

# Análisis de la microestructura de suelos arenosos y su impacto en las cimentaciones



## Colaboración

Carlos Eduardo Monroy Figueroa; Liliana Roman Teoba; Sergio Aurelio Zamora Castro; María Eugenia Díaz Vega  
Universidad Veracruzana

**RESUMEN:** El suelo es un sistema complejo, dinámico y heterogéneo, cuyo patrón estructural constituido por dos conjuntos (sólido/poro) es altamente variable en el espacio y tiempo. Dentro de esos suelos se encuentran las arenas que dependiendo del grado de compactación pueden provocar daños estructuras en las edificaciones, así como el colapso. En esta investigación se muestra un análisis de la microestructura de suelo de textura arenosa. Se extrajeron muestras inalteradas y con el uso del microscopio Electrónico de Barrido (SEM) se extrajo la microestructura a diferentes escalas. Con los análisis realizados se puede observar el sistema poroso donde llevado a macroescala se pueden generar asentamientos de tal magnitud produciendo daños estructurales. Se analiza la microestructura en función del análisis fractal en este caso Exponente de Hurst (H) obtenido por el método de conteo de caja (Dbox). Con los resultados obtenidos se correlacionan las diferentes propiedades mecánicas del suelo, entre ellas la cohesión y ángulo de fricción interna.

**PALABRAS CLAVE:** Arena, Microestructura, Porosidad, Exponente de Hurst.

**ABSTRACT:** soil is a complex, dynamic and heterogeneous system, whose structural pattern consisting of two sets (solid / pore) is highly variable in space and time. Within these soils are the sands that depending on the degree of compactness can cause damage to structures in the buildings, as well as collapse. In this investigation an analysis of the microstructure of sandy soil texture is shown. Unaltered samples were extracted and with the use of the Scanning Electron Microscope (SEM) the microstructure was extracted at different scales. With the analyzes carried out, it is possible to observe the porous system where, taken to a macro scale, settlements of such magnitude can be generated, producing structural damage. The microstructure is analyzed according to the fractal analysis in this case Hurst (H) exponent obtained by the box counting method (Dbox). With the obtained results, the different mechanical properties of the soil are correlated, among them the cohesion and internal friction angle.

**KEYWORDS:** Sand, Microstructure, Porosity, Exponent of Hurst.

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un sistema complejo, dinámico y heterogéneo, cuyo patrón estructural constituido por dos conjuntos (sólido/poro) es altamente variable en el espacio y tiempo, hasta la fecha, el análisis de sus propiedades a diferentes escalas espaciales es fundamental en conceptos y técnicas de la física y las matemáticas [7]. Estas técnicas han sido desarrolladas por la estadística clásica, la geoestadística y la geometría fractal y han introducido al análisis del suelo los conceptos aplicados al estudio de los sistemas complejos [12]. Para estudiar los sistemas complejos es necesario analizar sus principa-

les atributos, entre ellos entropía y grado de ocupación del espacio de interés sólido o poro [2, 3]. La composición del suelo cambia continuamente en el tiempo y en el espacio, variando su estructura y las propiedades derivadas que de ellas se originan, esto confirma su naturaleza como un sistema complejo, el cual no puede ser descrito en forma total, sino haciendo un pronóstico en el proceso.

El suelo es un conjunto con organización definida y propiedades que varían "vectorialmente". En la dirección vertical generalmente sus propiedades cambian mucho más rápidamente que en la horizontal. El suelo tiene perfil, y este es un hecho del que se hace bastante aplicación [1].

En los últimos años, se ha reconocido a la geoestadística como una técnica adecuada para describir la variabilidad espacial del suelo [4]. Sin embargo, su combinación con las nuevas técnicas derivadas de la Teoría del Caos, Geometría Fractal y Teoría de los Sistemas complejos, es indispensable para una comparación multiescalar y multitemporal del suelo como un sistema [13]. A su vez, la complejidad es una propiedad intrínseca del suelo y de otros materiales con organización jerárquica. El suelo es un producto de otras interacciones multiescalares entre componentes de diversa naturaleza, generan la heterogeneidad espacial y temporal de sus características básicas y definen el patrón de la dinámica de medios porosos naturales [5].

El patrón estructural de un sistema natural se asocia a sus diversos atributos, cuyo análisis es básico para el pronóstico de su comportamiento [16]. La variabilidad del patrón estructural del suelo en espacio y tiempo, depende de las condiciones ambientales. Por otro lado, dicha variabilidad es una consecuencia de la heterogeneidad natural y génesis de los materiales de origen geológico y biológico, así como de las variaciones temporales de los procesos que sobre estos actúan, destacándose por su importancia la erosión, cambios climáticos, degradación del suelo, recargas de mantos acuíferos, evapotranspiración, contaminación, etc., [6].

El conocimiento de las propiedades del suelo nos permite dar criterios sobre la selección óptima del tipo de cimentaciones [15]. El suelo, independientemente de la zona en que se encuentre, es un sistema complejo y debe ser analizado como tal. Su análisis lleva a emplear herramientas de la geometría fractal que mediante el empleo de imágenes multiescalares y series de tiempo extraídos de ensayos mecánicos tradicionales, es posible predecir su comportamiento incluso su modelación numérica mediante algoritmos [8].

El estrato de arena es uno de los cuerpos geológicos de ingeniería más comúnmente encontrados. Una investigación adicional sobre la estabilidad de la tierra y la estructura subterránea exige un modelado preciso de la formación real [11]. La textura arenosa es el tipo de suelo para

analizar en este artículo, donde aparte de ser soporte de cimentación también es un suelo que se puede estabilizar incluso con biocemento o nanosilica por ejemplo [9, 10].

## MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Boca del Río pertenece a la zona conurbana de la ciudad de Veracruz. Colinda al Norte con el municipio de Veracruz, al Sur con Medellín, al Sureste con el municipio de Alvarado, y al Este con el Golfo de México. En la parte urbana de este municipio se encuentra asentada sobre arenas transportadas por efecto de los vientos de la región, formándose grandes dunas de arenas en ciertas zonas de la superficie del municipio. En nivel de aguas freáticas se encuentra a una profundidad somera y variable dependiendo de la época de estiaje o lluvias.

El objetivo general es medir las propiedades mecánicas de los estratos que se encuentran en la zona conurbada Veracruz Boca del Río, así como el análisis de su microestructura mediante Geometría Fractal.

Cuantificar en el laboratorio las propiedades mecánicas de los diferentes estratos encontrados, entre los ensayos a realizar son: resistencia al esfuerzo cortante y proceso de consolidación del suelo.

Obtener perfiles estratigráficos mediante sondeos tipo PCA en puntos seleccionados en un plano acotado de coordenadas geográficas de la ciudad.

Toma de imágenes multiescalares en microscopio electrónico de barrido en condiciones de bajo vacío a escalas de 50x, 100x, 1000x, 5000x, y 10000x, para así medir los parámetros fractales para describir la variabilidad en espacio/tiempo del patrón estructural del suelo.

Correlacionar los parámetros fractales extraídos de imágenes digitales multiescalares, con las variables físicas y mecánicas medidas en el laboratorio con las técnicas tradicionales.



Figura 1. Imagen satelital del puerto de Veracruz y zona conurbada, se muestran marcados con círculos la ubicación de los 10 PCA's

## DESARROLLO DEL PROBLEMA

Se realizaron 10 sondeos de tipo pozo a cielo abierto (PCA), con una profundidad promedio máxima de 3.50 m. de los cuales se extrajeron muestras alteradas para obtener propiedades índices y muestras inalteradas para obtención de parámetros mecánicos i microscopía, en la figura 1 se muestran dichos sondeos.

La obtención de imágenes multiescalares se llevó a cabo en un microscopio electrónico de barrido (SEM) en condiciones de bajo vacío. Este equipo toma imágenes de la topografía de las muestras utilizando electrones secundarios o utilizando electrones retrodispersos, imágenes de composición, topográficas o sombreadas. El equipo puede trabajar en voltajes de aceleración de 0.5 a 30 KV, en condiciones de bajo y alto vacío pudiendo llegar hasta ampliaciones de 200,000. Sin embargo, la ampliación máxima a obtener está limitada principalmente por la composición química del material y la sensibilidad al haz electrónico.

El microscopio electrónico de barrido utilizado corresponde al JEOL JSM-6060 LV, que se encuentra en las instalaciones CFATA (Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada). En la UNAM campus Juriquilla El voltaje de aceleración utilizado fue de 15 KV con un spot size alrededor de 50. Se tomaron imágenes de distintas escalas.

Se extrajeron pequeños terrones (3 mm aproximadamente) de la muestra inalterada. Posteriormente las muestras fueron colocadas en porta muestras cilíndricos de cobre de aproximadamente 5 mm de diámetro y 10 mm de altura los cuales fueron previamente pulidos con un limpiador de metales, para eliminar toda sustancia que pudiera afectar el proceso de la toma de imágenes (Figura 2).



Figura 2. Extracción de muestra para toma de imágenes multiescalares en microscopio SEM

Se obtuvieron imágenes con ampliaciones de 50x, 500x, 1000x, 5000x, y 10000x. Una vez obtenido las series de datos de deformación de los diferentes ensayos se someterán a su análisis con el paquete de computo comercial Benoit 1.3 (SCION Corp. BENOIT versión 2003) BENOIT es recomendado como de referencia para pro-

pósitos de investigación, que mide dimensión fractal y el exponente de Hurst mediante cinco técnicas útiles en los conjuntos auto-similares y cinco para los autofines con el fin de comprobar la naturaleza fractal de los conjuntos analizados.

El método de Box-counting o conteo de caja es sin duda el más extendido en la literatura científica. Puede aplicarse con más o menos éxito a cualquier distribución de puntos, curvas, superficies, volúmenes (Figura 3). En la práctica, y resumiendo, se utiliza una rejilla de celdas de lado  $r$  cubriendo el objeto a explorar. Se contabilizan las celdas  $N$  ocupadas por la imagen y se repite la operación para otro tamaño de celda de lado  $r$ . El ajuste a la ley de potencias nos determina la dimensión fractal  $D$  de nuestro objeto. Evidentemente si la relación no ajusta a una ley de potencias, nuestro objeto no es autosimilar.

$$N(r) = cte \cdot r^{-D} \quad Ec(1)$$

El conteo de caja es un algoritmo en el que la imagen se divide en igual número de cajas (aproximadamente cuadradas). El número de cajas que contiene una sección requerida del contorno se cuentan. El proceso entonces se repite con diversos tamaños de la caja. La dimensión del fractal del contorno es la relación entre el algoritmo del número de cajas a través de las cuales el contorno pase y el algoritmo del tamaño de las cajas. Una relación lineal entre estos dos es un indicador de autosemejanza o fractalidad de la estructura, que es la característica dominante de los contornos del fractal. La dimensión fractal por conteo de caja ( $D_b$ ) extra los parámetros fractales a las imágenes analizadas en extensión .bmp. El archivo de salida contiene la dimensión fractal de caja ( $D_b$ ) y la desviación estándar (SD).

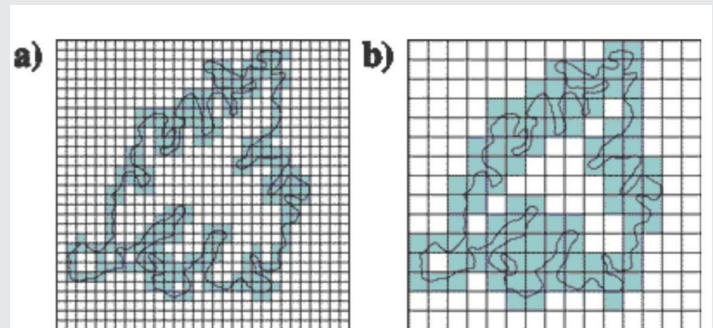


Figura 3. Proceso de conteo de caja (Box Counting) a) Conteo de caja a una escala micro. b) conteo de caja a escala macro. Fuente software Benoit.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros mecánicos que se analizaron son la cohesión y el ángulo de fricción interna, comparándolos con los parámetros fractales de conteo de caja ( $D_b$ ) de sólidos ( $D_{bs}$ ) y de poro ( $D_{bp}$ ). De igual manera se estudió el comportamiento de la rugosidad del suelo por medio del exponente de Hurst ( $H$ ) y la correlación con el ángulo de fricción interna y el esfuerzo de pre consolidación.

Se ha generado una base de datos con la información obtenida a partir del análisis de cada imagen con el software BENOIT V1.4. Dicha base de datos muestra el nombre asignado a cada PCA, la clave con la que las imágenes fueron almacenadas, la amplificación de cada imagen y posteriormente datos de la dimensión fractal de sólido y de poro. Además, se han concentrado los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio, tanto índice como de propiedades mecánicas.

Las imágenes obtenidas muestran una mejor obtención de datos es de la escala 50 hasta la amplificación 5000, ya que para la ampliación 10000 los datos obtenidos presentan mayor dispersión. Figura 4, 5, 6 y 7.

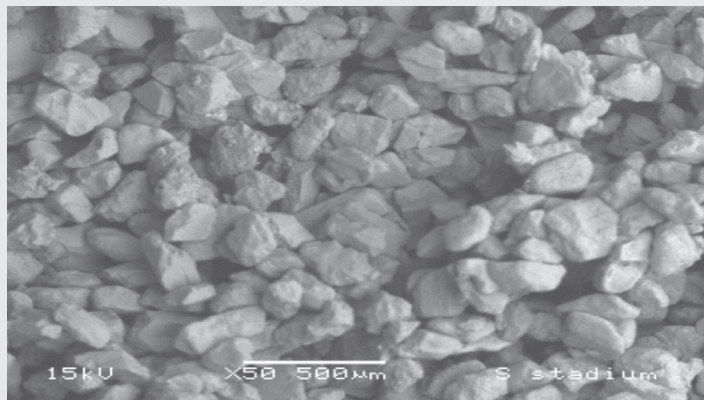


Figura 4. Muestra de arena con una amplificación de 50x.

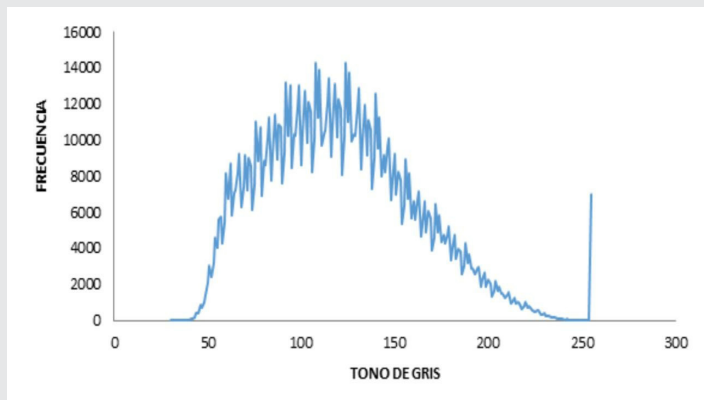


Figura 5. Histograma de ocurrencia de tonos de gris de la muestra anterior con una amplificación de 50x.

En general las imágenes ampliadas 10000x, es posible apreciar que el enfoque este hecho a un solo grano, es por eso que la Función de Densidad de Probabilidad muestra un gráfico con cambios abruptos en el que es posible apreciar de igual manera la gran cantidad de vacíos contenidos en el suelo. Por el contrario, la siguiente imagen muestra una distribución uniforme en el histograma, pero ya se encuentra enfocada en la parte fina. Por último, se puede apreciar que el histograma tiene una tendencia a dirigirse hacia la derecha, por lo que se presentan partículas de tamaños similares.

En el firmagrama se observan discontinuidades y mayor espaciado en la distribución global de tonos de gris al aumentar las escalas, esto debido a que al aumentar la escala la imagen se enfoca a un grano,

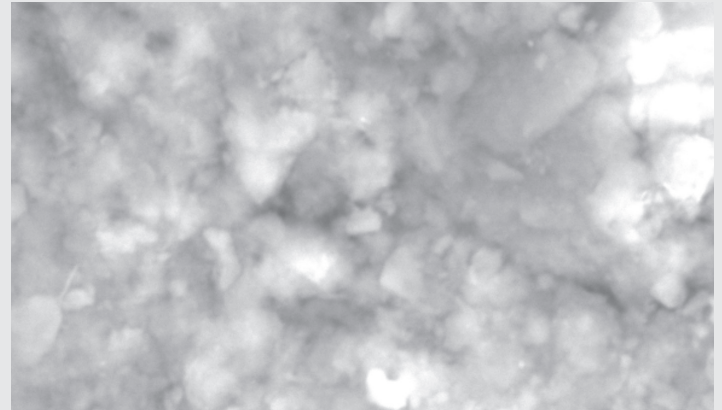


Figura 6. Amplificación de muestra a 10000x.

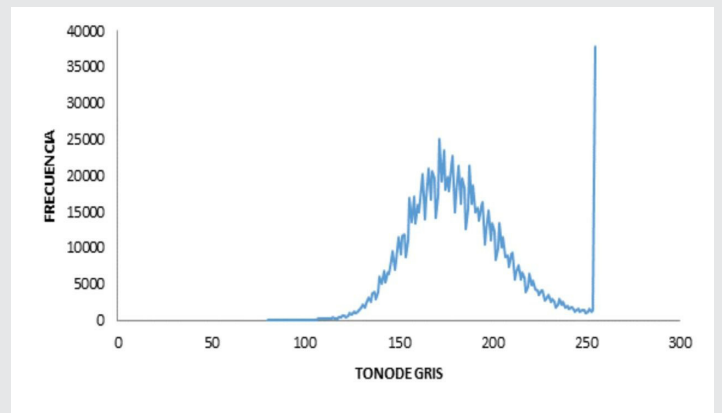


Figura 7. Histograma de ocurrencia de tonos de gris de la amplificación 10000x, se muestra un comportamiento diferente.

Por lo anterior se consideran como optimas las ampliaciones: 50x, 500x, 1000x y 5000x, despreciándose así las de ampliación 10000x ya que presentan comportamientos distintos y no se cumple una de las hipótesis de invariancia al escalado al enfocarse en un solo grano de muestra. En la figura 8 se muestran todos los valores promediados de H para las arenas del puerto de Veracruz, en donde se observan ciertas fronteras dependiendo del sondeo y de su localización, se presenta un resumen promediado por escala y sondeo observando que responde a un modelo polinomial con un  $R^2=0.60$ . Con esta grafica podemos concluir que se guarda una relación con la cual podemos estimar el exponente de Hurst para los suelos friccionante del Puerto de Veracruz y su Zona Conurbada, pero solo de manera general. Es importante mencionar que es un resumen del análisis de 90 imágenes aproximadamente.

En la figura 9 se aprecia que existe una correspondencia entre el exponente de Hurst H, y el ángulo de fricción interna para los suelos arenosos estudiados. A medida que

el ángulo  $\phi$  aumenta el exponente de Hurst decrece, y es posible explicarlo, porque los vacíos son menores en los suelos con un ángulo de fricción interno mayor, ya que estos poros son llenados por partículas más finas en donde además se cuenta con una buena distribución granulométrica. Y el conteo de caja de solidos es mayor en suelos con un ángulo  $\phi$  mayor.

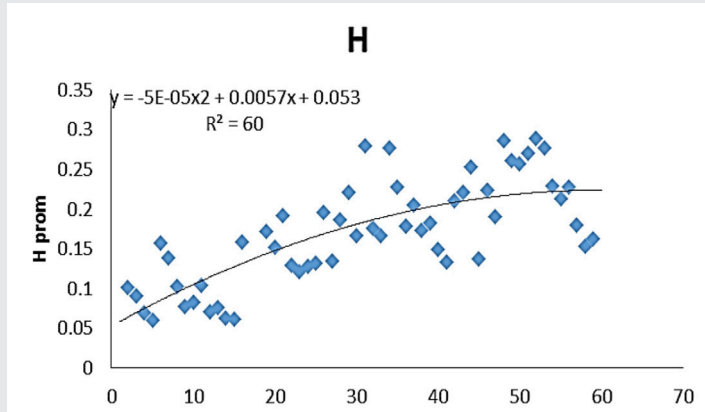


Figura 8. Hpromedio para los Suelos de comportamiento Friccionante del Puerto de Veracruz y su Zona Conurbada.

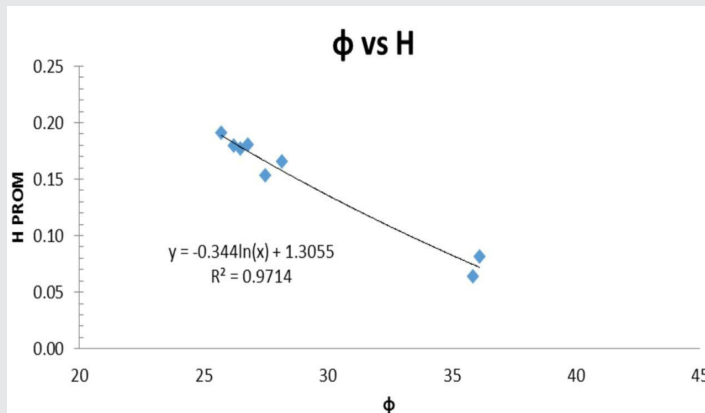


Figura 9. Comparación del ángulo  $\phi$  con el exponente de Hurst promedio por muestra.

La síntesis del análisis de imágenes para extraer el exponente de Hurst se muestra en la tabla 1, en donde se presenta el promedio del exponente de Hurst por sondeo, dicho promedio se obtiene del análisis de 9 imágenes a escalas diferentes, pero descartando la 10000x por presentar una dispersión alta.

En contraste, el exponente de Hurst se comporta de forma no persistente en los datos al compararse con la cohesión, debido a que los suelos en su mayoría son friccionante, por lo que para este caso la aplicación de la metodología de estimación del exponente de Hurst por el Conteo de Caja (Dbox) resulta ineficaz (Figura 10).

## CONCLUSIONES

El análisis de imágenes microscópicas para para estudiar sistemas macros mediante geometría fractal resulto ser una herramienta eficaz para poder determinar paráme-

tros mecánicos, en los suelos de comportamiento friccionante del Puerto de Veracruz y su zona conurbada. En este caso particular se analizó el ángulo de fricción interna, mostrando un comportamiento estimable con el exponente de Hurst, mediante un modelo matemático logarítmico.

Tabla 1. Resumen de propiedades mecánicas correlacionadas con el exponente de Hurst promedio de cada sondeo

PCA	UBICACIÓN	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Phi$	H
1	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.06	35.84	0.1164
2	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.13	27.98	0.1067
3	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.12	36.12	0.0717
4	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.10	36.52	0.2058
5	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.52	27.49	0.1348
6	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.13	39.11	0.1794
7	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.05	26.48	0.1773
8	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.13	26.71	0.1975
9	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.13	26.21	0.2460
10	19°5'36.73"N 96°7'25.75"O	0.11	28.15	0.1590

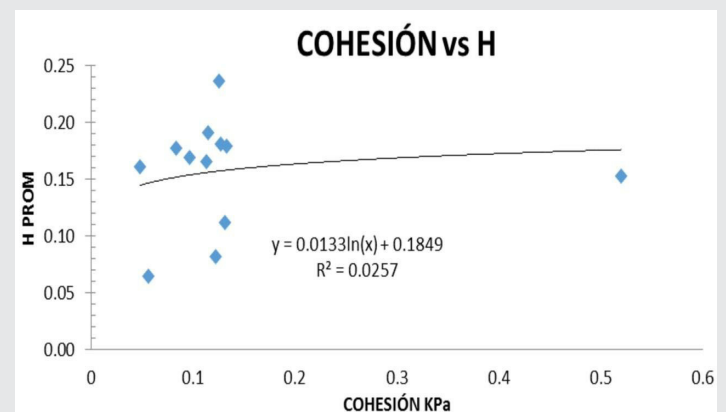


Figura 10. Comparación de cohesión con el exponente de Hurst promedio por muestra, no guarda relación.

Los cambios de solido/poro del suelo se cuantificaron con la herramienta auto similar de conteo de caja "Box Counting" del software Benoit versión 1.3. en donde se analizó la variabilidad del sistema a sufrir cambios de humedad y volumétricos, así como facilitar el drene de corrientes de agua.

Se logró crear una base de datos amplia de parámetros fractales y de propiedades índice y mecánicas que servirá de apoyo a nuevas investigaciones y tal vez a la implementación de una nueva forma de estudio dentro de la mecánica de suelos.

En esta tesis solo se analizó el exponente de Hurst comparándolo con la variación del ángulo de fricción interna del suelo y la cohesión tomando en cuenta su génesis, por lo que se recomienda compararlo con más propiedades índice y parámetros mecánicos, para seguir validando la teoría de la geometría fractal aplicada a la Mecánica de Suelos.

Se recomienda emplear más herramientas para el análisis fractal, ya que en esta tesis solo se utilizó la herramienta auto similar de Box Counting, pero existen más herramientas auto afines, como el rango re-escalado, Variograma y ondoletas, los cuales han demostrado su eficacia en suelos de comportamiento cohesivo. Esto con la finalidad de encontrar una relación que guarde un comportamiento que sea preciso para poder representar el exponente de Hurst para los suelos del puerto de Veracruz.

El análisis y selección de imágenes se puede ver reducido por errores durante la manipulación de la muestra, por ello es necesaria una extracción correcta de las muestras, ya que de no hacerlo se corre el riesgo de que los resultados obtenidos no sean correctos.

Esta investigación se limitó a los suelos arenosos con comportamiento puramente friccionante del puerto de Veracruz y su zona Conurbada, por lo que queda abierta a estudiar los demás tipos de suelo existente en esta zona y así obtener un exponente de Hurst que sea representativo de toda la zona.

#### BIBLIOGRAFÍA

[1] Joseph E. Bowles (2008). *Foundatio Analysis and design Fifth Edition*. Mc Graw-hill. International Edition.

[2] Cheng S. S (2008). *Spatial scaling analyses of soil physical properties: a review of spectral and wavelet methods*. Vadose zone Journal. Soil science Society of America. Madison. USA.

[3] Logsdon S.D., E. Perfec and A.M Tarquis.(2008). *Multiscale soil investigations: physical concepts and mathematical techniques*. Published in vadose zoen Journals. Madison, USA.

[4] Heuvelink G.B.M. and R. Webster (2001). *Modeling soil variantion: past, present, and future*. Institure for Biodiversity and Ecosystem Dynamics. University of Amsterdam, Nieuwe Achtergracht. Amsterdam, Netherlands.

[5] Pachesky Y., E. perfect and M.A. Martín (2006). *Fractal Geometry Applied to Soil and Related Hierarchical Systems*. Geoderma. 134: 237-239.

[6] Zhang X. (2006). *Consolidation theories for saturated-unsaturated soil and numerical simulation of residential buildings on expansive soil*. Texas A&M University. <http://handle.tamu.edu/1969.1/2747>.

[7] Mandelbrot, B.B., (1993) *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Co, New York 468 pp.

[8] Schneider M., , H. Andrä, P. Lechner, F. Etemeyer, W. Volk and H. Steeb (2018). *Modelling the microstructure and computing effective elastic properties of sand core materials*. International Journal of Solids and Structures. Volume 143, 15 Pp. 1-17

[9] Zhan Q. and C. Qian. (2017). *Stabilization of sand particles by bio-cement based on CO2capture and utilization: Process, mechanical properties and microstructure*. Construction and Building Materials. Volume 133, Pp 73-80.

[10] Choobbasti A.J. and S. S. Kutanaei. (2017). *Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 9, Issue 5, Pp. 981-988.

[11] Zhang P., L. J. Xiuli and D. D. Lu. (2018). *Computational homogenization for mechanical properties of sand cobble stratum based on fractal theory*. Engineering Geology. Volume 232, 8 January 2018, Pp 82-93.

[12] Yu F. (2018). *Particle breakage in triaxial shear of a coral sand*. Soils and Foundations Volume 58, Issue 4, August 2018, Pp. 866-880.

[13] Tiana L. and E. Liu. (2018). *Effect of particle shape on micro- and mesostructure evolution of granular assemblies under biaxial loading conditions*. Comptes Rendus Mécanique. Available online 18 September 2018.

[14] Tiana J., E. Liuab, L. Jianga, X. Jianga, Y. Suna, R. Xuc. (2018). *Influence of particle shape on the microstructure evolution and the mechanical properties of granular materials*, Comptes Rendus Mécanique. Volume 346, Issue 6, Pp 460-476.

[15] Jang, X.D. Luo (2015). *Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials* J. Mech.

[16] Yang Y., Y.M. Cheng, Q.C. Sun. (2017). *The effects of rolling resistance and non-convex particle on the mechanics of the undrained granular assemblies in 2D* Powder Technol., 318 (2017), pp. 528-542