

USO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CAPAS DE SUELOS VOLCÁNICOS CON EL ENSAYO DEL CONO DE PENETRACIÓN EN LOS TERRENOS DE LA UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, MONTES DE OCA, SAN JOSÉ, COSTA RICA

USE OF STATISTICAL METHODS TO IDENTIFY LAYERS OF VOLCANIC SOILS WITH THE CONE PENETRATION TEST IN A PLACE LOCATED WITHIN UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, MONTES DE OCA, SAN JOSÉ, COSTA RICA

Rolando Mora

Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica,
Apdo. 214-2060
rmorach@gmail.com

(Recibido: 15/12/2012 ; aceptado: 26/11/2013)

ABSTRACT: Univariate (RI yT) and multivariate (D^2) statistical methods have been applied to set limits of layers on a CPTU sounding, held in soils composed of fills and volcanic deposits. The results include layered models that consider different resolutions and reduced application subjective criteria for establishing the boundaries of the layers. It is considered that the index D^2 provides more accurate results.

Keywords: Geotechnics, volcanic soils, soil stratigraphy, applied statistics, applied geology.

RESUMEN: Se han aplicado métodos estadísticos univariados (RI yT) y multivariados (D^2) para establecer los límites de capas en un sondeo CPTU, realizado en suelos compuestos por rellenos y depósitos de origen volcánico. Los resultados incluyen modelos de capas de resoluciones diferentes y que consideran una aplicación reducida de criterios subjetivos para establecer los límites de las capas. Se considera que el índice D^2 brinda los resultados más acertados.

Palabras clave: Geotecnia, suelos volcánicos, estratigrafía de suelos, estadística aplicada, geología aplicada.

INTRODUCCIÓN

El ensayo del cono de penetración (CPT) realiza un registro de datos a intervalos muy cercanos y simultáneamente mide las señales de varios parámetros, como por ejemplo la resistencia a la penetración de la punta, la fricción lateral y la presión de poro. Al ser este instrumento una herramienta de adquisición de datos, la identificación de capas de suelos mediante métodos apropiados debe ser una prioridad. Muchas veces este tipo de identificación se realiza mediante inspección visual de los perfiles de datos y estudiando la variación de la Relación de Fricción (Rf), que relaciona la fricción lateral con la resistencia de la punta.

Los valores de R_f en conjunto con la resistencia de la punta se usan para predecir el tipo de suelo encontrado a partir de gráficos previamente establecidos (Robertson & Campanella, 1986) (Fig. 1). Antes de utilizar este gráfico se deben establecer las capas, y en ciertos casos una inspección visual no es suficiente para obtener una estimación bastante exacta de los límites de las mismas (Wickremesinghe & Campanella, 1991). Estos mismos autores indican que la identificación apropiada de las capas es esencial para la toma de decisiones en lo que respecta a diseño y construcción, por lo que una estimación subjetiva puede conducir a resultados erróneos, especialmente en los casos en que las diferencias entre capas no son muy aparentes. También establecen que el gráfico de clasificación de suelos es una buena herramienta, en la medida en que las distintas capas sean determinadas con precisión y en este sentido, los métodos estadísticos brindan muy buenos resultados.

Los métodos estadísticos permiten decidir el número de capas diferentes, inspeccionando la estadística de las sub-regiones dentro de la capa principal, es decir, si el diseño requiere más detalle y sofisticación, se puede escoger un número de capas basado en límites menos críticos, mientras que para un diseño no muy exigente, el número de capas se puede basar en los picos más altos del perfil estadístico (Wickremesinghe & Campanella, 1991).

De acuerdo con Wickremesinghe & Campanella (1991) se debe usar una “ventana” de ancho fijo (W_D), examinando la porción de datos expuesta en ella misma, donde su punto central d_0 se considera como un límite potencial. La “ventana” debe moverse a lo largo del perfil de datos, en pasos iguales al intervalo de muestreo y en cada punto d_0 se deben examinar las dos series de datos (una arriba y otra abajo de d_0), para establecer sus diferencias con el uso de procedimientos estadísticos como el Coeficiente de Correlación Intraclase (RI) o la estadística T para datos de una variable, y D^2 para datos de variables múltiples (Wickremesinghe & Campanella, 1991). Según los mismos autores, la variación de las estadísticas se grafica en función de la profundidad, obteniéndose los límites de capas óptimos mediante los picos que presenten. También indican que si solo se desea establecer las capas más disímiles, se deben escoger los datos d_0 con los valores más altos, sin embargo, si se desea una identificación de capas más elaborada, se deben seleccionar los datos con valores moderadamente altos.

Métodos estadísticos utilizados con datos de una variable

Relación T

A cada lado del centro d_0 de la ventana, habrán dos muestras, Ω_1 y Ω_2 . Sean (\bar{Q}_1) y (\bar{Q}_2) las medias de las muestras y σ_1^2 y σ_2^2 las varianzas con tamaños de muestras n_1 y n_2 respectivamente, para cada uno de los parámetros principales del CPT.

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{(n_1 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} (Q_i - \bar{Q}_1)^2$$

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{(n_2 - 1)} \sum_{i=1}^{n_2} (Q_i - \bar{Q}_2)^2$$

La varianza combinada intraclase γ_w^2 está dada por:

$$\gamma_w^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + I} \sigma_1^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 + I} \sigma_2^2$$

La relación T fue definida por Webster & Beckett (1968) como:

$$T = \frac{\overline{Q}_1 - \overline{Q}_2}{\gamma_w} \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}}$$

Para obtener una diferenciación óptima entre dos capas adyacentes, se requiere:

- que la diferencia entre las medias ($\overline{Q}_1 - \overline{Q}_2$) sea máxima,
- que las varianzas individuales de los dos segmentos σ_1^2 y σ_2^2 sean relativamente bajas, es decir, la varianza combinada intraclase será apreciablemente baja,

Según Wickremesinghe & Campanella (1991) si se consideran los anteriores requerimientos, la relación T necesariamente debe presentar un pico en los límites potenciales de capas del perfil.

Coefficiente de Correlación Intraclase

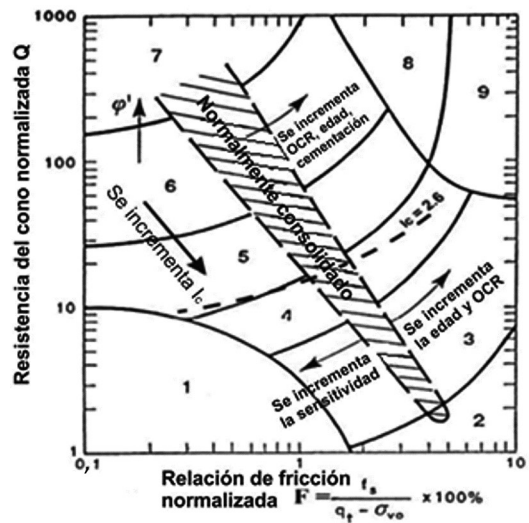
Webster & Beckett (1968) definen la varianza de la muestra combinada como:

$$\gamma_b^2 = \frac{I}{n_1 + n_2 - I} \sum_{i=1}^{n_1+n_2} (Q_i - \overline{Q})^2$$

donde \overline{Q} es la media de todos los datos Q_i con $i = 1, 2, \dots, (n_1 + n_2)$.

El Coeficiente de Correlación Intraclase, RI, está dado por la expresión (Wickremesinghe & Campanella, 1991):

$$RI = \frac{\gamma_b^2}{\gamma_b^2 + \gamma_w^2}$$



Zona	Tipo de suelo	I_c
1	Sensitivo de grano fino	N/D
2	Suelos orgánicos (turbas)	> 3,6
3	Arcillas (arcilla limosa a arcilla)	2,95 – 3,6
4	Mezclas de limos (limo arcilloso a arcilla limosa)	2,60 – 2,95
5	Mezclas de arenas (arena limosa a limo arenoso)	2,05 – 2,6
6	Arenas (arena limpia a arena limosa)	1,31 – 2,05
7	Arena gravosa a arena densa	< 1,31
8	Arena muy rígida a arena arcillosa	N/D
9	Suelos de grano fino muy rígidos	N/D

Fig. 1: Gráfico normalizado de clasificación de suelos (modificado de ASTM, 2012).

De la ecuación anterior se desprende que (Wickremesinghe & Campanella, 1991):

- si cada muestra, Ω_1 y Ω_2 , es absolutamente uniforme, entonces γ_w^2 es igual a cero y RI alcanza su máximo valor de una unidad,
- si las diferencias entre las muestras no son significativas, entonces γ_b^2 y RI no son significativamente superiores a cero
- RI siempre se ubicará entre estos dos extremos y un valor relativamente alto indicará la presencia de un límite de capa en ese punto.

Método estadístico utilizado con registros multivariantes

En el ensayo CPTU se registran datos en varios canales, siendo los más importantes la resistencia del cono, la fricción lateral y la presión de poro. Cada uno de estos parámetros exhibe una clase de comportamiento distinto en los diferentes tipos de suelos, por lo tanto se requiere un método que considere todos los parámetros simultáneamente y que sea eficiente y preciso, estas exigencias las satisface una función discriminante: la estadística D^2 .

Estadística D^2

Se tiene una muestra Ω_1 de m variables, la que forma un grupo de puntos en el espacio m -dimensional; también se tiene otra muestra Ω_2 que se puede describir similarmente por las mismas m variables en el espacio m -dimensional. La determinación de un plano $(m-1)$ -dimensional que separe los dos grupos de puntos es la función discriminante D^2 , que es la distancia entre las medias multivariantes de los espacios de muestreo bidimensionales Ω_1 y Ω_2 , lo que implica que cuanto mayor sea el valor de D^2 , más distintas serán las dos muestras (Rao, 1965; Harbaugh & Merriam, 1968).

La estadística D^2 está dada por la siguiente expresión (Wickremesinghe & Campanella, 1991):

$$D^2 = \{\overline{Q}_1 - \overline{Q}_2\}' W^{-1} \{\overline{Q}_1 - \overline{Q}_2\}$$

donde:

$$\{Q_1 - Q_2\} = \begin{pmatrix} \Delta q \\ \Delta f \\ \Delta u \end{pmatrix}$$

Es la matriz columnar $(m \times 1)$ de las diferencias entre las medias de las variables en las dos muestras. $\{W\}$ es la matriz combinada de varianza-covarianza de las muestras Ω_1 y Ω_2 .

Si se tiene una serie de n_1 datos a partir de Ω_1 y n_2 datos a partir de Ω_2 , estas se pueden describir con las siguientes variables:

q_1, f_1, u_1 serían la resistencia, la fricción y la presión de poro en Ω_1 ,

q_2, f_2, u_2 serían la resistencia, la fricción y la presión de poro en Ω_2 ,

q_1, f_1, u_1 , son las medias en la muestra Ω_1 ,

q_2, f_2, u_2 son las medias en la muestra Ω_2 ,

$\sigma_{q_1}^2, \sigma_{f_1}^2, \sigma_{u_1}^2, \sigma_{q_2}^2, \sigma_{f_2}^2, \sigma_{u_2}^2$ son sus varianzas,

Las diferencias de las medias de las dos muestras están dadas por:

$$\Delta q = q_1 - q_2$$

$$\Delta f = f_1 - f_2$$

$$\Delta u = u_1 - u_2$$

Las covarianzas están dadas por:

$$\sigma_{q_1 f_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} q_{1i} f_{1i}}{n_1} - \frac{\sum_{i=1}^{n_1} q_{1i} \sum_{i=1}^{n_1} f_{1i}}{n_1^2}$$

$$\sigma_{q_1 u_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} q_{1i} u_{1i}}{n_1} - \frac{\sum_{i=1}^{n_1} q_{1i} \sum_{i=1}^{n_1} u_{1i}}{n_1^2}$$

$$\sigma_{f_1 u_1}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} f_{1i} u_{1i}}{n_1} - \frac{\sum_{i=1}^{n_1} f_{1i} \sum_{i=1}^{n_1} u_{1i}}{n_1^2}$$

$$\sigma_{q_2 f_2}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} q_{2i} f_{2i}}{n_2} - \frac{\sum_{i=1}^{n_2} q_{2i} \sum_{i=1}^{n_2} f_{2i}}{n_2^2}$$

$$\sigma_{q_2 u_2}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} q_{2i} u_{2i}}{n_2} - \frac{\sum_{i=1}^{n_2} q_{2i} \sum_{i=1}^{n_2} u_{2i}}{n_2^2}$$

$$\sigma_{f_2 u_2}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_2} f_{2i} u_{2i}}{n_2} - \frac{\sum_{i=1}^{n_2} f_{2i} \sum_{i=1}^{n_2} u_{2i}}{n_2^2}$$

Las varianzas ponderadas combinadas se expresan como:

$$F_q^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{q1}^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{q2}^2$$

$$F_f^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{f1}^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{f2}^2$$

$$F_u^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{u1}^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{u2}^2$$

De forma similar, las covarianzas ponderadas combinadas se expresan como:

$$F_{qf}^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{q1f1}^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{q2f2}^2$$

$$F_{qu}^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{q1u1}^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{q2u2}^2$$

$$F_{fu}^2 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{f1u1}^2 + \frac{n_2}{n_1 + n_2 - 1} \sigma_{f2u2}^2$$

La matriz de varianza-covarianza fue formulada por Harbaugh & Merriam (1968) como:

$$\{W\} = \begin{pmatrix} F_q^2 & F_{qf}^2 & F_{qu}^2 \\ F_{qf}^2 & F_f^2 & F_{fu}^2 \\ F_{qu}^2 & F_{fu}^2 & F_u^2 \end{pmatrix}$$

De la misma manera que con los métodos de una variable, en este caso la ventana se mueve a lo largo del perfil, con el punto medio d_0 separando las dos muestras y para cada d_0 se calcula D^2 y este se grafica en función de la profundidad. Los picos del gráfico ilustran claramente las mejores posiciones de los límites de las capas; si solamente se requieren algunos límites, se seleccionan los puntos en los que se dan los valores más altos de D^2 , si se requieren más capas, se pueden utilizar los valores menos críticos de D^2 (Wickremesinghe & Campanella, 1991).

APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS EN UN PERFIL CPTU

El sondeo CPTU se realizó en un sitio dentro de la propiedad de la Universidad de Costa Rica, en San Pedro de Montes de Oca (Fig. 2), en este lugar se construirán nuevas edificaciones del *Alma Mater*. En la figura 3 se aprecian los registros del sondeo en función de la profundidad, de esta figura se puede establecer que la diferenciación de la estratigrafía de suelos es difícil de realizar a simple vista y que se requieren técnicas que ayuden a resolver este problema.

Paralelamente a la realización de este sondeo, se ejecutó una prueba con el dilatómetro Marchetti, la cual se ha utilizado para calcular la distribución de los esfuerzos total, neutro y efectivo en función de la profundidad (Fig.4), este ensayo es de gran ayuda a la hora de establecer la estratigrafía del sitio, como se verá más adelante. La figura 4 permite apreciar que hay capas con mayor o menor presión de poro, pero esto no es criterio suficiente para definir las.

Resultados del cálculo de RI y T

A cada una de las mediciones del ensayo CPTU se le ha aplicado el índice RI y el T, utilizando una ventana de 1.0 m de largo, implementada en una hoja de cálculo del programa Excel 2010.

En la figura 5, 6 y 7 se aprecian los resultados obtenidos de esta aplicación para cada uno de los parámetros medidos durante el sondeo CPTU. Si para la resistencia a la penetración del cono se consideran los picos de RI mayores o iguales a 0,8 y los picos de T fuera del rango de -30 a 30 (Fig. 5), se pueden establecer los límites de capa tentativos del cuadro 1. De acuerdo con este resultado y considerando únicamente la resistencia a la penetración del cono, el RI discrimina seis capas y el T nueve, coincidiendo en un 67% de los casos.

En el caso de la fricción lateral medida durante el ensayo (Fig. 6) se han considerado los

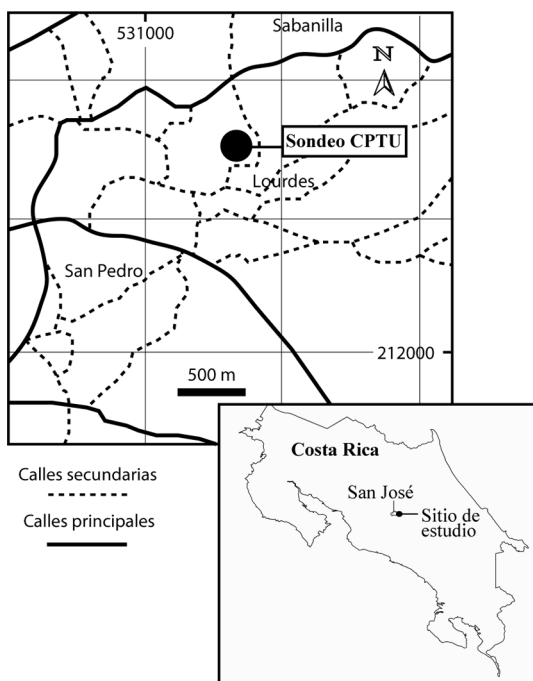


Fig. 2: Localización del sondeo CPTU en los terrenos de la Universidad de Costa Rica.

picos de RI mayores o iguales a 0,8 y los picos de T fuera del rango de -400 a 400, de manera que se establecen los límites de capas tentativas del cuadro 1, donde se aprecia que el RI discrimina tres capas y el T ocho, es decir, coinciden en un 37.5% de los casos.

En el caso de la presión de poro (Fig. 7) se consideraron los picos de RI mayores o iguales a 0,8 y los picos de T fuera del rango de -1000 a 1000, de manera que se establecen los límites de capas tentativas del cuadro 1, donde se aprecia que el RI discrimina cuatro capas y el T cinco, es decir, coinciden en un 12.5% de los casos.

Ahora que se cuenta con un modelo de capas, se procede a calcular la relación de fricción normalizada y la resistencia normalizada del cono (Fig.1) y se grafican los valores correspondientes a cada capa, definida en el modelo anteriormente establecido (Fig. 8). Al interpretar la figura anterior se debe adoptar algún criterio, en este caso se han evaluado los porcentajes de puntos cayendo en cada ámbito del gráfico en

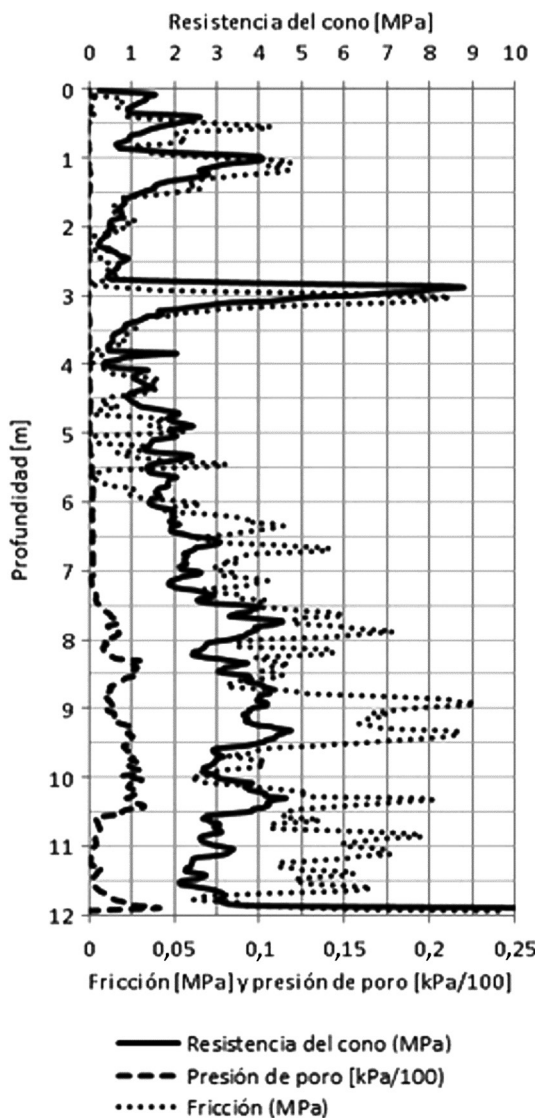


Fig. 3: Resultados del ensayo CPTU.

función de la capa analizada (Cuadro 3) y se propone la asignación de nomenclatura de acuerdo con el cuadro 4.

En general, el modelo discrimina claramente una capa de relleno, caracterizada por la dispersión de los puntos en la figura 8, el resto de las capas se encuentran circunscritas a ámbitos bien definidos. La versión gráfica del modelo final se presenta en la figura 9, acompañada de la distri-

Cuadro 1

Límites de capa tentativos para la resistencia a la penetración del cono, fricción lateral y presión de poro, de acuerdo con los índices RI y T

Resistencia a la penetración del cono		Fricción lateral		Presión de poro	
RI	T	RI	T	RI	T
Profundidad [m]	Profundidad [m]	Profundidad [m]	Profundidad [m]	Profundidad [m]	Profundidad [m]
ND	1,88	1,48	1,48	ND	2,62
4,62	4,62	ND	2,06	ND	3,26
ND	6,44	ND	3,7	ND	3,98
7,46	7,46	ND	4,12	5,3	5,3
8,5	8,5	ND	6,14	ND	6,14
9,54	9,54	ND	7,48	7,5	ND
10,04	10,04	8,78	8,78	9,2	ND
10,52	10,52	9,54	9,54	10,54	ND
ND	11,12	-	-	-	-

ND: capa no detectada

bución en profundidad de los esfuerzos, para así poder apreciar donde se presentan los límites de las capas.

Resultados del cálculo del D²

En cálculo del índice D2 se ha utilizado una ventana también de 1.0 m de largo y se ha utilizado la hoja de calculo del programa Excel 2010, los resultados obtenidos se observan en la figura 10. Para seleccionar los picos, es decir, los límites de capa, se ha establecido considerar los que se encuentren fuera del rango entre -40 y 40, con lo cual se obtiene el modelo de siete capas del cuadro 5. Es importante señalar que el índice D2 detecta de manera inequívoca la presencia del nivel freático a la profundidad de 5,3 m.

Con base en las capas definidas por este modelo, se grafican las mediciones normalizadas de la fricción y la resistencia del cono por capa (Fig. 11), se evalúan los porcentajes de puntos en cada ámbito definido en el gráfico (Cuadro 6) y se propone la asignación de nomenclatura de acuerdo con el cuadro 4.

Este modelo identifica un rellano de mayor espesor, el cual se puede dividir en cuatro partes bien diferenciadas por su ubicación en el gráfico de la figura 11, luego del relleno se establecen tres capas claramente delimitadas por su ubicación en los ámbitos de la figura 11. Finalmente, en la figura 12 se presenta gráficamente el segundo modelo, junto con la distribución de los esfuerzos en profundidad.

Si comparamos las figuras 9 y 12 se nota que el índice D2 logra discriminar un relleno de mayor espesor y cuatro capas dentro de este, incluyendo la capa de arcilla limosa establecida por el modelo basado en RI y T. Además, las capas de limo arenoso con algo de arcilla y limo arenoso del modelo basado en RI y T, es interpretada como una sola capa de limo arenoso con cantidad menor de arcilla por el modelo D2. Finalmente, en la parte más profunda del sondeo el modelo D2 discrimina dos capas donde el otro modelo solo identifica una capa.

Del uso de los dos modelos, se puede decir que el modelo basado en RI y T no elimina totalmente la subjetividad a la hora de establecer los límites de las capas, desde esta perspectiva, el modelo D² ofrece una alternativa menos subjetiva.

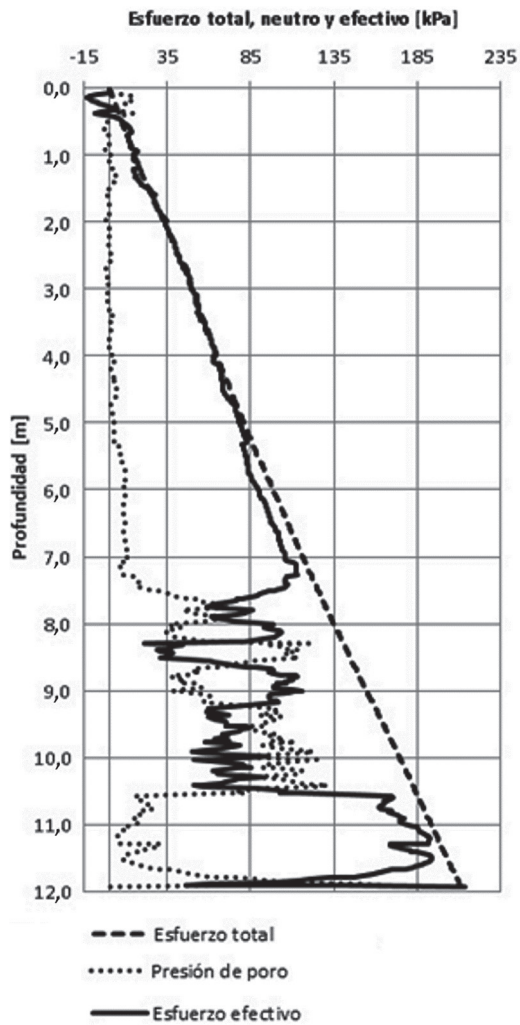


Fig. 4: Distribución de los esfuerzos total, neutro y efectivo en función de la profundidad.

Cuadro 2

Modelo de cinco capas con base en la aplicación de los índices RI y T a los parámetros medidos durante el sondeo CPTU

# de capa	Limite [m]	Espesor [m]
1	6,14	6,14
2	7,46	1,32
3	9,54	2,08
4	10,52	0,98
5	11,34	0,82

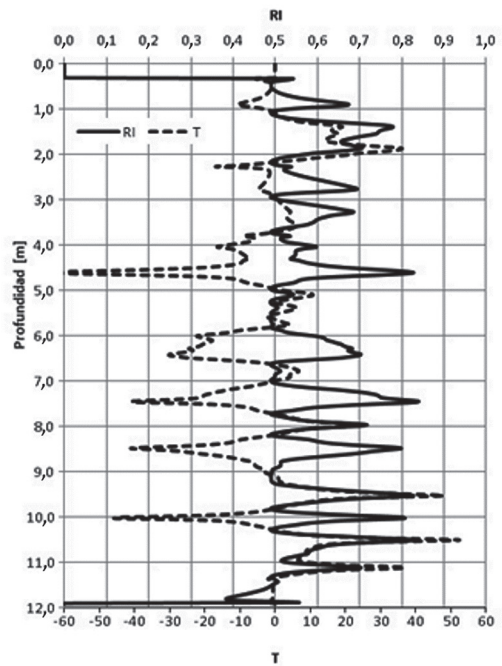


Fig. 5: Resultados de RI y T para la resistencia a la penetración del ensayo CPTU.

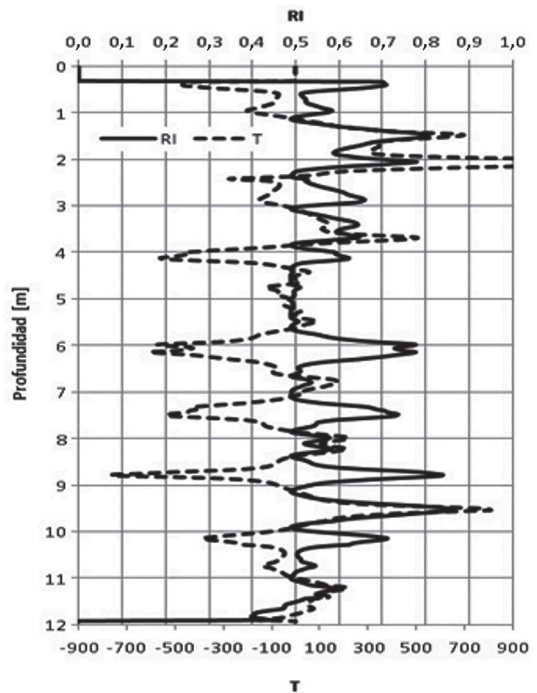


Fig.6: Resultados de RI y T para la fricción lateral del ensayo CPTU.

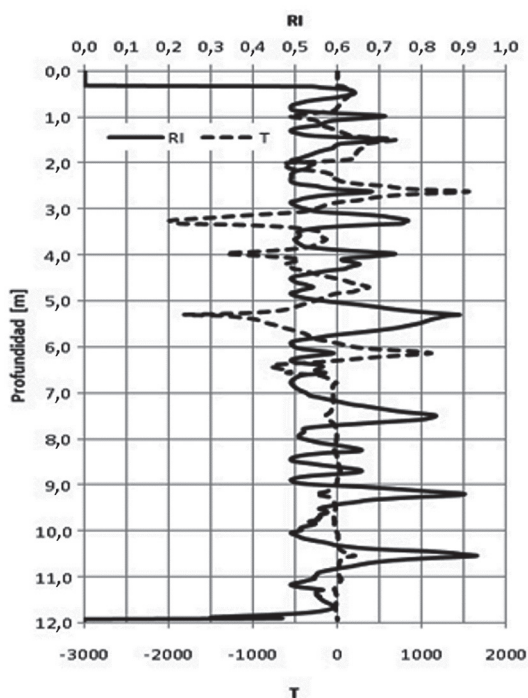


Fig. 7: Resultados de RI y T para la presión de poro del ensayo CPTU.

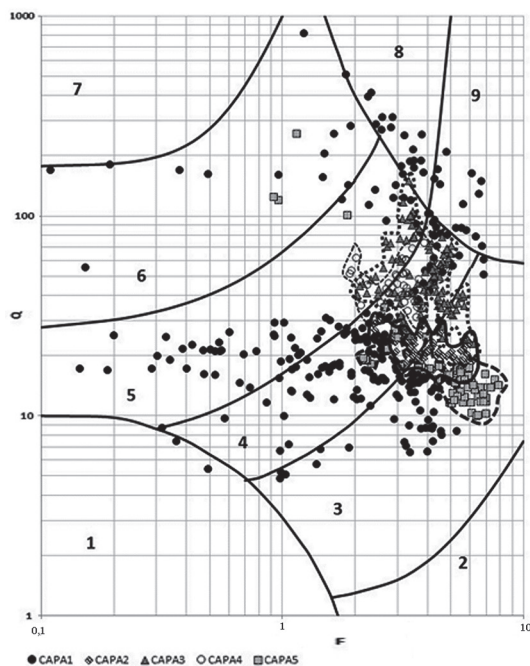


Fig. 8: Discriminación por ámbitos de los puntos pertenecientes a cada capa del primer modelo.

Cuadro 3

Evaluación de las capas de acuerdo con el número de puntos presentes en cada ámbito del gráfico de la figura 8

Suelo	Capa 1		Capa 2		Capa 3		Capa 4		Capa 5	
	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]
Sensitivo de grano fino	2	0,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Orgánico	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Arcilla	59	21,9	42	63,6	17	16,3	0	0,0	57	83,8
Limo	116	43,1	24	36,4	59	56,7	34	69,4	10	14,7
Arenas con finos	49	18,2	0	0,0	28	26,9	15	30,6	1	1,5
Arenas limpias	12	4,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Arena gravosa	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Suelos gruesos rígidos	18	6,7	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Suelos finos rígidos	13	4,8	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Total	269	100%	66	100%	104	100%	49	100%	68	100%
Clasificación:	Relleno		Arcilla limosa		Limo arenoso con algo de arcilla		Limo arenoso		Arcilla con algo de limo y trazas de arena	

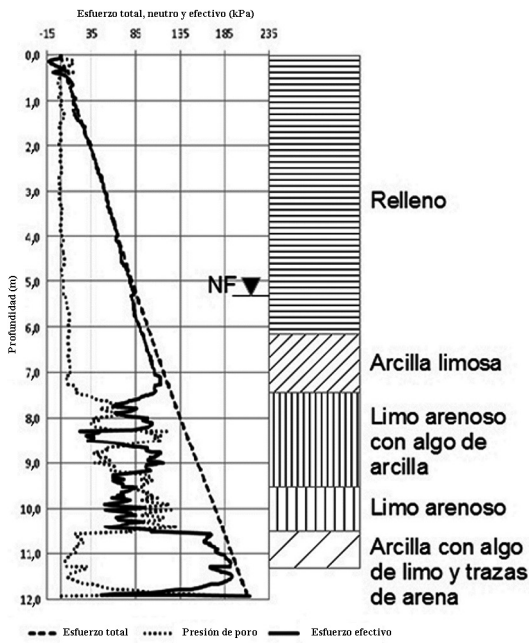


Fig. 9: Modelo de capas desarrollado mediante la utilización de los índices RI y T.

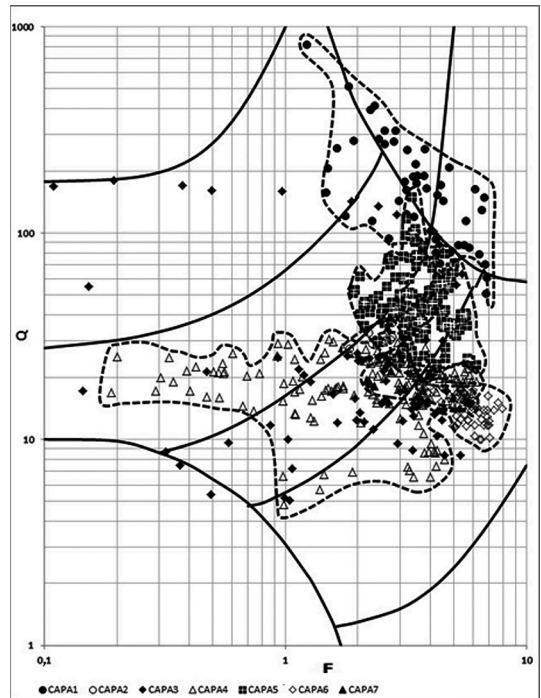


Fig. 11: Discriminación por ámbitos de los puntos pertenecientes a cada capa del segundo modelo.

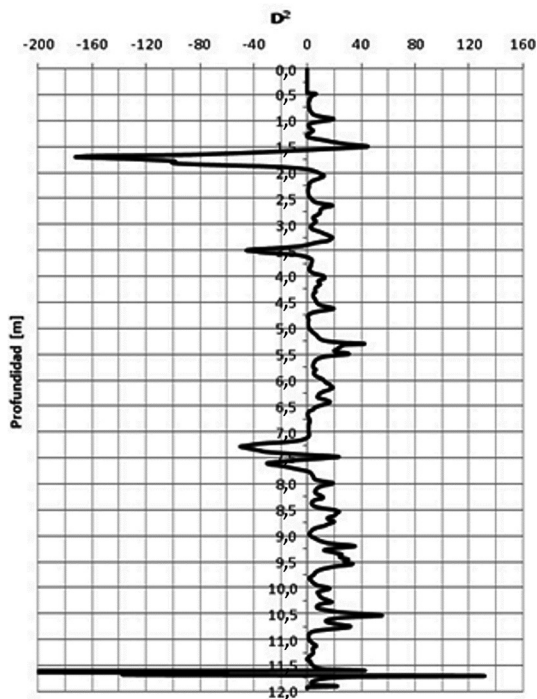


Fig. 10: resultados del cálculo del índice D^2 .

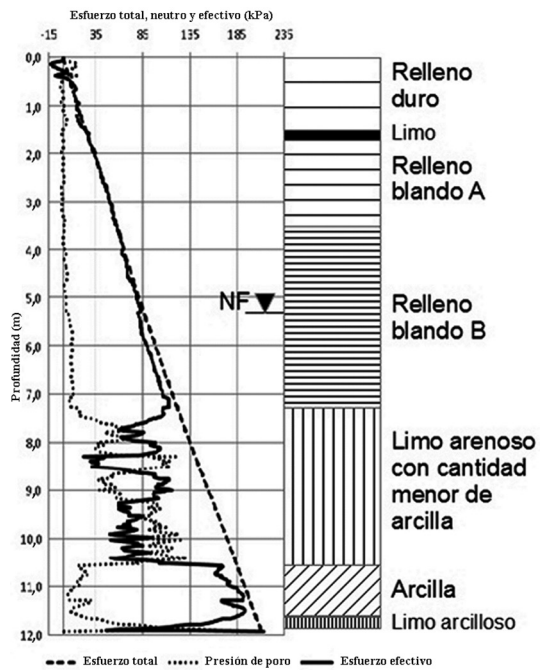


Fig. 12: Modelo de capas desarrollado mediante la utilización del índice D^2 .

Cuadro 6

Evaluación de las capas de acuerdo con el número de puntos presentes en cada ámbito del gráfico de la figura 11

Suelo	Capa 1		Capa 2: Limo		Capa 3		Capa 4		Capa 5		Capa 6		Capa 7	
	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]	# de puntos	[%]
Sensitivo de grano fino	0	0,0	0	0,0	2	2,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Orgánico	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Arcilla	2	3,4	0	0,0	22	26,5	75	42,9	19	11,7	54	100,0	3	25,0
Limo	11	19,0	10	100,0	45	54,2	67	38,3	101	62,0	0	0,0	9	75,0
Arenas con finos	9	15,5	0	0,0	7	8,4	33	18,9	43	26,4	0	0,0	0	0,0
Arenas limpias	5	8,6	0	0,0	7	8,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Arena gravosa	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Suelos gruesos rígidos	18	31,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Suelos finos rígidos	13	22,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Total	58	100%	10	100%	83	100%	175	100%	163	100%	54	100%	12	100%
Clasificación	Relleno duro		Limo		Relleno blando		Relleno blando		Limo arenoso con cantidad menor de arcilla		Arcilla		Limo arcilloso	

Cuadro 4

Propuesta para la asignación de nomenclatura de las capas

% de presencia en el ámbito	Nomenclatura
>= 40%	Constituyente principal
20-40%	Agregar sufijo: -oso,- osa
12-20%	Agregar: con algo de...
5-12%	Agregar: con cantidad menor de...
< 5%	Agregar: con trazas de...

Cuadro 5

Modelo de siete capas con base en la aplicación del índice D² a los parámetros medidos durante el sondeo CPTU

# de capa	Limite [m]	Espesor [m]
1	1,50	1,50
2	1,70	0,20
3	3,50	1,80
4	7,28	3,78
5	10,54	3,26
6	11,62	1,08
7	11,86	0,24

va para establecer los límites de las capas y una mayor resolución en el número de capas, pues se trata de un método multivariable.

CONCLUSIONES

Analizando los registros del sondeo CPTU en función de la profundidad, es claro que la diferenciación de la estratigrafía de suelos es difícil de realizar a simple vista y que se requieren técnicas que ayuden a resolver este problema.

La distribución de los esfuerzos total, neutro y efectivo en profundidad no es un criterio suficiente para establecer la estratigrafía del sitio de estudio, pero sirve como complemento a la hora de aplicar métodos estadísticos para lograr ese propósito.

Si se aplican los índices RI y T a los registros individuales de los parámetros medidos en el ensayo CPTU del sitio de estudio, se puede establecer un modelo de cinco capas, a partir de las coincidencias en la detección de límites por ambos índices, lo anterior requiere algo de subjetivismo a la hora de considerar las coincidencias.

La aplicación del índice D2 conduce a delimitar siete capas, a mejorar la resolución de capas detectadas, principalmente en el sector compuesto por relleno y a requerir mucho menor subjetivismo a la hora de establecer los límites.

Se ha propuesto una metodología sencilla, basada en la el número de mediciones que se ubican en cada ámbito del gráfico de fricción normalizada contra resistencia del cono normalizada, la cual permite asignar de manera ágil la nomenclatura de las capas detectadas.

Es importante, a la hora de aplicar los índices y delimitar las capas, analizar el registro de presión de poro para así establecer la profun-

dididad a la que se encuentra el nivel freático, de manera que el mismo no se confunda con un límite de capas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM, 2012: ASTM D6067-10 Standard Practice for Using the Electronic Piezocone Penetrometer Tests for Environmental Site Characterization.- http://enterprise.astm.org/filtrexx40.cgi?REDLINE_PAGES/D6067.htm [consulta: 01 de setiembre de 2012].
- HARBAUGH, J.W. & MERRIAM, D.F., 1968: Computer Applications in Stratigraphic Analysis.- 282 págs. John Wiley and Sons, New York.
- RAO, C.R., 1965: Linear Statistical Inference and Its Applications.- 105 págs. John Wiley and Sons, New York.
- ROBERTSON, P.K. & CAMPANELLA, R.G., 1986: Guidelines for use, interpretation and application of CPT and CPTU.- 23 págs. Soil Mechanics Series, No. 105, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver.
- WEBSTER, R. & BECKETT, P.H.T., 1968: Quality and Usefulness of Soil Maps.- Nature, 219: 680-682.
- WICKREMESINGHE, D. & CAMPANELLA, R.G., 1991: Statistical methods for soil layer boundary location using the cone penetration test.- Proc. ICASP6, Mexico City, 2, 636-643

