



<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ANÁLISIS POR CONFIABILIDAD DE ASENTAMIENTOS DE CIMIENTOS SUPERFICIALES*

Reliability analysis in settlements of isolated footing

GIOVANY SUÁREZ PINILLA**

Recibido: 25 de septiembre de 2016. Aceptado: 25 de noviembre de 2016

DOI: <http://dx.doi.org/10.21017/rimci.2017.v4.n7.a19>

RESUMEN

Con miras a realizar un análisis de confiabilidad de asentamientos de un cimiento superficial, emplazado en un estrato de suelo de compresibilidad variable en la ciudad de Bogotá, se determinó una función de comportamiento que finalmente depende de cuatro variables consideradas como aleatorias. La información estadística requerida para tal propósito, proviene de otras investigaciones sobre las propiedades de compresibilidad del terreno en esta ciudad. Con tres diferentes modelos de simulación se evalúa el promedio y el coeficiente de variación del asentamiento esperado por consolidación, y se compara la respuesta de los modelos con la variabilidad de los datos de entrada. Asimismo, es posible realizar conjeturas sobre la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a los resultados obtenidos. Por último, en una hoja de cálculo de Excel, se crea una rutina para efectuar este tipo de análisis con otras configuraciones de carga y geometría del cimiento. A partir de estas consideraciones, se calcula la probabilidad de falla para los asentamientos esperados.

Palabras clave: asentamientos, consolidación, confiabilidad, Taylor, estimativos Ppuntuales, Monte Carlo.

ABSTRACT

In order to perform a reliability analysis in settlements of an isolated footing founded on a soil layer with variable compressibility in Bogota City, a four-dependent variables performance function was defined. Statistical data demanded for that purpose, come from other research about soil deformability properties in this town. Mean and coefficient of variation of expected consolidation settlement were assessed through three several models and the results are compared to variability of input data. At the same time, conjectures on the best fit for the probability density function can be done. Finally, in an Excel spreadsheet, a routine for realizing this sort of analysis with different load and geometry setup was designed. From these considerations, the probability of failure for the expected settlement is calculated.

Keywords: settlements, consolidation, reliability, Taylor, point estimate, Monte Carlo.

I. INTRODUCCIÓN

DESDE MEDIADOS del siglo XX, la inclusión de teorías probabilísticas en problemas de análisis y diseño en ingeniería se ha tornado una actividad más común y de mayor relevancia. Sin menospreciar en ningún momento los grandes avances alcanzados a partir de fórmulas determinísticas (aquellas donde se reemplazan valores únicos de las variables para llegar a un valor definitivo de diseño), el uso de la

probabilidad abre definitivamente un amplio espectro de opciones que permiten al cuerpo de ingenieros a cargo de un proyecto, tener nuevas alternativas a la hora de tomar decisiones que permitan encontrar un equilibrio apropiado entre costos, viabilidad técnica y operativa, y ciertamente, la seguridad.

Es en ese sentido que se vuelve imperante la introducción de conceptos más desarrollados,

* Este trabajo hace parte de la Línea de Investigación de la Maestría en Ingeniería – Geotecnia, de la Universidad Nacional de Colombia. Director del Trabajo, MSc, PhD Carlos Eduardo Rodríguez Pineda.

** Ingeniero Civil de la Universidad Nacional de Colombia, Magíster en Ingeniería de la misma Universidad y con estudios de posgrado en la Universidad de la Sabana – Bogotá. Correo electrónico: jgsuarezp@unal.edu.co

como la determinación de índices de confiabilidad, a partir del análisis estadístico de variables aleatorias y no de la simple definición de un factor de seguridad por encima de Uno [1]. Por tal razón, el trabajo que se expone a continuación se centrará en un material natural que reúne todas las condiciones para ser tratado con un enfoque probabilista: se trata del suelo, como material de construcción [2]. Justamente, en disciplinas como la ingeniería industrial, mecánica y de sistemas, por mencionar solo algunas, las propiedades de los materiales empleados provienen generalmente de procesos de fabricación con estándares de calidad que buscan altas resistencias y durabilidades, a la vez de garantizar una baja variabilidad en las propiedades físicas de los mismos. Contrariamente, en un campo de la ingeniería civil cuyo desarrollo científico y tecnológico está encaminado al estudio de los materiales terrosos -suelo y roca- es imposible encontrar las características uniformes que llegan a tener, por ejemplo el acero, el plástico o un concreto de alta resistencia [3]. Este campo al que se alude es la Geotecnia o ingeniería geotécnica y que es pilar fundamental para toda obra civil emplazada sobre la superficie terrestre.

En este caso en particular, se dará continuación a los valiosos trabajos desarrollados anteriormente en la Universidad Nacional Sede Bogotá sobre la caracterización probabilística de sus depósitos de suelo, que en algunos casos ya alcanzan a esbozar un análisis por confiabilidad de los asentamientos esperados, una vez zonificado el campus universitario. Estos asentamientos, entendidos como la deformación del suelo debido a su peso propio o a cargas externas, representan uno de los grandes retos que confronta el diseño de una cimentación, pues a lo largo de la historia, cientos de estructuras han colapsado o han perdido totalmente su funcionalidad por deformaciones excesivas del terreno [4].

Avanzando un paso más en esta dirección, es necesario implementar rutinas sistematizadas que permitan llevar a cabo de forma eficiente un análisis de confiabilidad para estas deformaciones y que incluyen, en el presente trabajo, tres diferentes métodos de simulación: Serie de Taylor, Estimativos Puntuales y Método de Montecarlo, para condiciones de carga y geometría regulares en un cimiento superficial.

Teniendo en cuenta estas vicisitudes se ha generado una herramienta que permite estimar la confiabilidad para la ocurrencia de diferentes niveles de asentamiento en un cimiento superficial predeterminado, con una configuración de geometría y carga a partir de la cual se definió una función de comportamiento que resultó al final dependiente de cuatro variables aleatorias: la relación de vacíos $-e_1, e_2-$ y el índice de recompresión del suelo $-c_{r1}, c_{r2}-$. Se crea entonces un algoritmo para ser implementado en la hoja de cálculo Excel, que permitirá obtener la probabilidad de ocurrencia de un asentamiento dado, a través de la aplicación de los modelos de simulación mencionados previamente.

II. EL ANÁLISIS POR CONFIABILIDAD Y EL MARGEN DE SEGURIDAD: ALGUNOS MECANISMOS PARA SU EVALUACIÓN PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se ha explicado, la variabilidad implícita en los cálculos ingenieriles conmina al uso de funciones de distribución de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) que puedan describir idóneamente el comportamiento aleatorio de $e_o y c_r$. En resumen, tales funciones quedan definidas por su valor medio (μ_x), desviación estándar (σ_x) e incluso por la simetría o asimetría de PDF, definida por su coeficiente de sesgo (*skewness*, ϑ_x). En este apartado, se exponen brevemente tres técnicas de amplio uso que evalúan tales parámetros y que van desde una complejidad mínima -serie de Taylor- hasta el reconocido Método de Monte Carlo, que es el más comúnmente usado pero que demanda a la vez un algoritmo computacional más robusto [5]. Tales técnicas propenderán por la evaluación racional de una probabilidad de falla y del margen de seguridad en el cálculo de asentamientos de un cimiento rectangular, que en otras palabras podría traducirse como qué tan probable es superar un asentamiento admisible o tolerable, en concordancia con una limitación establecida por algún código o criterio ingenieril [6].

Citando un ejemplo, para el cálculo de la capacidad portante de una estructura, es usual encontrar la siguiente expresión para el margen de seguridad Z:

$$Z(X_i) = R(X_i) - L(X_i) \quad (1)$$

donde R y L representan la función de comportamiento de la resistencia R y la carga L , respectivamente y X_i es el conjunto de valores aleatorios que pueden tomar las variables involucradas. Sin embargo, para el estudio de asentamientos, la forma de la ecuación (1) se podría expresar de una manera más conveniente teniendo en cuenta las restricciones dadas para el caso colombiano en la norma sismorresistente NSR10, que en su apartado H.4.9.3 establece el asentamiento máximo total en 25 cm (0.25 metros) [7].

Se tiene entonces,

$$Z(X_i) = 0.25 - \delta(X_i)$$

donde $\delta(X_i)$ es el asentamiento que se calcula con las variables que se discriminan más adelante (Fig. 1).



Fig. 1. Diagrama cualitativo que relaciona el margen de seguridad y la probabilidad de falla.

Así pues, se llega a un objetivo del análisis de confiabilidad, que es garantizar una condición de seguridad y que sólo es posible en términos de probabilidad; es decir:

$$P_s = P(Z(X_i) > 0) = P(\delta(X_i) < 0.25)$$

siendo P_s la probabilidad de tener una condición segura y $P(\delta(X_i) < 0.25)$ es la probabilidad de que el asentamiento esté por debajo de los 25 centímetros.

Por antonomasia, la probabilidad de que se dé una condición de inseguridad o dicho de otro modo, la probabilidad de falla P_f está dada por

$$P_f = 1 - P_s = P(Z(X_i) < 0) = P(\delta(X_i) > 0.25) \quad (2)$$

El paso a seguir consiste en proponer una PDF adecuada para la función de comportamiento $\delta(X_i)$, que estará definida en función de cuatro variables aleatorias, como se verá en el modelo de estudio. Es aquí donde es necesario acudir a herramientas de simulación que ayuden a encontrar los parámetros de la PDF buscada (μ_x , σ_x) y que permita calcular $P(\delta(X_i) < 0.25)$.

Para lograr este propósito, se trabajó con las siguientes aproximaciones:

- Serie de Taylor.
- Estimadores puntuales.
- Método de Montecarlo.

Brevemente se expondrán los fundamentos, fortalezas y debilidades de ellas tres.

A. Serie de Taylor – Primer Orden Segundo Momento (FOSM)

Como es bien sabido, una serie de Taylor permite aproximar el valor de una función por medio de una serie de potencias alrededor de un punto determinado. En el caso de funciones de probabilidad, la serie se centra en el valor promedio (μ_x), se trunca en el primer término (primer orden) y permite calcular también la varianza (σ_x^2) de la PDF buscada (segundo momento) de acuerdo a la ecuación (3), donde n es el número de variables aleatorias.

$$Z(X_1, \dots, X_n) = Z(\mu_1, \dots, \mu_n) + \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{x_i}) \cdot \frac{\partial Z}{\partial x_i} \quad (3)$$

Debido a su planteamiento sencillo, permite realizar una rápida y útil aproximación de los dos primeros momentos estadísticos de la función de comportamiento que desee evaluarse. Sin embargo, debido a su estructura netamente lineal, adolecerá de mucha precisión cuando se trabaje con expresiones algebraicamente complejas.

B. Estimativos puntuales (PEM)

En el tratamiento de variables aleatorias discretas es usual construir histogramas de frecuencia relativa y acumulada. Estos diagramas otorgan una primera aproximación para evaluar la probabilidad de ocurrencia de un evento. Este es en

síntesis el objetivo de la técnica de los estimativos puntuales: hacer una discretización de funciones de probabilidad continuas, donde la altura de los «histogramas» está en función de unos pesos de probabilidad proporcionales al número de variables aleatorias involucradas en los cálculos. La Fig. 2 resume lo expuesto aquí, para dos variables aleatorias, lo que da origen a una partición de la PDF en cuatro secciones.

Finalmente, cada variable aleatoria se evalúa en los valores $\mu_{xi} + \sigma_{xi}$ y en $\mu_{xi} - \sigma_{xi}$. De tal modo que con los 2^n cálculos realizados, se halla el valor promedio y la desviación estándar de la función de comportamiento.

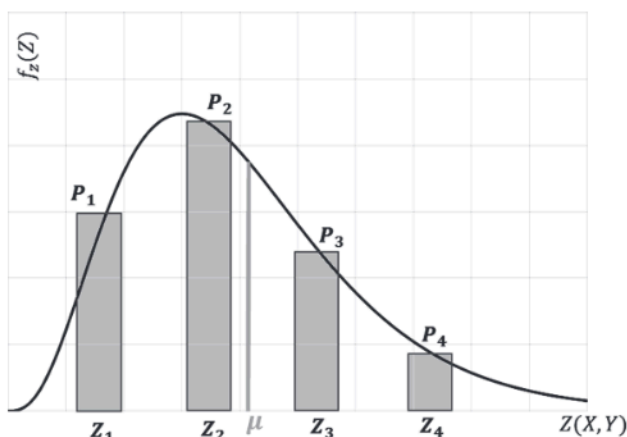


Fig. 2. Discretización de PDF para $n=2$ en el método PEM
(Adaptado de Ruseli, 2008).

C. Método de Monte Carlo (MCS)

Este tipo de simulación puede ser usado en cualquier campo del conocimiento. En el MCS los supuestos sólo se hacen sobre las variables aleatorias de entrada, cuyos valores se generan de manera compatible con la función de densidad de probabilidad correspondiente. Así, como gran ventaja de este método, el margen de seguridad se calcula para cada iteración. El proceso se repite numerosas veces y se evalúa el valor promedio, la desviación estándar y opcionalmente el coeficiente de sesgo. De este modo, el procedimiento de Monte Carlo consiste en resolver un determinado problema muchas veces para construir una distribución probabilística de los resultados de salida.

A pesar de sus bondades, hay que mencionar como dificultades que para algunos problemas geotécnicos tales como los análisis de estabilidad de taludes, serían necesarios programas adicionales especiales para el MCS. Es más, para obtener una confiabilidad real, el modelo necesitaría un gran número de simulaciones. En la práctica es demasiado lento para los cálculos informáticos cotidianos, especialmente para los códigos de elementos finitos. En este trabajo se busca, por consiguiente, presentar enfoques alternativos al MCS que requieran sólo una cantidad limitada de cálculos.

1) Modelo de estudio

Cuando un material es sometido a esfuerzos o cargas, éste se deforma. Dicha deformación se manifestará en un cambio de la forma (distorsión) o en un cambio de volumen. Mientras en algunos materiales esta deformación se presenta de inmediato, en otros la respuesta ocurrirá en un tiempo relativamente largo. En especial para suelos arcillosos, se tendrá este tipo de comportamiento y siendo más concretos, cuando se habla de la deformación total vertical en la superficie de un depósito arcilloso generada por una carga, se hablará propiamente de asentamientos [8].

Por lo general, el asentamiento total en las arcillas $\delta(X_i)$ se desglosa en tres componentes:

- asentamientos inmediatos.
- asentamientos por consolidación (S_c).
- asentamientos por compresión secundaria.

Sobre cada uno de estos componentes sobrea-bunda la literatura técnica, pero con fines específicos se aludirá en este artículo particularmente a dos aspectos concernientes al literal b, es decir, (S_c).

- Esfuerzo de preconsolidación (historia de esfuerzos) y
- Establecer una ecuación para calcularlos.

En efecto, cuando una muestra de laboratorio o un depósito de arcilla se han sometido a un esfuerzo mayor que el que han soportado con anterioridad (esfuerzo de **preconsolidación** σ'_p), su respuesta puede resultar en cambios drásticos de la pendiente de los dos tramos de la curva de consolidación. Un diagrama de este tipo se muestra

esquemáticamente en la Fig. 3, donde se distingue al tramo más plano como una sección de recompresión y el más empinado como una sección de compresión virgen.

Como se verá más adelante, por las características geológico-geotécnicas del terreno en estudio, interesará la condición (a) para suelos sobreconsolidados, en cuyo caso se tiene la siguiente fórmula para evaluar el asentamiento por consolidación en un estrato de espesor H_0 :

$$\text{Si } \sigma'_{v0} + \Delta\sigma \leq \sigma'_p; S_c = H_0 \left[\frac{C_r}{1 + e_0} \right] \cdot \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

siendo aquí C_r y e_0 las variables de mayor interés.

Abordando el problema planteado en este estudio, a partir de investigaciones recientes sobre la variación de los parámetros de compresibilidad del subsuelo en la Ciudad Universitaria de Bogotá [9][10], tanto en área como en profundidad, se tuvo acceso a una base de datos muy robusta que muestra tendencias de comportamiento muy bien definidas en los primeros veinte metros de profundidad (-20 m). Esto es:

- Suelo altamente sobreconsolidado.
- Nivel freático a (-5) metros.
- Dos volúmenes homogéneos en cuanto a propiedades geotécnicas se refiere: volumen

1 entre 0 metros y -6 metros y volumen 2 entre -6 metros y -20 metros.

- Para la determinación de la carga se tomó en cuenta el estudio de suelos para una edificación de gran envergadura emplazada recientemente [11].
- Dada la geometría del cimiento tipo (3m x 4m), se asume una profundidad de influencia para los esfuerzos de (-8) metros.
- A pesar de que los sitios de exploración se encuentran en un perímetro muy cercano, se definieron zonas adyacentes con radios menores a los 200 metros de separación, para enfatizar la alta variabilidad de las propiedades del terreno, tal y como lo muestra la Fig. 4.

Partiendo de estas suposiciones, se plantea en la Fig. 5 la configuración de geometría, carga, estratos y especialmente, las que serán las variables aleatorias a estudiar.

Considerando los elementos expuestos hasta ahora, se llega a la función de comportamiento:

$$S_c = H_0 \left[\frac{C_{r1}}{1 + e_{01}} (a + b + c) + \frac{C_{r2}}{1 + e_{02}} (d) \right] \quad (5)$$

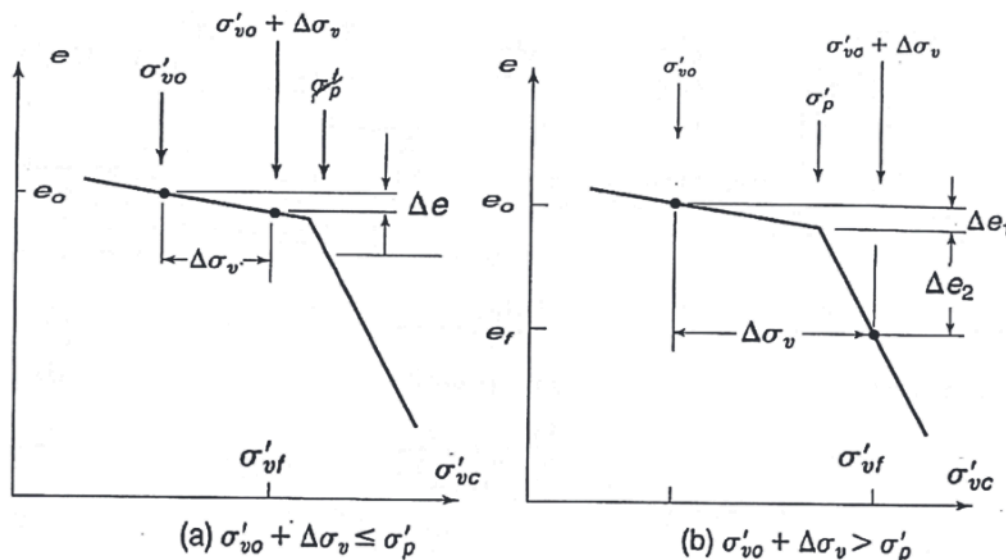


Fig. 3. Influencia de σ'_p en el cálculo de deformaciones [3].

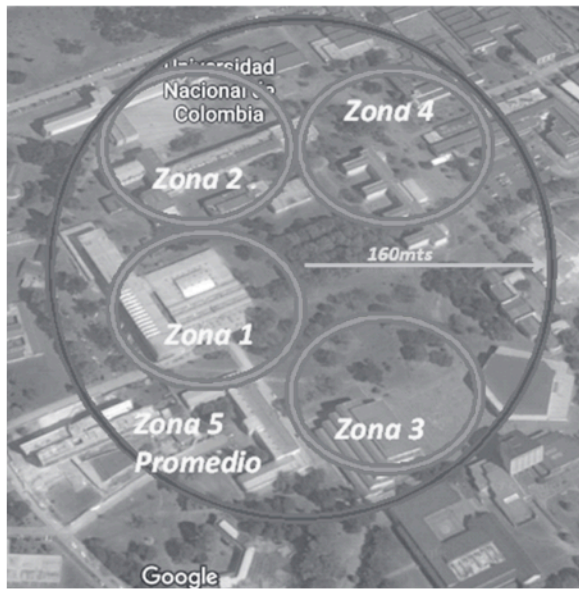


Fig. 4. Zonas seleccionadas para evaluación de $S(c)$ [Google Maps 2016].

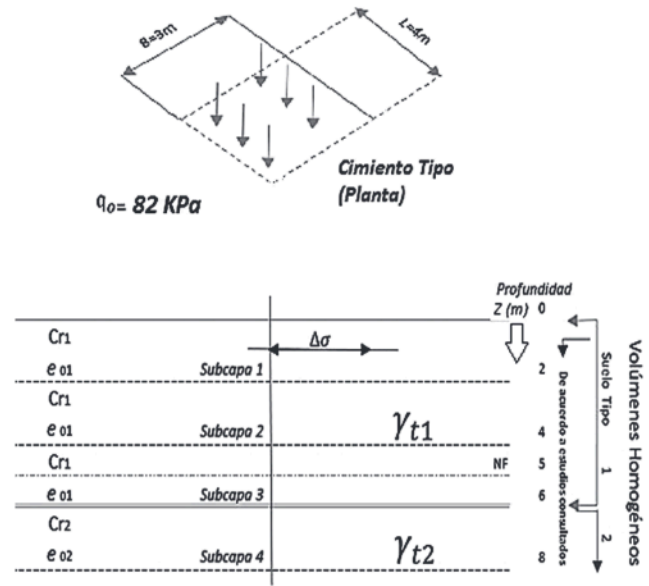


Fig. 5. Modelo de estudio que alimentará las rutinas de cálculo para evaluar S_c .

Donde a , b , c y d quedan definidos por

$$a = \text{Log} \frac{\sigma'_{01} + \Delta\sigma_1}{\sigma'_{01}}; b = \text{Log} \frac{\sigma'_{02} + \Delta\sigma_2}{\sigma'_{02}}; c = \text{Log} \frac{\sigma'_{03} + \Delta\sigma_3}{\sigma'_{03}}; d = \text{Log} \frac{\sigma'_{04} + \Delta\sigma_4}{\sigma'_{04}} \quad (6)$$

Y se discriminan los siguientes tipos de variables en la función de comportamiento. Tabla 1.

Tabla 1. Variables aleatorias y determinísticas en la función de comportamiento.

Variable	Tipo
$C_{r1}, e_{01}, C_{r2}, e_{02}$	Aleatoria
$\gamma_{ti}, N, F, B, L, \sigma_{0i}, \Delta\sigma_i$	Determinística

No debe sorprender la presencia de γ_{ti} y σ_{0i} en la lista de variables determinísticas, ya que como lo argumenta la literatura especializada y los estudios citados previamente, el peso unitario y las dimensiones del cimiento imprimen un aporte mínimo a la incertidumbre en el cálculo de asentamientos.

III. SISTEMATIZACIÓN DEL PROCESO

Cada una de las hipótesis anteriores ha permitido llegar finalmente a la construcción de una función de comportamiento (5) con variables aleatorias C_{r1}, e_{01} para el Volumen homogéneo 1 (tres primeras capas del modelo) y C_{r2}, e_{02} para el volumen homogéneo 2 (última capa del modelo), de acuerdo con la Fig. 5. Se procederá entonces a enumerar la secuencia de actividades a seguir, en el programa Excel, en aras de implementar la evaluación de μ y c.o.v. para el asentamiento esperado por consolidación:

1. Cálculo de valores promedio y desviación estándar de cada una de las variables que intervienen en (5) y (6). Para las variables que no son aleatorias, en el modelo sólo interesará su promedio. La información corresponde a la base de datos consultada.

- Habiendo definido una carga de diseño y un modelo para su transferencia a los estratos del subsuelo, se evalúa la ecuación de comportamiento en los valores promedio y se precisará cuál es el asentamiento por consolidación (determinístico).
- Para el método FOSM y con la ayuda de las derivadas parciales pertinentes, se encontrará el valor promedio y la desviación estándar de los asentamientos esperados.
- La técnica de los estimativos puntuales calculará 16 diferentes combinaciones de las variables que fueron escogidas como aleatorias (cuatro en total). Como se expuso en el capítulo precedente, esta técnica asigna un peso a cada uno de los resultados de las 16 iteraciones (2^4) que se discriminan con la notación $x_i \pm \sigma_i$, y entrega también un estimado para el valor promedio y la desviación estándar de los asentamientos esperados.
- Finalmente, se aplica el método de Monte Carlo con diferente número de iteraciones, que van desde 5 hasta 100,000. Para cada una de las variables aleatorias, se hace la generación de números aleatorios distribuidos normalmente y lognormalmente, con los cuales se obtienen miles de valores de asentamiento. El resultado de estas operaciones se convierte en un valor promedio y una desviación estándar. Se graficará la tendencia de estos últimos conforme al número de asentamientos aleatorios generados.
- Esta serie de pasos se repetirá para cinco conjuntos diferentes de datos pertenecientes a zonas contiguas del Campus Universitario, y que darán lugar a un balance de cuán importante es la variabilidad de las propiedades del terreno incluso en zonas adyacentes entre sí.

La Fig. 6 representa mediante un diagrama de flujo el proceso llevado a cabo.

IV. RESULTADOS

Al revisar el coeficiente de variación del asentamiento esperado (c.o.v.) calculado con los dife-

rentes métodos, se observa que las denominadas zona 1 y zona 2 son las de mayor y menor variación respectivamente, a pesar de su notable cercanía (Fig. 7).

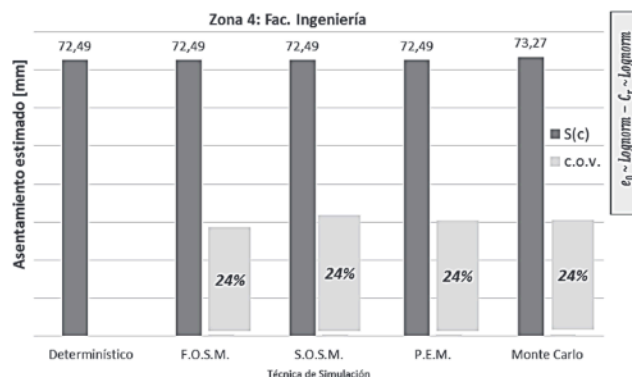


Fig. 7. Comparación de resultados entre dos zonas aledañas.

La etiqueta e_0 Lognormal y C_r Lognormal, hacen referencia al tipo de distribución empleada en la generación de números aleatorios, en la técnica MCS. Por otro lado, para las técnicas alternativas al Método de Monte Carlo, en todas las zonas de estudio pueden apreciarse que el algoritmo básico de la Serie de Taylor arroja el menor coeficiente de variación para los asentamientos esperados.

Así mismo, en general se observó que para zonas de mayor variación de las variables aleatorias, se necesita un mayor número de iteraciones en el MCS para lograr una convergencia de μ y σ_x ; como ejemplo, para la zona 1 (Fig. 8) fueron necesarias casi 50,000 iteraciones para converger a un valor de μ . Para la zona 4 bastaron cerca de 10,000 (Fig. 9).

Como resultado relevante de los numerosos cálculos llevados a cabo para cada zona de estudio y cada combinación de distribución de probabilidad, C_r y e_0 , pudo apreciarse que la distribución que mejor se ajustaba al comportamiento aleatorio de la función de comportamiento $S(c)$, es la función Lognormal, puesto que, como lo deja ver a manera demostrativa la Fig. 10 para la zona 1, se ajusta mejor que la comúnmente usada función Normal. Las notas junto a la curva CDF distinguen el comportamiento de la curva empírica y las dos aproximaciones con las distribuciones de probabilidad teóricas.

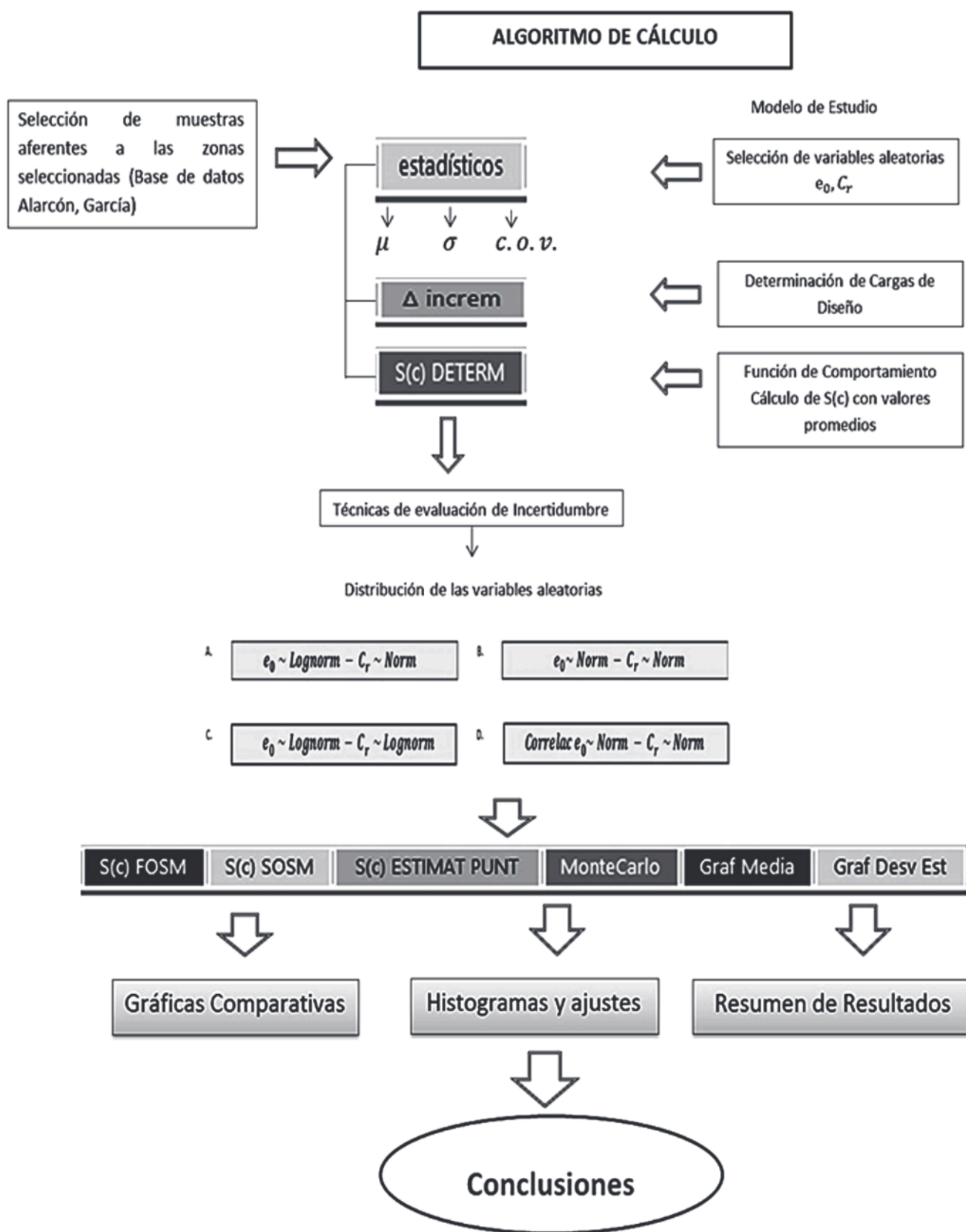


Fig. 6. Secuencia de actividades y algoritmo de cálculo en instrumento de aplicación.

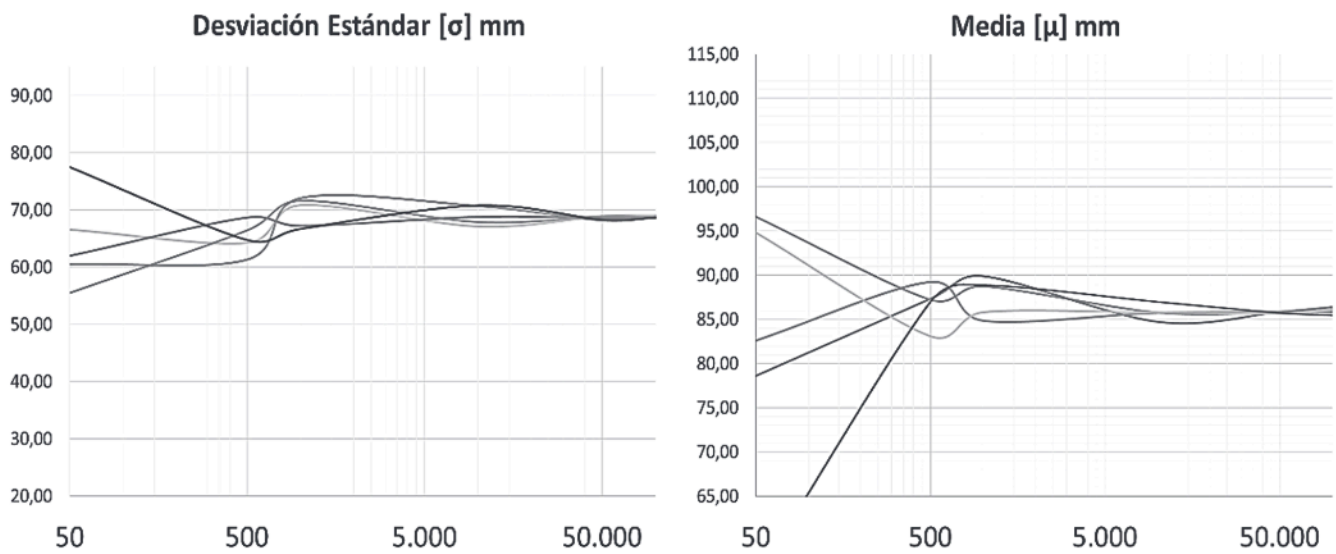
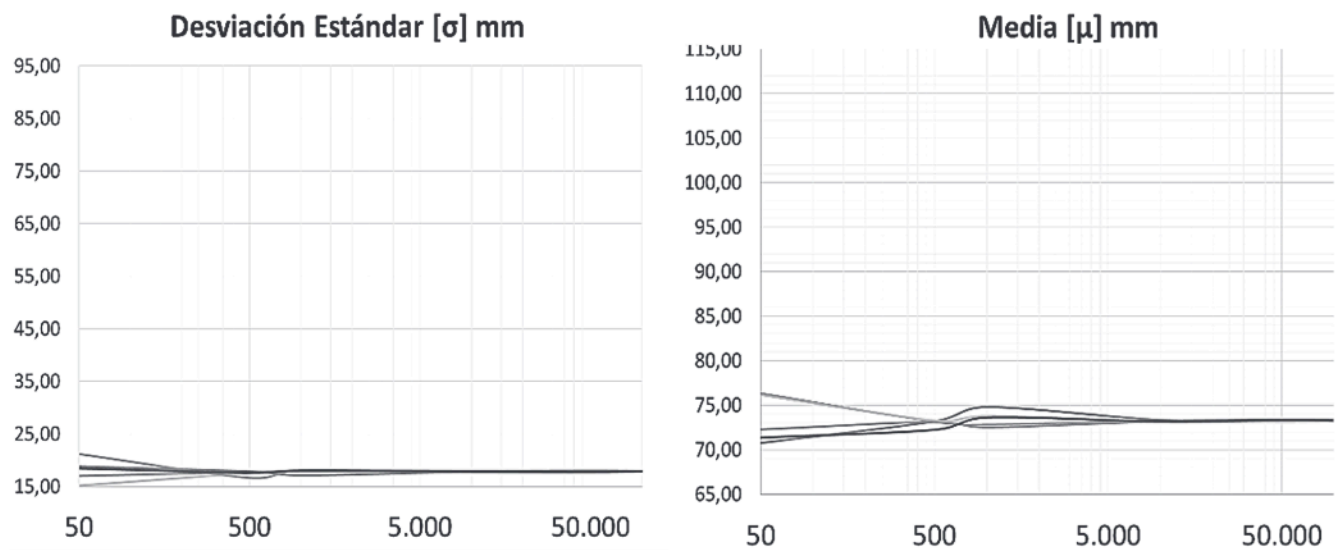
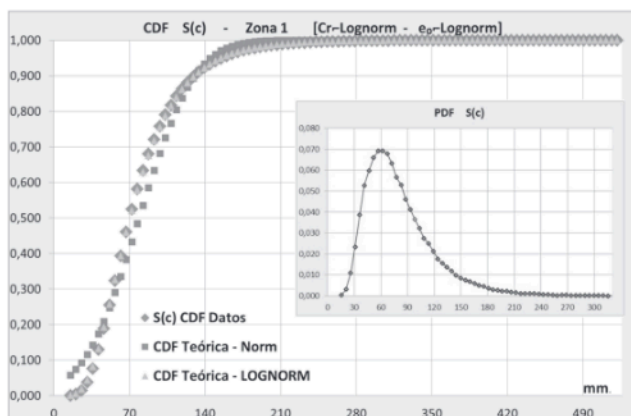

Fig. 8. Variación de σ_x y μ_x vs. n en el M.C.S. - Zona 1 -.

Fig. 9. Variación de σ_x y μ_x vs. n en el M.C.S. - Zona 4 -.


Fig. 10. Curva de ajuste a la función de comportamiento - Zona 1 -.

Con este marco de referencia y con la ayuda de la Fig. 9, se calculan las probabilidades de falla indicadas en la tabla 2. Para tener un orden de magnitud en estas operaciones, se asumirá un asentamiento elástico de la misma proporción que $S(c)$, lo cual es un criterio bastante conservador para este tipo de suelos. Entonces $\delta(X_i) = 2 * S(c)$ y la ecuación (2) se convertirá en:

$$P_f = P(s(c)) > 150 \text{ mm} \quad (7)$$

Tabla 2. Probabilidad de falla para las zonas de mayor y menor variación en $S(c)$.

Zona	Distribución $S(c)$	P_f [porcentaje]
1	Lognormal	0.025
4	Lognormal	0.018

V. CONCLUSIONES

Desde los primeros resultados obtenidos con la aplicación de la metodología y el algoritmo computacional propuesto en esta investigación, se puede apreciar la importante variabilidad de los parámetros geotécnicos al evaluar $S(c)$. Al obtener un rango de variación muy amplio –expresado en términos de *c.o.v.*– es vital revisar con gran cuidado los mapas de zonificación que se utilicen para los diseños geotécnicos.

Si bien es cierto que aquí se hicieron simplificaciones importantes en cuanto al modelo de estudio y la ecuación para el cálculo de la deformación del suelo, hay otras variables que no aportan significativamente a la incertidumbre, como la carga aplicada y las dimensiones del cimientado. De igual manera, aunque existen otras distribuciones de probabilidad como Gamma y Beta, que en teoría reúnen unas condiciones más óptimas para describir problemas de deformación del terreno, dichas distribuciones requieren de un mayor número de parámetros y datos, justamente escasos en la prospección geotécnica. Por todo esto, se enfatiza en la importancia de hacer un balance entre la sofisticación de los procesos y las condiciones y la información disponible en la realidad.

El método de Monte Carlo aparece como una forma sofisticada de evaluar incertidumbres, para su posterior uso en el cálculo de probabilidades de falla. Si bien es cierto que un número óptimo de pasos para el problema de asentamientos fue de 100 mil iteraciones, este algoritmo permite su uso prácticamente en cualquier situación cotidiana.

Finalmente y a partir de los resultados obtenidos, vale la pena analizar si las restricciones de asentamiento admisibles, estipuladas en la NSR-10, realmente son un límite conveniente para las construcciones colombianas, y no por las probabilidades de falla tan pequeñas que se obtuvieron: más bien, en el sentido de que tales deformaciones pueden afectar sustancialmente la funcionalidad y seguridad de las instalaciones subterráneas de las edificaciones.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer la colaboración, asesoría y el inmenso interés por llevar a feliz térmi-

no esta investigación, por parte del ingeniero PhD. Carlos Eduardo Rodríguez Pineda. A los ingenieros Guillermo Ávila y Gloria Beltrán de la Unidad Académica de Geotecnia UN, por su evaluación y revisión, al igual que al ingeniero Diego Grajales, por sus profesionales aportes. El soporte y apoyo permanente de Nataly García Quintero, alimentaron de conocimientos y esperanza este proyecto de principio a fin. A la señora Julia Suárez, por el valioso tiempo brindado en las etapas finales del trabajo. A Mario Esteban, Victoria y toda su maravillosa familia.

REFERENCIAS

- [1] M. Duncan. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 7th Spencer J Buchanan Lecture, 2000.
- [2] W. Kaggwa, M. Cheong, M. Jaksa. Assessment of the luck associated with settlement predictions that are based on elastic theory. *Department of C&E Engineering. The University of Adelaide*, 79-86, 2002.
- [3] R. Holtz. *An introduction to geotechnical engineering*. Pearson Education. New Jersey, 2011.
- [4] R. P. Peck, W. E. Hanson, T. H. Thornburn. *Foundation Engineering*; 2nd Ed., Wiley, New York, 1984.
- [5] C. Russelli. *Probabilistic methods applied to the bearing capacity problem*. Universidad de Stuttgart, Alemania, 2008.
- [6] G. Fenton, D. V. Griffiths. *Risk assessment in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons. New Jersey, 2008.
- [7] *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Título H- Estudios Geotécnicos*. Colombia, 2010.
- [8] M. Budhu. *Soil mechanics and foundations*. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. 3rd edition. USA, 2011.
- [9] Alarcón, Parra et al. *Zonificación por efectos locales del campus de la Universidad Nacional de Colombia – sede Bogotá*. Oficina Nacional de Planeación, 2007.
- [10] M. García. *Análisis geoestadístico y probabilístico de la compresibilidad de un depósito lacustre*. Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [11] G. Tapia. *Estudio de Suelos*. Facultad de Enfermería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2015.