

USO DE MÉTODOS ESTADÍSTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAPAS HOMOGÉNEAS DE SUELOS VOLCÁNICOS EN UN SITIO EN LAS LADERAS DEL VOLCÁN IRAZÚ, CARTAGO, COSTA RICA

USE OF STATISTICAL METHODS FOR DETERMINING HOMOGENEOUS LAYERS OF VOLCANIC SOILS AT A SITE IN THE SLOPES OF IRAZU VOLCANO, CARTAGO, COSTA RICA

Rolando Mora

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

(Recibido: 06/01/2013 ; aceptado: 26/11/2013)

ABSTRACT: This paper uses a statistical method to delineate homogeneous layers of volcanic soils in two sites where dynamic penetration soundings have been implemented. The physical and mechanical properties have been established for each given layer, as well as the variation according to depth of its allowable bearing capacity. With the obtained results it has been possible to choose the most suitable site to establish the foundation of a potable water storage tank.

Keywords: Volcanic soils, soil mechanics, geotechnics, bearing capacity, statistical methods.

RESUMEN: En este trabajo se emplea un método estadístico para delimitar las capas homogéneas de suelos volcánicos, en dos sitios donde se han ejecutado perforaciones de penetración dinámica. Para cada capa determinada se han establecido sus propiedades físicas y mecánicas, así como, la variación en función de la profundidad de su capacidad de carga admisible. Con los resultados obtenidos se ha podido determinar el sitio más conveniente para establecer la fundación de un tanque de almacenamiento de agua potable.

Palabras clave: Suelos volcánicos, mecánica de suelos, geotecnia, capacidad de carga, métodos estadísticos..

INTRODUCCIÓN

Cherubini et al. (2006) indican que la caracterización de los suelos y las rocas con propósitos geotécnicos está fuertemente influenciada por la incertidumbre y la variabilidad, las cuales deben ser identificadas y evaluadas, si se pretende realizar un buen diseño en lo concerniente con aspectos de seguridad. De acuerdo con estos autores la estimación de errores e incertidumbres en las fases de muestreo, ensayo y cálculo, debe ser una práctica común.

En este trabajo se parte de la hipótesis de Réthati (1988), quien establece que para cualquier ensayo de campo o laboratorio, el número de mediciones puede considerarse estadísticamente significativo y las estrategias de muestreo utilizadas pueden ser consideradas como eficientes, siempre que las fases de sondeo y ensayo estén correctamente programadas y diseñadas.

Se han analizado dos series de datos de ensayos con penetrómetro dinámico ligero DPL. Este tipo de pruebas muestran la resistencia dinámica del suelo en función de la profundidad, mediante la medición del número de golpes requerido para profundizar cada 10 cm, es decir, la variable medida se considera como una variable espacial unidimensional y con ella se pretende la detección de capas homogéneas. La energía de cada golpe corresponde a la de una masa de 10 kg cayendo de una altura de 50 cm.

Las metodologías empleadas en la detección de capas homogéneas se basan en métodos estadísticos para el análisis de la varianza y buscan las diferencias entre las medias de dos o más poblaciones, cuyos elementos son descritos en términos de varios “efectos” contribuyentes mediante un modelo lineal (Cherubini et al. (2006). En el caso de mediciones unidimensionales, el modelo más apropiado es el llamado “factor simple-efecto fijo”, en el que la observación j de la zona i (X_{ij}) puede ser expresada como la suma de tres componentes (Cherubini et al. (2006):

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + e_{ij}$$



Fig. 1: Ubicación del sitio estudiado.

donde:

μ es la media de toda la población; α_i es el efecto asociado con su zona (i) particular y e_{ij} el error aleatorio asociado con cada observación individual. Si los valores de las medias de las sub-zonas son significativamente diferentes, la varianza combinada de las sub-zonas será mayor que la varianza de las zonas por separado (Cherubini et al. (2006).

El método de Wickremesinghe & Campanella (1991) usa la estadística llamada coeficiente de correlación intraclases (RI), definido por Webster & Beckett (1968), desarrollando un procedimiento que divide el perfil de mediciones en “ventanas” de ancho fijo y examinando la porción de datos dentro de la ventana, con el punto central de la misma siendo considerado como un límite potencial. En cada iteración, asumiendo s_1 y s_2 como las varianzas de las dos muestras ubicadas arriba y abajo del centro de la ventana, se calcula una

varianza combinada para las dos muestras con igual número de datos (n) (Wickremesinghe & Campanella, 1991):

$$SC = n(S_s + S_2) / (2n - 1)$$

Posteriormente, el coeficiente de correlación intraclases (RI) es dado por la expresión (Webster & Beckett, 1968):

$$RI = SB / (SB + SC)$$

donde:

SB es la varianza de la muestra combinada de tamaño $2n$.

En los límites óptimos de capas RI alcanzará un pico y según Cherubini et al. (2006) un valor pico de 0,8 indica la presencia de un límite de capas en el centro de la ventana, mientras que valores mayores de 0,7 pueden también ser considerados.

EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DE SUELOS VOLCÁNICOS

Los ensayos de penetración DPL son técnicas de campo que proporcionan perfiles de medición de la resistencia a la penetración en función de la profundidad y que son prácticamente continuos. Esta característica permite investigar la estructura de la variabilidad de las mediciones en las capas perforadas y formular procedimientos para su interpretación estadística.

El caso de estudio comprende dos perforaciones (DPL 1A y DPL 1B) con penetrómetro dinámico ligero (DPL), realizadas en el cantón de La Unión, Cartago (Fig. 1), mediante las cuales se pretende establecer las condiciones de cimentación más oportunas, para ubicar un tanque de almacenamiento de agua potable, el cual requiere una capacidad de carga admisible superior a 50 kPa. Las perforaciones atraviesan depósitos de cenizas volcánicas, producto de la actividad reciente del Volcán Irazú, las cuales se encuen-

tran meteorizadas y son de espesor considerable. Las perforaciones DPL 1A y DPL 1B alcanzan 8,6 m y 8,5 m de profundidad respectivamente y se encuentran a 54 m una de otra, sus perfiles se muestran en la figura 2. Los suelos volcánicos de la parte central de Costa Rica se clasifican, de manera general y según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), como Limos elásticos (MH) de plasticidad alta (Mora, 1998) y en el sitio estudiado alcanzan espesores de más de 15 m.

Los datos del número de golpes en función de la profundidad de las perforaciones se utilizaron para calcular el RI, con una ventana que abarca 6 datos, es decir 60 cm de perforación, los resultados de este procedimiento se presentan en las figuras 3 y 4. Los picos de RI mayores de 0,8 se han asumido como límites de capas y solamente en el caso de la perforación DPL 1A el primer pico entre 0,7 y 0,8, localizado a 1,4 m de profundidad, se ha asumido como límite de capa. Por otro lado, el primer pico de la perforación DPL 1B, localizado a 0,3 m, no se ha incluido como límite de capa, pues se considera que queda abarcado dentro de la primera capa de suelo identificada. El resumen de los límites de capas definidos con la ayuda del Coeficiente de Correlación Intraclases (RI) se puede observar en el cuadro 1.

A partir de los datos anteriores y con la ayuda del paquete *Dynamic Probing (GeoStru Software, 2012)*, se correlacionaron las propiedades físicas y mecánicas de cada capa para cada una de las perforaciones (Cuadro 2 y 3). Posteriormente, con la utilización del programa *Dynamic Probing (GeoStru Software, 2012)* se ha establecido la capacidad de carga admisible para las capas definidas en las

Cuadro 1

Límites de capas definidos a partir del coeficiente RI

DPL 1A	DPL 1B
1,4 m	2,9 m
4,0 m	5,1 m
8,2 m	6,9 m

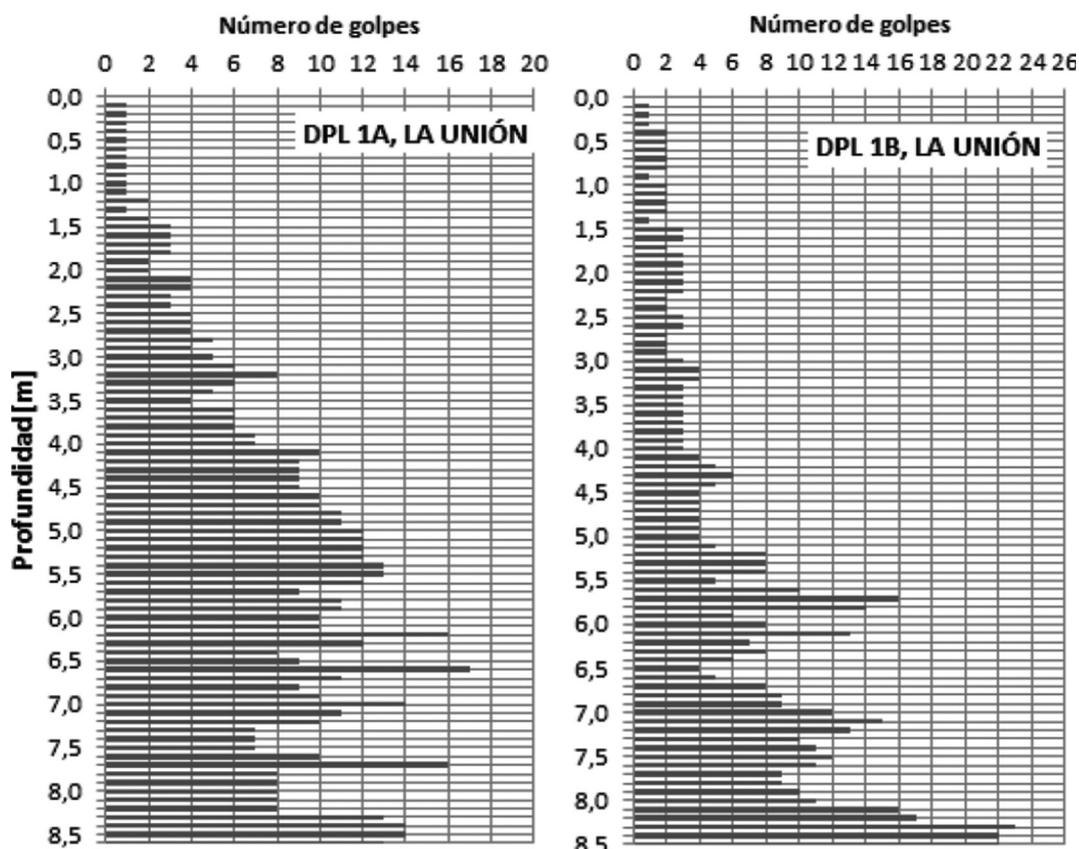


Fig. 2: Perforaciones realizadas con penetrómetro dinámico ligero (DPL).

Cuadro 2

Correlación y propiedades de las capas delimitadas para la perforación DPL 1A

Profundidad[m]	Tipo de suelo	NSPT	Cu [kPa]	Ed [MPa]	Ey [MPa]	[kN/m ³]	sat [kNm ³]
0,0-1,4	Suelo orgánico sin consistencia	1	9,8	1,2	1	14,5	18,0
1,4-4,0	Arcilla poco consistente	3	20,6	3,2	2,9	16,0	18,2
4,0-8,2	Limo arcilloso moderadamente consistente	8	31,0	8,2	7,9	18,6	18,7
8,2-8,6	Limo consistente	10	56,5	10,2	9,8	19,3	-

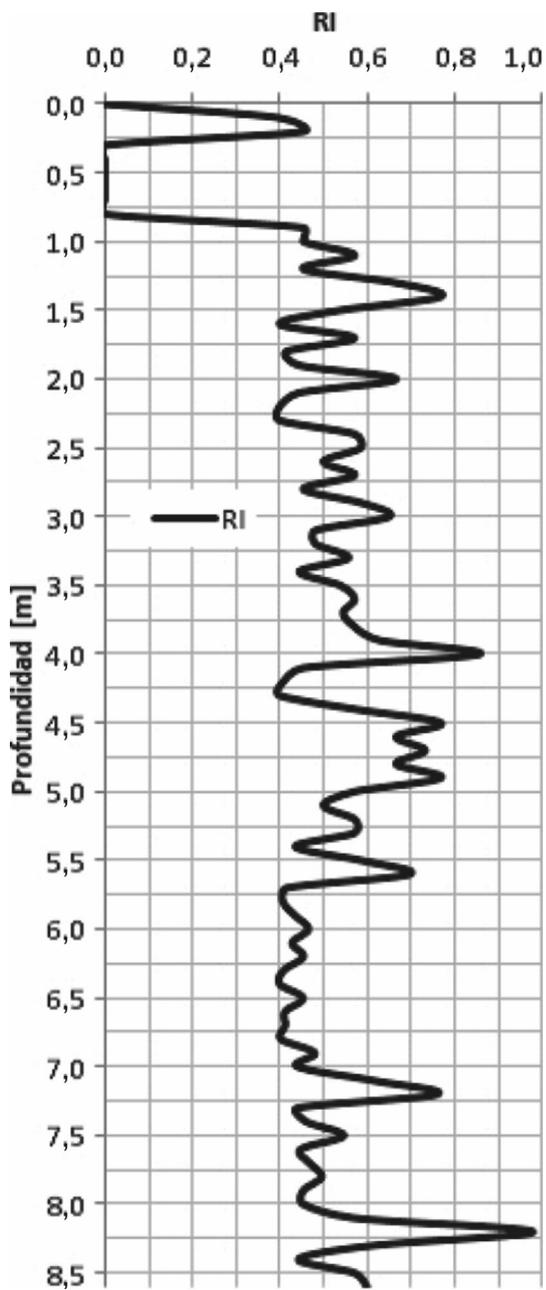


Fig. 3 Resultados del cálculo del RI para la perforación DPL 1A.

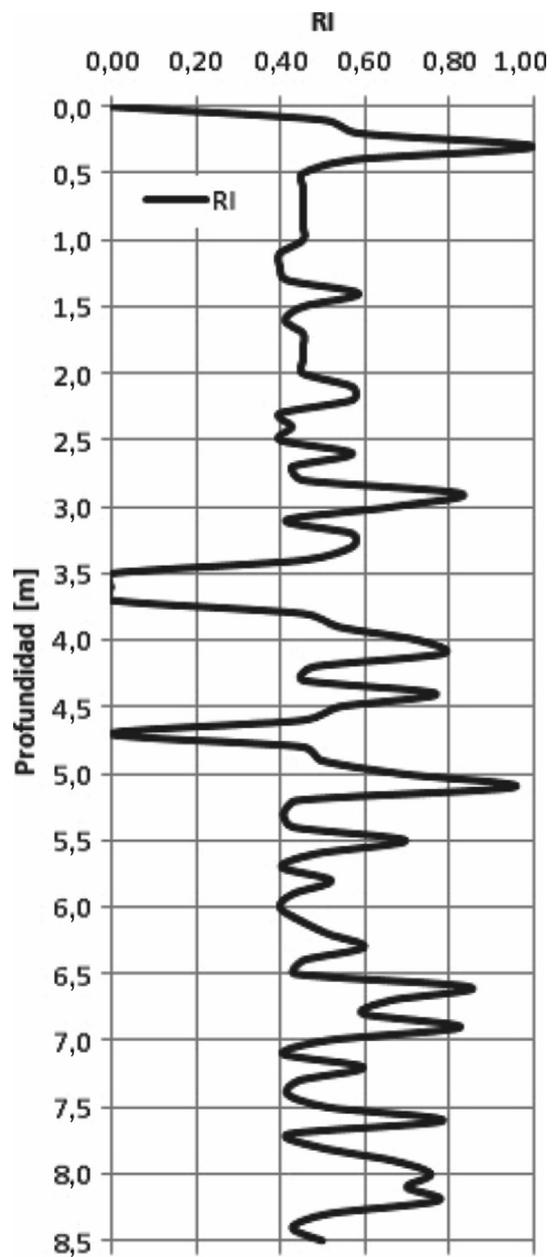


Fig. 4 Resultados del cálculo del RI para la perforación DPL 1B.

Cuadro 3

Correlación y propiedades de las capas delimitadas para la perforación DPL 1B

Profundidad [m]	Tipo de suelo	NSPT	Cu [kPa]	Ed [MPa]	Ey [MPa]	[kN/m ³]	sat [kNm ³]
0,0-2,9	Suelo orgánico sin consistencia	2	19,6	2,2	2	15,3	18,1
2,9-5,1	Arcilla sin consistencia	3	19,9	3,2	2,9	16,0	18,2
5,1-6,9	Arcilla limosa moderadamente consistente	6	23,8	6,2	5,9	17,8	18,5
6,9-8,5	Limo arcilloso consistente	11	75,5	11,2	10,8	19,5	-

NSPT: Número de golpes del ensayo de penetración estándar

Cu: Cohesión no drenada

Ed: Módulo edométrico

Ey: Módulo de Young

□: Peso unitario húmedo

□sat: Peso unitario saturado

dos perforaciones (Figs. 5 y 6), mediante el ajuste de curvas de mejor ajuste para este parámetro en cada capa; este proceso se ha realizado empleando el programa *CurvExpert 1.4* (Hyams, 2009). Las curvas de mejor ajuste proporcionan una gran ayuda a la hora de discriminar los valores extremos altos y bajos, detectados durante la realización de las perforaciones. Todos los resultados de este proceso se resumen en los cuadros 4 y 5.

En el caso de la perforación DPL 1A, la capacidad de carga admisible requerida de 50 kPa se alcanza a una profundidad de 2,25 m y en el caso de la perforación DPL 1B se alcanza hasta los 8,0 m de profundidad. A raíz de este hallazgo,

el sector adyacente a la perforación PDL 1A se establece como el sitio más conveniente para ubicar la fundación del tanque.

CONCLUSIONES

Los datos del número de golpes en función de la profundidad de las perforaciones DPL permiten el cálculo del RI, mediante el cual es posible determinar claramente los límites de capas homogéneas en suelos volcánicos.

Luego de delimitadas las capas homogéneas, se pueden utilizar programas de cómputo

Cuadro 4

Resumen de los resultados para el ajuste de la capacidad de carga admisible, perforación DPL 1A

Tipo de suelo	Profundidad [m]	Capacidad de carga[kPa]			Curva de mejor ajuste
		Mínima	Máxima	Promedio	
Suelo orgánico sin consistencia	0.0-1.4	10.9	19.9	17.3	$y=9.82+11.8x-3.46x^2$
		Muy baja	Muy baja	Muy baja	
Arcilla poco consistente	1.4-4.0	47.7	89.2	68.4	$y=(47.7*1.95E05+89.6*x^{12.1})/(1.95E05+x^{12.1})$
		Baja	Moderada	Moderada	
Limo arcilloso moderadamente consistente	4.0-8.2	89.7	148.6	127.8	$y=\exp(21.1-31.9/x-6.03\ln(x))$
		Moderada	Alta	Alta	
Limo consistente	8.2-8.6	137.1	137.4	137.2	$y=(124*0.382+164*x^{-0.768})/(0.382+x^{-0.768})$
		Alta	Alta	Alta	

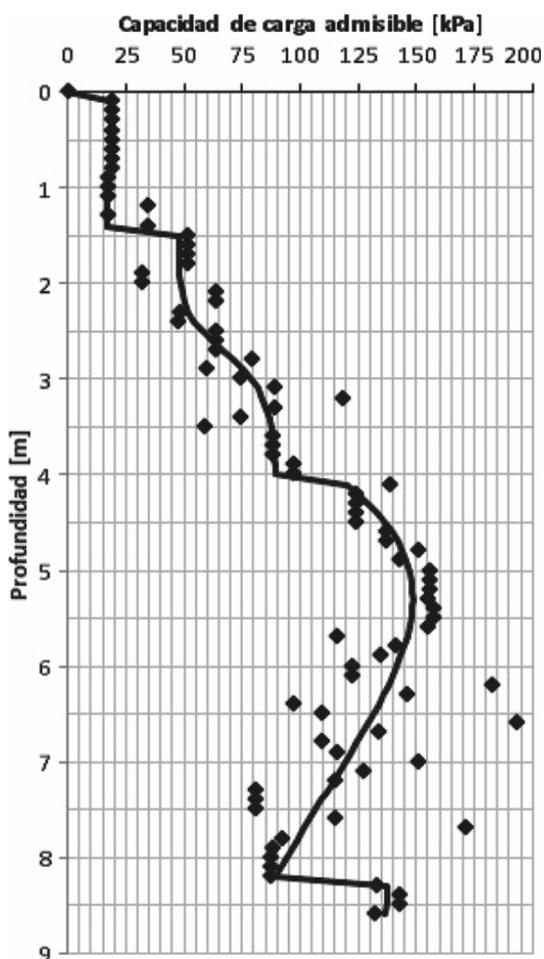


Fig. 5 Capacidad de carga admisible, perforación DPL 1A.

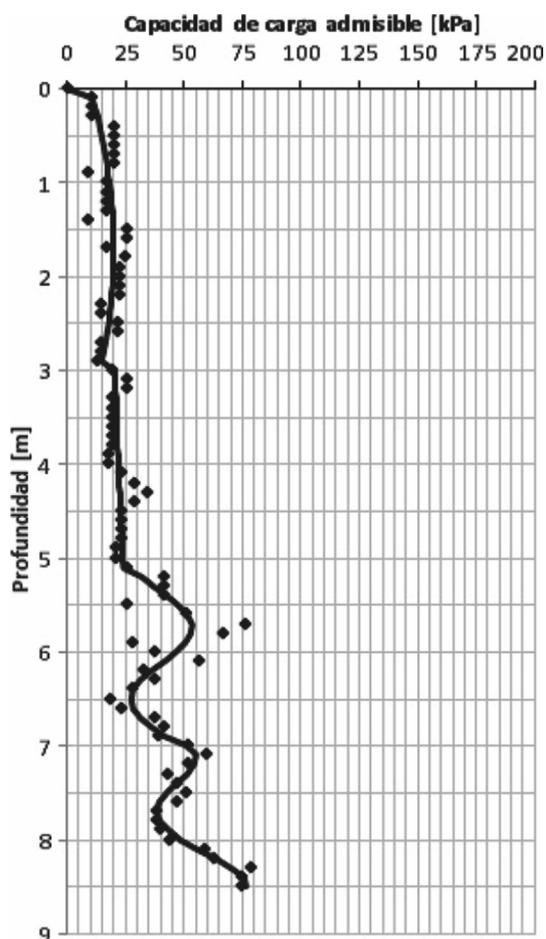


Fig. 6 Capacidad de carga admisible, perforación DPL 1B.

Cuadro 5

Resumen de los resultados para el ajuste de la capacidad de carga admisible, perforación DPL 1B

Tipo de suelo	Profundidad [m]	Capacidad de carga [kPa]			Curva de mejor ajuste
		Mínima	Máxima	Promedio	
Suelo orgánico sin consistencia	0.0-2.9	17.2	18.7	18.0	$y=(18.7*8.6E-04+17.2*x^{40.7})/(8.6E-04+x^{40.7})$
Arcilla sin consistencia	2.9-5.1	20.6	24.1	22.2	$y=71.5*x^{(-3.4/x)}$
Arcilla limosa moderadamente consistente	5.1-6.9	24.1	53.5	39.0	$y=40.4+13.2*\cos(4.18x-17.7)$
Limo arcilloso consistente	6.9-8.5	38.6	76.5	53.4	$y=-4.73E05+2.45E05x-4.76E04x^2+4.1E03x^3-1.32E02x^4$

apropiados para establecer las propiedades físicas y mecánicas, así como , la variación en función de la profundidad de la capacidad de carga admisible de cada una de las capas.

El proceso de procesamiento de datos seguido en esta investigación ha permitido discriminar el mejor sitio para establecer la fundación de la obra civil proyectada.

REFERENCIAS

- CHERUBINI, C., VESSIA, G. & PULA, W., 2006: Statistical soil characterization of Italian sites for reliability analysis.- Proc. of The Second International Workshop on Characterization & Engineering Properties of Natural Soils [Invited Paper], Singapore. 4: 2681-2706
- GEOSTRU SOFTWARE, 2012: Dynamic Probing 1.0.- <http://www.geostru.com> [Consultado 02/04/2013].
- HYAMS, D., 2009: CurveExpert: a curve fitting system for Windows (versión 1.4).- http://www.download.cnet.com/CurveExpert-Basic/3000-20417_4-10920865.html [Consultado 25/03/2013].
- MORA, R., 1998: Propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas de suelos de origen volcánico, en sitios seleccionados del Valle Central, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central, 19: 81-98.
- RÉTHATI, L., 1988: Probabilistic solutions in geotechnics.- 451 págs. Elsevier, Amsterdam.
- 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.- Proceedings ICASP6, México D.F. 2: 636-643.

