

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.

Caracterización geostadística de la zona urbana de la Ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, México

Juan Antonio GUZMÁN-VENTURA^{a,1} y María de la Luz PÉREZ-REA^b

^a*Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana.*

^b*División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería. UAQ.*

Resumen. La geostatística apoyada en los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitan la aplicación de técnicas de interpolación espacial para la estimación de propiedades del suelo, pero no resulta fácil el determinar cuál es la que mejores resultados arroja según el fenómeno a estudiar. Por ello, se evalúan y comparan tres técnicas disponibles en un sistema de información geográfica de código libre: Splines regularizado, el Inverso de la distancia ponderado y estimación de Kriging ordinario, para establecer la mejor representación de la configuración estratigráfica superficial de la zona urbana de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz, en México. Se utilizan un total de 89 sondeos geotécnicos profundos (SPT), así como el software SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) y QGIS (Quantum gis) para calcular las estimaciones espaciales del estrato superficial de arena. Cada técnica fue evaluada en base a la raíz del error cuadrático medio, calculado a partir de una validación entre las estimaciones generadas y los datos medidos de 20 sondeos de muestra, que no fueron utilizados en el proceso de estimación espacial. El presente estudio muestra que, para la estimación de la capa superficial de arena, el Kriging ordinario ofreció el mejor rendimiento entre las técnicas evaluadas.

Palabras Clave. Geostatística, interpolación, arena, espesor, semivarianza, Coatzacoalcos.

1. Introducción

La ciudad y puerto de Coatzacoalcos, pertenece al municipio del mismo nombre, se localiza al sur del Estado de Veracruz, México (Figura 1), a una latitud de 18.15° N y longitud -94.43° W, a una altura promedio de 10 metros sobre el nivel del mar (msnm). La importancia del municipio, radica en que tiene una ubicación privilegiada con ventajas naturales y logísticas, lo cual permitió que se instalaran en décadas pasadas, una parte importante de la industria Petroquímica del país.

La geología de la zona urbana de la ciudad esta diferenciada claramente, entre depósitos aluviales y eólicos de ambiente costero. El primer depósito está asociado a las corrientes de los ríos Coatzacoalcos y Uxpanapa, dado que sus desbordamientos en la planicie de inundación aportan una gran cantidad de sedimentos, material cuya acumulación incrementa el peso de las capas superficiales favoreciendo un hundimiento regional [1].

¹ Profesor de Tiempo Completo, Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Avenida Universidad Km. 7.5, Coatzacoalcos, Veracruz, México; E-mail: juguzman@uv.mx.

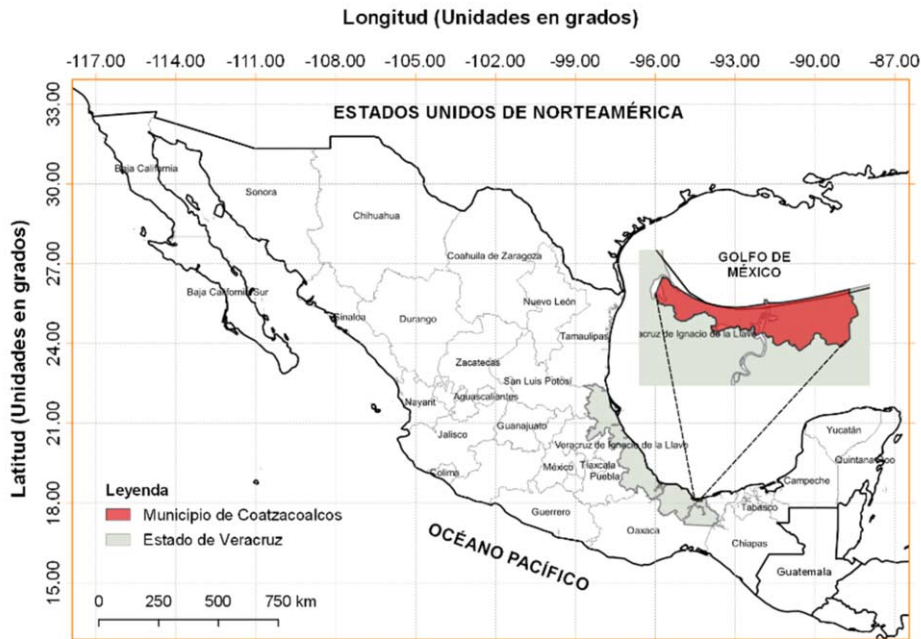


Figura 1. Ubicación del Municipio de Coatzacoalcos, Ver.

Por su parte, los depósitos eólicos forman playas y cordones litorales, modeladas por la acción del viento, con énfasis en las temporadas de nortes, lo que favorece el avance de las dunas tierra adentro, formando así, un estrato superficial de arena limosa mal graduada, que cubre de norte a sur la zona urbana de la ciudad, con espesores de hasta 30 metros de profundidad, en el cual, se tienen características litológicas propicias para el desarrollo del fenómeno de la licuefacción de suelos [1], como quedo constatado con el sismo del 26 de agosto de 1959 [2, 3] y del sismo de Tehuantepec del 7 de septiembre de 2017, en donde varias viviendas localizadas en el sur de la ciudad, presentaron fallas debido a este fenómeno [4].

El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar tres técnicas de estimación espacial: Splines regularizado, el Inverso de la distancia ponderado y estimación de Kriging Ordinario, para determinar cuál técnica se adapta mejor a la caracterización geoestadística del estrato superficial de arena de la cual se hace mención.

2. Localización geográfica del área de estudio

El área de estudio corresponde a la zona urbana de la ciudad (Figura 2). De acuerdo con el sistema de Coordenadas Universal Transverse de Mercator (UTM 84, Zona 15 Norte), esta zona está delimitada por las coordenadas: $X_1=337500$, $Y_1=2001000$ y $X_2=351000$, $Y_2=2008500$, cubriendo el polígono de análisis un área aproximada de 56 km².

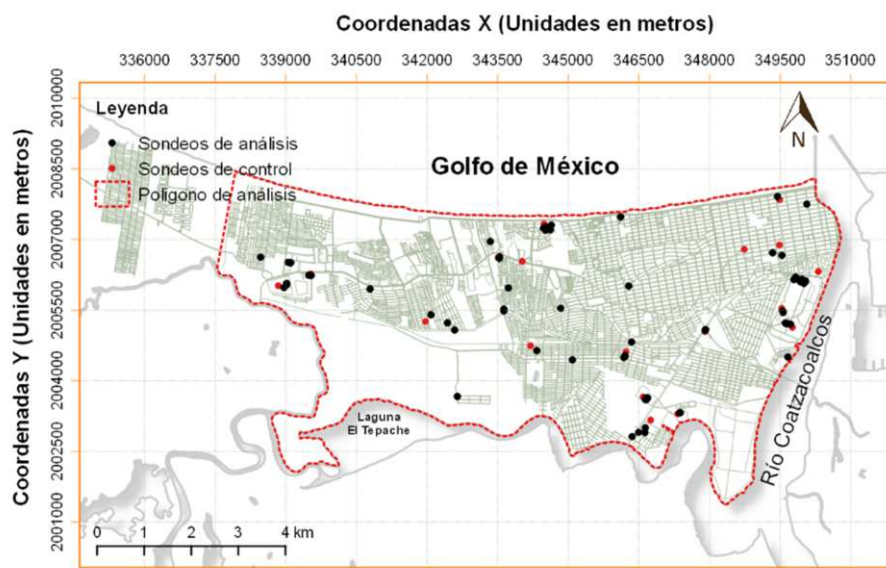


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio.

3. Métodos de análisis

Para realizar el análisis geostatístico y así establecer la mejor representación de la capa superficial de arena, se utilizó el sistema de información geográfica de código abierto SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) y QGIS (Quantum gis), en donde se evaluó y compararon tres técnicas de estimación espacial: Splines regularizado, el Inverso de la distancia ponderado y Kriging ordinario. Los datos utilizados en las estimaciones corresponden a los registros de 89 Sondeos de Penetración Estándar (ASTM D1586-11) ejecutados dentro de la zona urbana de la ciudad (Figura 2), de los cuales se utilizaron 69 sondeos para realizar las simulaciones y 20 sondeos se utilizaron como “puntos de control”, para validar las estimaciones generadas. Los sondeos utilizados están esparcidos sin patrón alguno, ya que fueron realizados para estudios particulares, los cuales van desde los 5.40 hasta los 61.80 metros de profundidad.

Por motivos de espacio en el presente trabajo, se omite la descripción matemática de cada una de las tres técnicas que se emplearon, tomando en consideración que existe una extensa literatura sobre el tema, aunque, se recomienda consultar la referencia [5].

4. Evaluación y comparación

Para comparar los resultados obtenidos de cada una de las técnicas aplicadas y medir la cantidad del error que hay entre dos conjuntos de datos, se utilizó la raíz del error cuadrático medio (RECM);

$$RECM = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^n (v_i^* - v_i)^2} \tag{1}$$

donde *N* es el número de puntos de validación o “control” que para este caso fue de 20 sondeos seleccionados aleatoriamente y *v_i^{*}* y *v_i* son valores estimados y medidos en cada ubicación *i* respectivamente.

5. Resultados y discusión

En la Tabla 1, se presentan los datos estadísticos no transformados como transformados, del estrato de arena superficial. Como se puede ver en la Figura 3a, el histograma del estrato de arena sin transformar tiene una asimetría positiva debido a que los valores tienden a concentrarse a la parte izquierda del mismo. En la Figura 3b, se visualiza el histograma simétrico obtenido de los datos transformados.

Tabla 1. Datos utilizados en el análisis geostatístico.

Variable	Espesor no transformado del estrato de arena (m)	Espesor transformado del estrato de arena (m)
Mínimo	0.00	0.18
Máximo	23.00	3.13
Media	6.27	1.59
Mediana	4.20	1.50
Desviación Estándar	4.98	0.70
Asimetría	1.46	0.30
Curtosis	1.56	-0.60
Total de sondeos	69	68

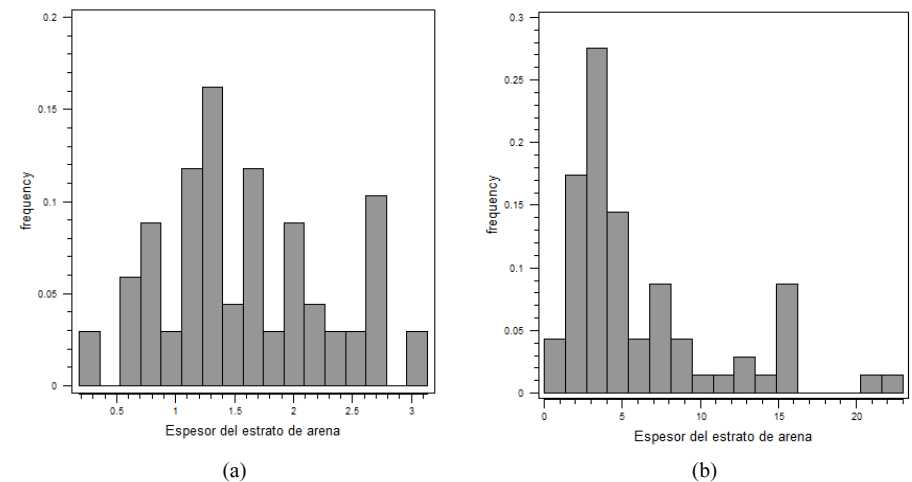


Figura 3. Histogramas: a) Espesor del estrato de arena con datos no transformados y b) Espesor del estrato de arena con datos transformados.

5.1. Kriging ordinario

Para la ejecución de la técnica del Kriging, fue necesario que el conjunto de datos a utilizar tuviera una distribución normal (Figura 3b), fuera estacionario y no existiera tendencia. Debido a que los datos sin transformar tienen un coeficiente de asimetría >1 (Tabla 1), los datos se transformaron logarítmicamente ($z=\ln x$) como lo sugiere Webster y Oliver [6]. Los mismos autores recomiendan que para que una distribución se considere normal, el coeficiente de asimetría deberá ser cercana a cero y la curtosis entre un rango de más menos tres (Tabla 1). El comportamiento espacial de la variable de estudio se analizó considerando un semivariograma esférico, con un efecto pepita o “efecto nugget” de 0.083, meseta de 0.49 y una distancia de correlación máxima de 3880 metros (Figura 4). Los variogramas ajustados que se realizaron permitieron la identificación de la anisotropía en la variabilidad espacial en una dirección azimutal de 105° .

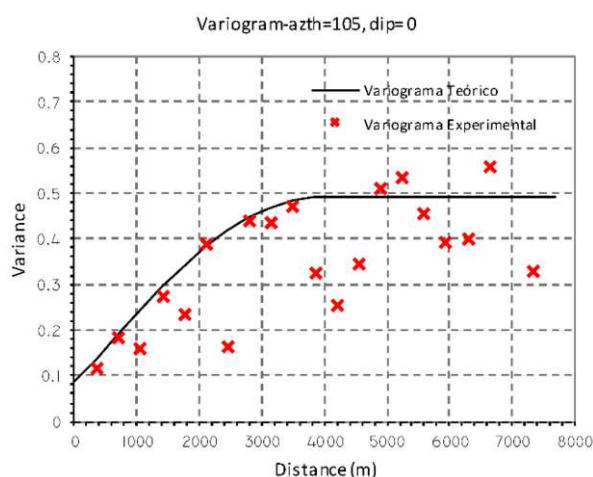


Figura 4. Semivariograma experimental y teórico ajustado del espesor superficial de arena.

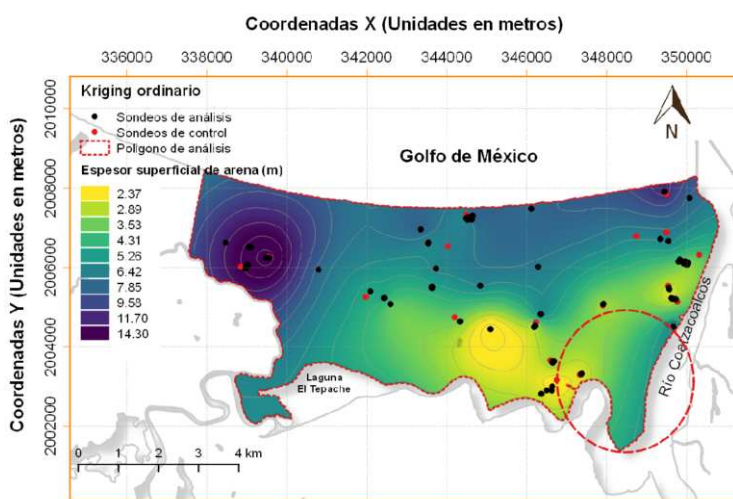


Figura 5. Resultados de la estimación del espesor superficial de arena; Técnica de Kriging ordinario.

De acuerdo a los resultados de la estimación realizada por el método de Kriging ordinario (Figura 5), se puede apreciar que los espesores más grandes de arena se localizan en el noroeste de la ciudad y en contraste, los espesores más pequeños en el lado sur; zona adyacente al lecho del río Coatzacoalcos, que corresponde a la zona baja o llanura de inundación de la ciudad. El valor obtenido de la raíz del error cuadrático medio (RECM) por esta técnica es de 3.541 (Tabla 2), valor que se asocia, a que, en algunas zonas de la parte sureste de la ciudad, como se señala en el círculo rojo punteado (Figura 5) se estiman espesores de arena de hasta 5.26 metros, cuando de acuerdo a los valores de los sondeos de control y reportes en la literatura, se tienen espesores de 2 a 4 metros de arena para esta zona.

Tabla 2. Resultados de la raíz del error cuadrático medio, RECM.

Técnica	RECM
Spline regularizado	4.094
Inverso de la distancia ponderada	3.839
Kriging Ordinario	3.541

5.2. Inverso ponderado de la distancia (IDW)

La estimación generada por la técnica del Inverso ponderado de la distancia (Figura 6), presenta un valor mayor que el obtenido con la técnica del Kriging ordinario, debido a que una fracción de la zona geotécnica alta [7], como se señala en el círculo rojo punteado (Figura 6), se estiman espesores de arena no mayores a 4.14 metros, cuando se han reportado en la literatura, espesores que van de los 15 hasta los 30 metros para esta zona. Esta discrepancia se ve reflejada con un valor de RECM de 3.839 (Tabla 2).

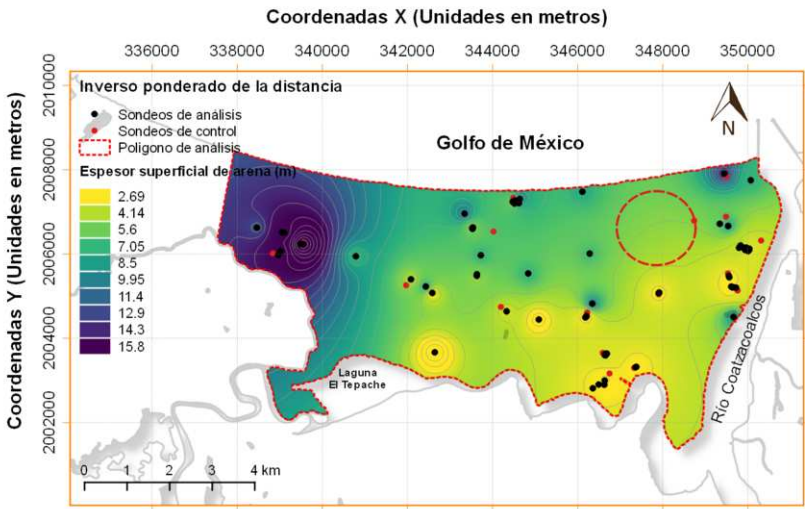


Figura 6. Resultados de la estimación del espesor superficial de arena; Técnica Inverso ponderado de la distancia.

5.3. Spline regularizado

La estimación generada por la técnica Spline regularizado (Figura 7), es la que presenta la mayor incertidumbre entre las técnicas empleadas, ya que incluso presenta valores negativos del espesor de arena, como se puede apreciar en el círculo rojo punteado (Figura 7). En la literatura para esta zona en particular, se han reportado espesores de 2 a 4 metros de arena [7]. El valor obtenido de RECM es de 4.094 (Tabla 2), valor más elevado entre las técnicas empleadas.

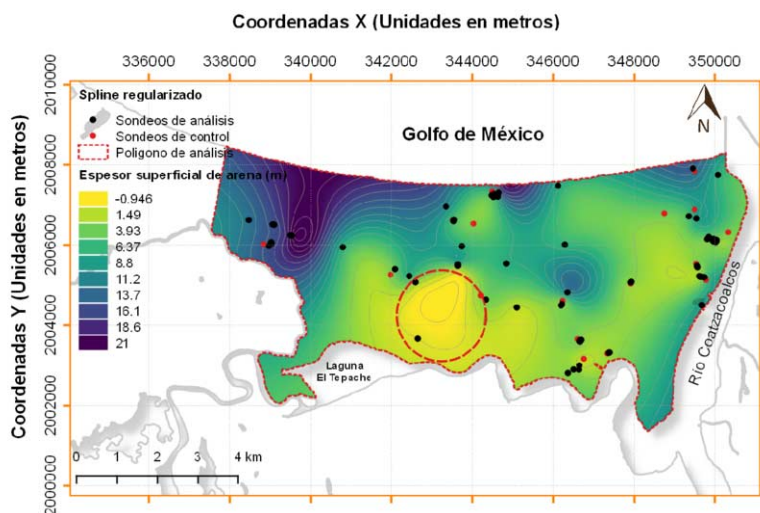


Figura 7. Resultados de la estimación del espesor superficial de arena; Técnica Spline regularizado.

6. Conclusiones

Las técnicas que se emplearon para la estimación de la capa superficial de arena que cubre la zona urbana de la ciudad de Coatzacoalcos; Splines regularizado, el Inverso de la distancia ponderado y Kriging ordinario, se eligieron entre varias técnicas disponibles en la literatura debido a su popularidad y robustez como métodos de interpolación para la predicción espacial de variables en casos similares.

El estudio muestra que, dentro de las técnicas empleadas, la técnica de Kriging ordinario es la que mejores resultados arroja, con un valor de la raíz del error cuadrático medio (RECM) de 3.541, mientras que la técnica de Spline regularizado fue la más inexacta de las tres con un RECM de 4.094.

La incertidumbre presentada en los valores de RECM, obtenidos con las tres técnicas, la podemos asociar a los siguientes puntos: 1) Los sondeos que se utilizaron para las estimaciones, se concentran en áreas muy pequeñas y en algunos casos muy distantes entre grupos, esto se debe a que originalmente estos sondeos fueron ejecutados para estudios geotécnicos puntuales 2) La insuficiente profundidad de exploración en algunos sondeos, estimulo que no se pudiera definir con claridad el espesor de arena superficial y 3) El excesivo diferencial que existe entre el valor mínimo y máximo del espesor del estrato de arena que sirvió de análisis.

En términos generales, se puede considerar que el estrato superficial de arena que cubre la zona urbana de la ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz., tiene una estructura espacial, que puede modelarse con la técnica de Kriging ordinario.

Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado durante la estancia sabática del primer autor en la Universidad Autónoma de Querétaro. Esta estancia fue posible gracias al apoyo institucional de la Universidad Veracruzana y del área de posgrado de ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Gracias especiales a la Dra. María de la Luz Pérez Rea por todo el apoyo recibido durante la estancia.

Referencias

- [1] CENAPRED, Atlas de riesgos naturales del Municipio de Coatzacoalcos, Veracruz, México, (2011), 15-16 y 48
- [2] R. Díaz de Cossio, Foundation Failures during the Coatzacoalcos (México), Earthquake of 26 August 1959, *Second World Conference of Earthquake Engineering*, (1960), 473-486.
- [3] R.J Marsal, Behavior of sandy uniform soils during the Jaltipán Earthquake, México, *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (1961), 229-233.
- [4] J. Guzmán, F. Williams, G. Riquer & R. Leyva, Fallas de licuación de suelos inducidas por el sismo del 7 de septiembre de 2017 en la ciudad de Coatzacoalcos, Ver., *Revista de Ingeniería Sísmica*, (2018), En revisión.
- [5] R. Magdaleno-Márquez, M. Pérez-Rea & V. Castaño, Geostatistical characterization of the soil of Aguascalientes, México, by using spatial estimation techniques, *SpringerPlus*, (2016) <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2593-7>
- [6] R Webster & M. Oliver, *Geostatistics for environmental scientists*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, United Kingdom, 2007.
- [7] L. Astudillo, J. Guzmán, F. Trejo, F. Williams, G. Riquer & R. Leyva, Propuesta de zonificación geotécnica de la zona urbana de la ciudad de Coatzacoalcos, Ver., *Memorias de la XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, (2010), 247-252