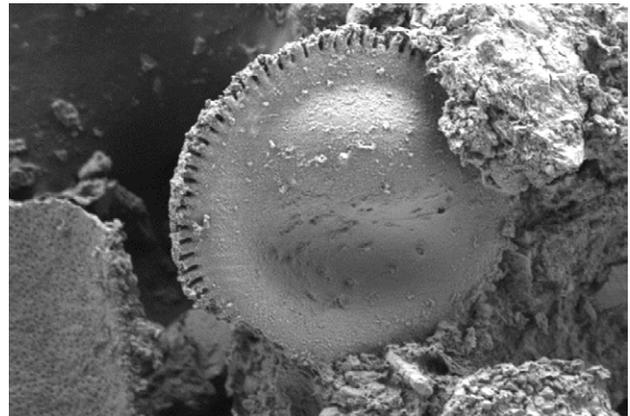


**Figura 2.** Diferentes tamaños de materiales utilizados en la nanotecnología. (Contreras, 2010)

Con el desarrollo de la nanociencia aplicada a la ingeniería de materiales, ha sido posible diseñar en el área de la ingeniería civil y en particular en el ámbito de la construcción, una serie de nuevos compuestos (como el nano SiO<sub>2</sub>) que mejora la fuerza, la resistencia a la penetración del agua y ayuda a controlar la lixiviación de

calcio a sustancias y productos básicos, para incrementar o mejorar su actuación en obras civiles (Hossain y Rameeja, 2015).

Un suelo arcilloso se identifica por su composición mineralógica, permeabilidad, límites de consistencia, etc., (Llorca, 1980) Figura 3, cuantiosos daños materiales y económicos en las construcciones son provocados por suelos volumétricamente inestables, afectando viviendas, edificios, instalaciones subterráneas, a través de agrietamientos o hundimientos. (Rojas, 1995). Las condiciones geotécnicas de las arcillas lacustres del Valle de México presentan una seria limitante para la construcción de grandes obras civiles, estas arcillas plásticas son altamente compresibles, con baja capacidad de carga y de resistencia al esfuerzo cortante, por lo que se hace necesario experimentar alternativas de mejoramiento.



**Figura 3.** Diatomea presente en un suelo de grano fino.

El propósito de la estabilización del suelo es aumentar las propiedades de resistencia y reducir los asentamientos. Los materiales reciclados en ingeniería geotécnica tienen muchos beneficios económicos y ambientales para la naturaleza. Este enfoque reduce el costo de los proyectos de ingeniería. De este modo, varios estudios se han llevado a cabo para investigar el uso de materiales reciclados como un nuevo estabilizador en los proyectos de estabilización de suelos.

Para la estabilización del suelo, fibras, cemento y diferentes materiales son utilizados para aumentar los parámetros de resistencia de los suelos. El trabajo de Hamidi y Hooresfand (2013) indicaron que la adición de fibra de polipropileno conduce a un aumento en los parámetros de resistencia al corte y el esfuerzo de falla, de suelos cementados. Park (2009) estudió la influencia de la fibra de alcohol de polivinilo (PVA) en la resistencia a la compresión en arena cementada, y reportó que un 1% de fibra hace que la deformación axial en una arena

cementada sea dos veces más grande que la de la arena normal.

Se han realizado varios estudios sobre la estabilización de arcilla blanda utilizando diferentes materiales, tales como materiales reciclados, fibras naturales, y materiales químicos. Pham y Nguyen (2014) llevaron a cabo una serie de pruebas en los suelos arcillosos mediante la adición de nano-SiO<sub>2</sub>, y se encontró que la adición de nano-SiO<sub>2</sub> conduce a una reducción en el Índice de expansión de la arcilla. En un estudio realizado por Mohammadi y Niazian (2013), la adición de nano-arcilla aumenta los límites líquido y plástico del suelo y también aumenta los parámetros de resistencia cortante de los especímenes tratados. La investigación llevada a cabo por Noll et al. (1992), Yonekura y Miwa (1993) y Zhang et al. (2004) indicaron que la adición de nano-SiO<sub>2</sub> aumenta la resistencia y los límites de Atterberg de la arcilla y también disminuye su permeabilidad. Taha y Taha (2012) llevaron a cabo numerosas pruebas sobre el comportamiento de arcilla mediante la adición de nano-partículas. Ellos concluyeron que la adición de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al suelo disminuye tanto los valores del índice de expansión como el de contracción. En un estudio realizado por Luo et al. (2012), la adición de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al suelo reduce el peso específico seco máximo y aumenta el contenido de agua óptimo, y la adición de diferentes cantidades de nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> al suelo tratado reduce los valores del índice de plasticidad. Niroumand et al. (2013) estudió la influencia de la nano-arcilla en resistencia a la compresión de ladrillos de tierra como materiales sustentables, y encontraron que la nano-arcilla hace que la resistencia a la compresión de ladrillos de tierra sea 4.8 veces más grande que la de ladrillos de tierra normales

Por otra parte, pocos documentos en la actualidad han calculado la influencia de la mezcla de nano-SiO<sub>2</sub> sobre las propiedades de resistencia de suelos limo-arcillosos (MH) con diferentes contenidos de agua. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es investigar y evaluar la microestructura y composición química de suelos tratados con nano-sílice, en la prueba de límites de consistencia, utilizando el Cono Inglés, y que pudiera actuar como un nuevo estabilizador para mejorar las propiedades mecánicas de suelos blandos limo-arcillosos.

## Metodología

### Materiales utilizados

El suelo 1 utilizado se tomó de un tubo Shelby extraído a una profundidad de 14 m, de la Calle Gran Canal del Desagüe en la Colonia San Miguel Xalostoc Estado de

México, dicho tubo fue proporcionado por la empresa inGeum, Figura 4.

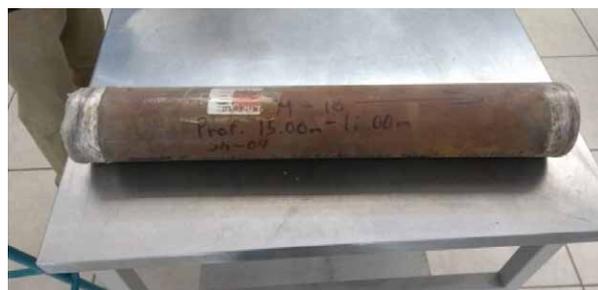


Figura 4. Muestra de suelo en el tubo Shelby.

El suelo 2 utilizado se tomó de otro tubo Shelby extraído a una profundidad de 24 m, de la Calle Gran Canal del Desagüe en la Colonia San Miguel Xalostoc Estado de México, Figura 5.



Figura 5. Tubo Shelby suelo 2.

La nano-SiO<sub>2</sub> utilizada fue donada por la empresa BASF en el Estado de México, el nombre del producto es MasterRoc MP 325 la cual es una Inyección hidrófila de baja viscosidad y sin disolventes para inyección de roca y consolidación de arena y estratos de limo, Figura 6.

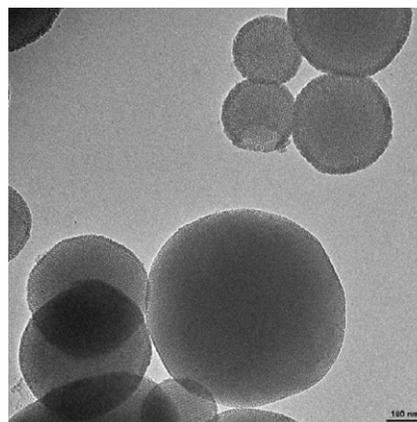


Figura 6. Nano-SiO<sub>2</sub> en suspensión (BASF, 2017)

La nano sustancia es una inyección de “un componente” sistema, basado en una sílice coloidal nanométrica en suspensión.

El producto puede ser usado entre + 5 ° C y + 40 ° C y no contiene disolventes ni componentes tóxicos. El tiempo de gel puede ajustarse variando la cantidad de acelerador agregado al compuesto.

### Método de prueba

Con el fin de evaluar el efecto de la nano-SiO<sub>2</sub> en la mineralogía y composición química de los suelos estudiados, ocho grupos de muestras se ensayaron, 3 para el suelo 1 y 3 para el suelo 2, con diferentes porcentajes de nano-SiO<sub>2</sub>, incluyendo un par de especímenes naturales como testigos, todas las muestras anteriores se utilizaron en el ensaye de límite líquido (Juárez, 1998) empleando el cono inglés mencionado anteriormente.

Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo con diferentes contenidos de nano-SiO<sub>2</sub>, (1%, 3%, y 5% del peso seco del suelo) y dos contenidos de agua distintos de los suelos ensayados (33% y 267%, respectivamente).

### Preparación de las muestras

En este estudio, se seleccionaron tres diferentes contenidos de nano-SiO<sub>2</sub> (es decir, 1%, 3% y 5% del peso seco del suelo). En el laboratorio, el suelo fue molido por medio de un mortero y luego separado a través de tamices. Para preparar las muestras estabilizadas con nano-SiO<sub>2</sub>, el suelo se remoldeó con una espátula de abanico y se roció con la cantidad prescrita de nano-SiO<sub>2</sub>, Figura 7. Cada una de las mezclas se dejó curando por 24 hrs.



Figura 7. Remoldeo del suelo con nano-SiO<sub>2</sub>.

Transcurrido el tiempo de curado para cada una de las mezclas, se procedió a realizar el ensaye de límites de consistencia (límite líquido y límite plástico), Figura 8 con el equipo respectivo, con el fin de extraer especímenes para su observación en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).



Figura 8. Muestra para determinar los límites de consistencia

## Resultados y discusión

### Límites de Consistencia

Según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el suelo 1 utilizado se clasifica como una arcilla de baja plasticidad (CL) con un límite líquido bajo, dicho límite se obtuvo por medio del cono inglés, Figura 9.



Figura 9. Preparación para determinar el Límite Líquido.

Los límites líquido y plástico del suelo fueron de 41 y 23, respectivamente. La curva de distribución granulométrica se obtuvo por medio de un hidrómetro, Figura 10, para el material que pasaba la malla No. 200.



Figura 10. Hidrómetro con material que pasa la malla No. 200.

A partir de dicha curva, Figura 11, se pudo observar que el suelo contiene 41% de arena fina, 46% limo y 13% de arcilla. El contenido de agua de éste suelo fue de 33%, con una gravedad específica de 2.5

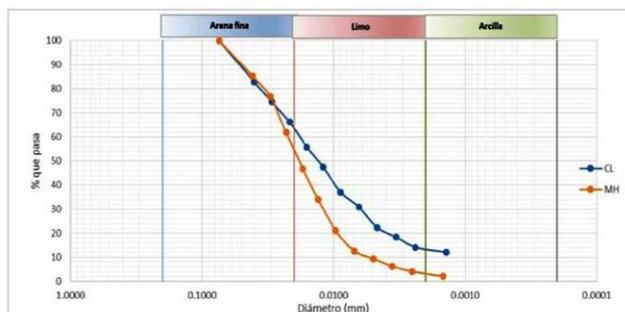


Figura 11. Distribución granulométrica de los dos suelos analizados.

Según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el suelo 2 utilizado se clasifica como suelo limo arcilloso de alta plasticidad (MH).

Los límites líquido y plástico del suelo fueron de 244 y 93, respectivamente. A partir de la curva de distribución granulométrica se pudo observar que el suelo contiene 46% de arena fina, 51% limo y 3% de arcilla. El contenido de agua de éste suelo fue de 267%, con una gravedad específica de 2.4. En la Figura 11 se muestra la distribución de tamaños de las partículas presentes en los dos suelos en la curva granulométrica.

### Microscopía

Los resultados de la microestructura y de la composición química de los dos tipos de suelos estudiados, se realizó utilizando el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

SUPRA 55VP, ZEISS, Figura 12. Con distancia focal variable de 4.4 a 5 mm con diferencia de potencial de voltaje bajo de 1 kV y 2 kV para lograr imágenes en alta resolución en muestras no conductivas sin recubrimiento.



Figura 12. Microscopio Electrónico de Barrido SUPRA 55VP.

En éste estudio, el ensaye de límites de consistencia se llevo a cabo en dos tipos de especímenes, es decir, (1) los especímenes de suelo natural y (2) las muestras que contienen nano-SiO<sub>2</sub>. Lo que se pudo observar en algunas fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido es que, mediante la adición del agua al suelo limo arcilloso de alta plasticidad (MH), la nano-SiO<sub>2</sub> produce un gel viscoso en conjunción con el agua Figura.13.

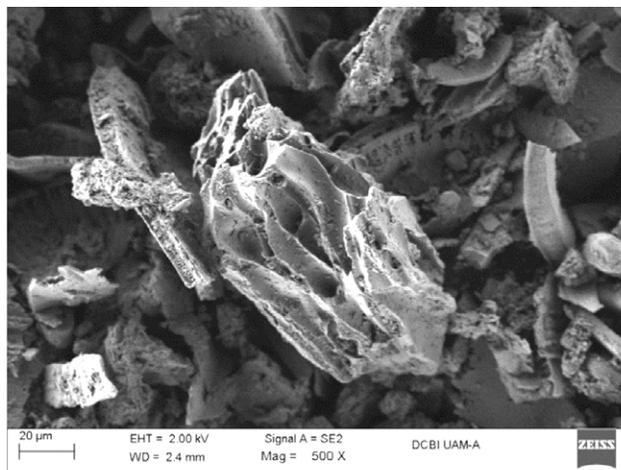


Figura 13. Formación del gel viscoso.

En la Figura 14 se puede observar que el gel viscoso produce un cierto contacto entre las partículas de arcilla de baja plasticidad (CL). La cohesión entre las partículas de arcilla debido al gel viscoso, probablemente es más fuerte que la que existe entre las partículas de arcilla debido al agua absorbida.

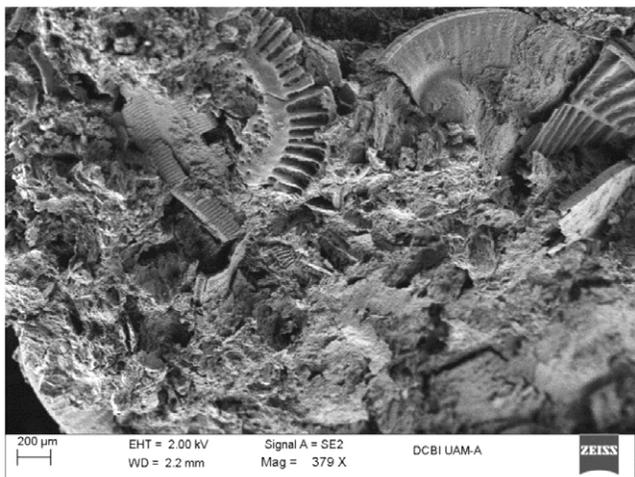


Figura 14. Cohesión entre las partículas de arcilla.

El gel viscoso podría generar un aumento de la fuerza de fricción entre las partículas de arcilla. La nano-SiO<sub>2</sub> hace que la distancia entre las partículas de arcilla sean más pequeñas provocando que un gran número de partículas de arcilla estén en contacto entre sí. Debido al hecho de que el área de contacto entre las partículas de arcilla aumenta con el aumento de nano-SiO<sub>2</sub>, la fuerza de fricción también aumenta (Ramírez, 2017).

#### Espectrometría de Energía Dispersiva (EDS)

El Sistema de Espectrometría de Energía Dispersa (EDS), se encuentra acoplado al Microscopio Electrónico de Barrido, de esta manera se puede obtener información detallada de los elementos químicos existentes en las analizadas. En la Figura 15 se puede observar el espectro del suelo 1 y en la tabla 1 el contenido de elementos químicos de ese suelo ensayado.

#### Conclusiones

En los últimos años, la investigación sobre la aplicación de nano materiales a suelos con baja capacidad de carga y contenidos de agua altos entre otros aspectos, se ha convertido en un tema de relevancia debido a los beneficios ambientales y a la rentabilidad de éstos nuevos geomateriales.

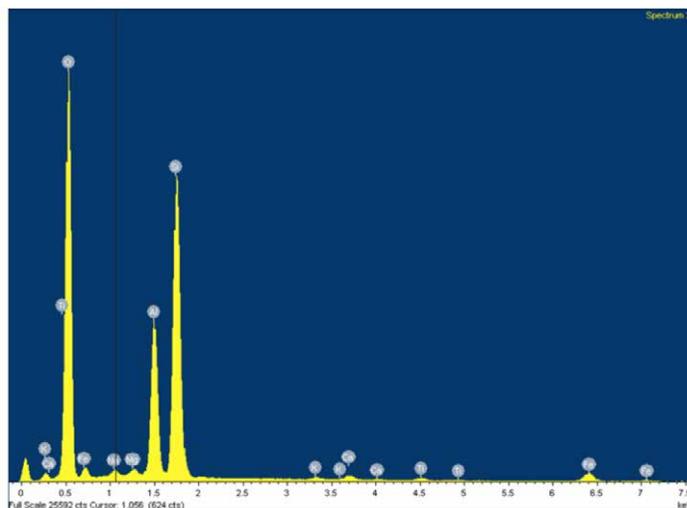


Figura 15. Espectro de EDS del suelo 1 (CL).

Tabla 1. Elementos químicos presentes en la arcilla de baja plasticidad (CL).

Elemento	% Peso
O	73.6
Na	0.46
Mg	0.31
Al	7.21
Si	16.19
K	0.15
Ca	0.31
Ti	0.23
Fe	1.53

Estudios anteriores muestran que la adición de nuevos productos como lo es la nano-SiO<sub>2</sub> pueden mejorar las propiedades de resistencia de las arcillas blandas y de suelos limo arcillosos. Este estudio investigó los efectos de la nano-SiO<sub>2</sub> sobre las propiedades mecánicas de los suelos de grano fino (limo y arcilla), así como su microestructura y nueva composición química como consecuencia de adicionarle en ciertos porcentajes adecuados la nano-sustancia; basándose en los resultados obtenidos a partir de una serie de ensayos con el cono inglés para determinar su límite líquido, entre otros parámetros de referencia.

A raíz de los resultados obtenidos con el MEB, sería importante continuar con la investigación utilizando otras nanosustancias, como por ejemplo nano alúmina, y así poder observar de manera sustantiva, si los enlaces que se forman entre la sustancia y las partículas de limo o arcilla son más fuertes que las anteriores mostradas.

Otro aspecto a tomar en cuenta sería el probar con otros porcentajes de nano-sílice y en suelos con mayor contenido de agua como los que se presentan en la zona de Lago de la Ciudad de México.

### **Agradecimientos**

Este estudio se realizó en el Laboratorio de Geotecnia de la UAM Azcapotzalco. Los autores agradecen a las empresas inGeum y BASF por habernos proporcionado las muestras y la sustancia respectivamente, así como a la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Unidad Azcapotzalco por la toma de fotos con el MEB.

### **Referencias**

Briones C., Casero E., Martín J. A., Serena P. A. (2009). Nano ciencia y nanotecnología, entre la ciencia ficción del presente y la tecnología del futuro. Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología.

Contreras, L. (2010). Materiales, tecnología y producción. 3: 94-95

Cruz, D. M. (2014). Mejoramiento del efecto barrera en materiales endurecidos de cemento portland mediante la aplicación innovadora de nano-partículas de silicio.

Filippi, A. (2015). Nanotechnology and plant sciences: Nanoparticles and their impact on plants, 101-123

Hamid A., Hooresfand M. (20013). Effect of fiber reinforcement on triaxial shear behavior of cement treated sand. Geotextiles and Geomembranes, 1-9.

Hossain K., Rameeja S., (2015). Importance of Nanotechnology in Civil. European Journal of Sustainable Development.

Juárez B., Rico R., (1998). Mecánica de Suelos. Tomo 1. 2da. Ed. Limusa, p. 144-145.

Llorca J. (1980). Sobre la edificación en arcillas expansivas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 71-82.

Luo H., Hsiao D., Lin D., Lin C. (2012). Sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide. Journal of Transportation Science and Technology, 83-100.

Mohammadi M., Niazian M. (2013). Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. Journal of Advanced Science and Technology, 37-46.

Niroumand H, (2013). The influence of nano-clays on compressive strength of earth bricks as sustainable materials. Procedia e Social and Behavioral Sciences, 862.

Noll M., Bartlett C., Dochat T. (1992). In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica. Proceedings of the 6th National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration, 57- 443.

Park S. S. (2009). Unconfined compressive strength and ductility of fiber-reinforced cemented sand. Construction and Building Materials, 1134–1138.

Pham H, Nguyen Q. (2014). Effect of silica nanoparticles on clay swelling and aqueous stability of nanoparticle dispersions. Journal of Nanoparticle Research, 16(1):2137.

Ramírez O. (2017). Modificación de la resistencia de una arcilla plástica con nano-sílice. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.

Rojas S. M. (1995). Arcillas Expansivas. Obrasweb, Recuperado el 25 de septiembre de 2017, de <http://obrasweb.mx/construccion/1995/11/01/arcillas-expansivas>.

Sebastián, S. M. (2013). Nanotecnología y materiales en la defensa naval. Revismar, pp 71-75.

Taha M., Taha O. (2012). Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior. Journal of Nanoparticle Research, 1190.

Yonekura R., Miwa M. (1993). Fundamental properties of sodium silicate based grout. Proceedings of the 11th Southeast Asia Geotechnical Conference, (pp. 44-439). Singapore.

Zhang G, G. J. (2004). Index properties of a highly weathered old alluvium. Géotechnique, 51-441.