

## PIEZOCONO E INSTRUMENTACIÓN: SINERGIAS

Marcelo J. Devincenzi\*

---

### RESUMEN

Se describen brevemente el ensayo de penetración estática (CPT) y el piezocono (CPTU), haciendo especial referencia a sus capacidades para el estudio estratigráfico y sedimentológico de suelos y presentando diversos ejemplos españoles. Se describen nuevas técnicas para la caracterización de suelos contaminados utilizando el piezocono: toma de muestras de suelo, agua y gas y conos con sensores especiales (resistividad, pH, redox, fluorescencia inducida para la detección de hidrocarburos).

### Palabras clave

Suelos contaminados; CPT; CPTU; dieléctrico; hidrocarburos, ensayos in situ; intersticial; muestras; penetración; ph; redox; resistividad; sensores.

### ABSTRACT

A brief description of CPT and CPTU test is made. Special emphasis is made on stratigraphic and sedimentological capabilities of test. Several Spanish examples are presented. New technologies to characterize contaminated soils using CPT special sensors (resistivity, pH, Redox potential, induced fluorescence to detect hydrocarbons) and soil, water & gas sampling devices are described.

### Key words

Contaminated soils; CPT; CPTU; dielectrical; hydrocarbons; in situ tests; interstitial; penetration; pH; redox potential; resistivity; samples; sensors.

## ENSAYOS GEOTÉCNICOS "IN SITU"

Los ensayos geotécnicos in situ (EGIS) constituyen una serie de técnicas variadas e independientes con un objetivo común: la caracterización mecánica de las capas que componen el subsuelo a través de parámetros medidos en el propio medio natural. La diversidad de técnicas aplicadas es muy grande y los parámetros medidos con cada una de ellas, distintos.

Básicamente, los cuatro propósitos fundamentales de los EGIS son (Worth, 1984):

- Caracterización o "diagnosis" del terreno.
- Determinación de propiedades específicas del suelo.
- Control de obras.
- Comprobación de hipótesis de cálculo y análisis retrospectivo.

Estos conceptos se resumen ligeramente ampliados en la Tabla I.

Tabla I. Objetivos de los EGIS (Jiménez Salas, 1987)

<b>Para el Proyecto</b>	Caracterización del Terreno Parámetros de Cálculo Modelización
<b>Comportamiento del Terreno</b>	Durante la Construcción Durante la Explotación
<b>Control y Comprobación</b>	Sobre el Terreno Sobre las Estructuras

En los últimos tiempos los EGIS han tenido un fuerte desarrollo como consecuencia de los avances en electrónica, informática y comunicaciones. Paralelamente, se han actualizado y redactado nuevos

estándares que normalizaron los procedimientos de ejecución, equipos y métodos de análisis. Numerosas Conferencias y Simposios sobre el tema desde los años 70s han tenido también una fuerte influencia en estos desarrollos.

## EL ENSAYO CPTU

El ensayo de penetración estática (CPT) y el piezocono (CPTU) es una excelente herramienta de investigación geotécnica que permite obtener un perfil estratigráfico virtualmente continuo del terreno y evaluar los parámetros resistentes de las capas atravesadas. En los últimos años, esta técnica ha desarrollado variantes con la incorporación de nuevos captosres especialmente diseñados para el estudio de suelos contaminados y toma de muestras de suelo, agua o gases.

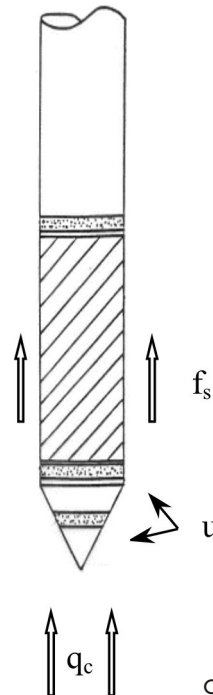
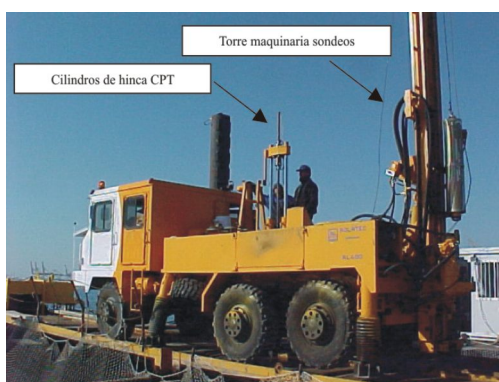


Figura I. Cono CPTU

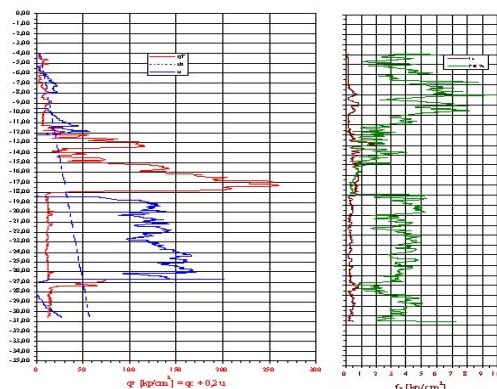
De forma muy breve, el ensayo consiste en hincar en el terreno a velocidad constante (2 cm/seg) un cono que permite medir, mediante captore, la resistencia a la penetración  $q_c$ , el rozamiento  $f_s$  de un manguito ubicado encima de la punta cónica y la presión intersticial  $u$  del agua a medida que el cono penetra en el terreno. Cuando el ensayo mide la presión intersticial,  $u$ , se denomina piezocono o CPTU. Si sólo se mide la resistencia por punta  $q_c$  y el rozamiento lateral específico  $f_s$ , el ensayo se denomina CPT (del inglés Cone Penetration Testing), antiguamente conocido como cono holandés.

El equipo consiste en el cono de hincar, varillaje hueco por donde pasa el cable de señales, central de toma de datos y el medio de hincar o penetrómetro (Figura 1 y Figura 2). El ensayo es de aplicación en suelos blandos a firmes; los suelos con abundante grava o bolos y las rocas no son aptos para la hincar estática. Una descripción más detallada puede consultarse en Devincenzi y Gómez, 1996.



**Figura 2:** Equipo mixto de sondeos y ensayos CPT.  
 Cortesía IGEOEST, S.L.

Los resultados se presentan en forma gráfica trazando los parámetros medidos con el ensayo y/o otros derivados de éstos, el más



**Figura 3.** Ejemplo de un piezocono en la ciudad de Murcia. Cortesía IGME

usual de los cuales es la razón de fricción ( $FR = q_c/f_s\%$ ). En la Figura 3 se presenta un ejemplo correspondiente a la ciudad de Murcia.

En la Tabla 2 se presentan las bases fundamentales para la interpretación estratigráfica del ensayo. En la misma se indican los criterios básicos para suelos arenosos y arcillosos. Suelos intermedios, tendrán un comportamiento también intermedio. En base a estos simples conceptos se puede interpretar el piezocono de la Figura 3 de la siguiente forma:

- Primer nivel de arcillas hasta los 11,5 m aproximadamente, caracterizado por bajos valores de  $q_c$  y elevados valores de  $FR\%$  (superiores a 5). Los valores de  $u$  dinámica, sin embargo, son similares a la presión hidrostática. Este hecho es debido a que se trata de una arcilla sobreconsolidada (y por lo tanto, fisurada) debido a la explotación del acuífero de las arenas inferiores.
- Nivel de arenas entre los 11,5 m y los 18 m de profundidad, caracterizado por elevados valores de  $q_c$  y bajos valores de

**Tabla 2:** Bases para la interpretación estratigráfica del ensayo CPT y CPTU

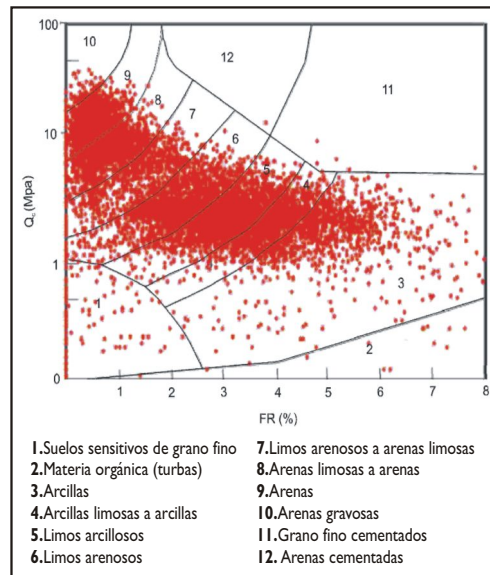
	$q_c$	$f_s$	FR%	$u$
<b>Arenas</b>	Altos valores de $q_c$ . Forma dentada de la curva de penetración	Bajos valores de $f_s$ . Aumenta si existe cementación	Bajos valores de FR%. Típico 1. En arenas carbonáticas puede llegar a 3	Valores de $u$ dinámica similares a $u_0$ (h idrostática si acuífero libre). $u$ puede ser negativo en arenas dilatantes
<b>Arcillas</b>	Bajos valores de $q_c$ . Forma suave de la curva, aumenta linealmente con la profundidad	Valores relativamente más altos de $f_s$ que en las arenas	Valores elevados de FR%. Valores típicos superiores a 3 en arcillas normalmente consolidadas (NC). Disminuye al aumentar la sobreconsolidación (fisuración)	Valores de $u$ elevados en arcillas normalmente consolidadas (NC). En arcillas fisuradas, $u$ similar a $u_0$ incluso menor.

FR%. Los valores de  $u$  dinámica son inferiores al valor piezométrico ( $u$  negativo). Con mayor detalle se puede distinguir una subcapa superior con intercalaciones limosas.

- Nivel inferior de arcillas normalmente consolidadas caracterizadas por un bajo valor de  $q_c$  y un elevado valor de  $u$  y FR%. Obsérvese como se detecta una delgada capa arenosa de menos de medio metro de espesor hacia los 27 m de profundidad, el valor de  $q_c$  aumenta y disminuye drásticamente el valor de  $u$  y FR%.

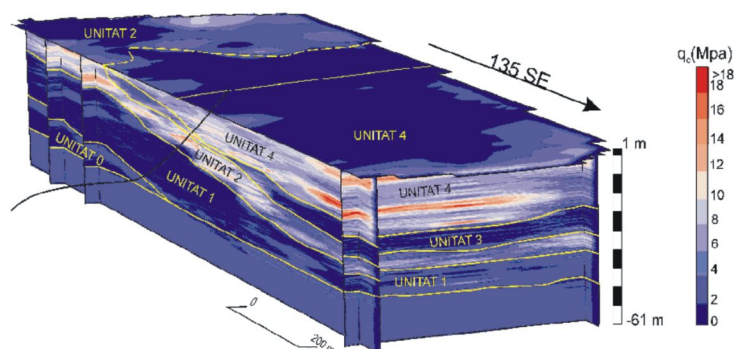
En la Figura 4 se presenta uno de los tantos ábacos de clasificación publicados en la literatura especializada. En este caso se trata de la clasificación de Robertson et al. (1986). En él se trazan los resultados de varios ensayos CPTU de unos 50 m de profundidad realizados en sedimentos deltaicos del delta del Llobregat. Puede observarse la amplia gradación granulométrica encontrada.

Al proporcionar una enorme cantidad de datos (los parámetros se miden cada 1 cm de profundidad), es posible llevar a cabo estudios geoestadísticos de las variables para analizar su distribución espacial. La creación de variogramas experimentales o la utilización de funciones de autocorrelación y la



**Figura 4.** Abaco de clasificación de suelos (Robertson et al., 1986) con datos de un CPTU en suelos del delta de Llobregat. Cortesía DEPURBAIX, S.A.

aplicación a continuación de una interpolación estocástica (*kriging*) permite crear modelos 3D que son de enorme utilidad para el estudio de facies sedimentarias y sus relaciones laterales y verticales. El ensayo es, pues, muy adecuado para el estudio sedimentológico e hidrogeológico de cuencas sedimentarias recientes.



**Figura 5.** Modelo 3D de la distribución espacial de  $q_c$ . Delta de Llobregat, Barcelona. Colàs, 2003; Devincenzi et al., 2003

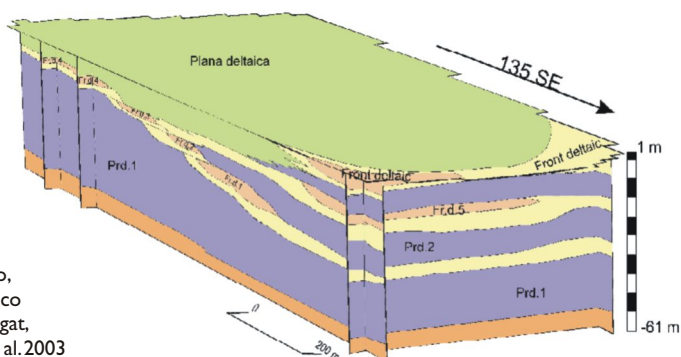
En la Figura 5 se presenta un ejemplo de un modelo 3D de la distribución espacial de  $q_c$  correspondiente a sedimentos deltaicos del Río Llobregat donde se pueden distinguir cinco unidades geológicas principales. El ejemplo corresponde a la zona donde se ubica la nueva E.D.A.R. de Barcelona, con un área de 95 km<sup>2</sup>, aproximadamente. Desde un punto de vista sedimentológico (Figura 6), se pudieron definir y caracterizar en términos litológicos facies sedimentarias de prodelta, frente deltaico y llanuras de inundación, determinando sus límites y gradaciones verticales y horizontales y relaciones geológicas entre ellas (concordantes o discordantes). Una vez establecida esta arquitectura general del cuerpo deltaico, se están llevando a cabo estudios más detallados con el objetivo de

caracterizar distintas subfacies tales como arenas de canal (principales y secundarios), barras, marjales, limos y arenas de derrame, etc. (Devincenzi et al., 2003).

## CPTU E INSTRUMENTACIÓN

Existe de hecho una interrelación entre la instrumentación geotécnica en sentido amplio y los ensayos geotécnicos in situ sofisticados como el CPTU (Figura 7).

El ensayo puede utilizarse por ejemplo para la monitorización de la ganancia a la resistencia al corte durante un proceso de precarga, como piezómetro al detener la penetración y registrar la evolución de las presiones intersticiales (Figura 8), etc.



**Figura 6.** Análisis sedimentario, facies de Prodelta, Frente Deltalico y Plana Deltaica. Delta de Llobregat, Barcelona. Colàs, 2003; Devincenzi et al. 2003

El principio de la toma de datos es exactamente el mismo se trate de un piezocono o un equipo específico para instrumentación geotécnica o medioambiental (Figura 9).

## APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES

Desde mediados de la década de los 90 se desarrollaron una serie de captore e instrumentos especiales para la toma de muestras de agua, suelo o gas, adaptados al ensayo CPT y destinados al estudio de los suelos contaminados. Estas técnicas se conocen con el nombre genérico de PDT (del inglés, Push Direct Technology) y complementan de manera muy eficiente las técnicas convencionales de reconocimiento, reduciendo los costos y tiempos de los estudios y causando menos daño al medio ambiente al ser una técnica menos agresiva. Además, se presenta como una metodología de trabajo menos rígida que las técnicas clásicas (sondeo + toma de muestra + análisis de laboratorio), permitiendo la toma de decisiones en tiempo real y optimizando los puntos de toma de muestras o colocación de piezómetros y evitando la caracterización por sucesivas aproximaciones.

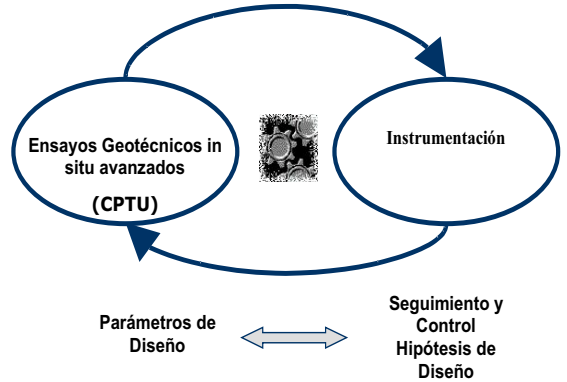


Figura 7. Interrelación CPTU Instrumentación Geotécnica

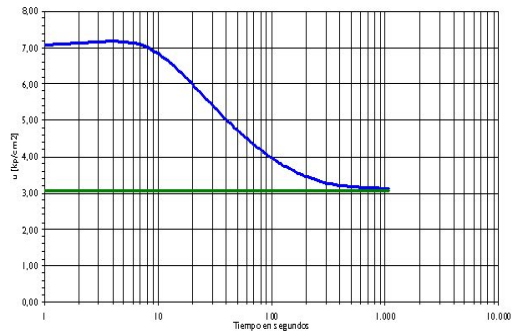


Figura 8. Ensayo de disipación de las presiones intersticiales

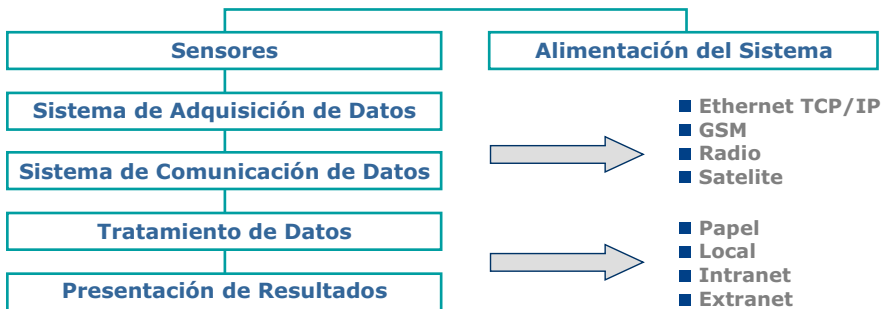


Figura 9. Sistema de toma y procesado de datos

En términos generales, las principales ventajas de la metodología PDT se pueden resumir en:

- No produce detritus de perforación.
- Las muestras de agua y gas corresponden a una profundidad determinada.
- Evita purgados (< 40 ml) y trasvase de muestras a otros contenedores.
- Evita la contaminación externa.
- Evita la contaminación cruzada.
- Evita la pérdida de volátiles.
- Se puede sellar el taladro a medida que se retira el varillaje.
- Personal no expuesto a contaminantes.

## Toma de Muestras

### Toma de Muestras de Agua y Gas

Los dos sistemas más comunes son mediante penetración de puntas retráctiles (Figura 10) y los denominados toma muestras BAT (Figura 11). De los primeros existe una amplia variación de modelos aunque todos operan con la misma base: hincar el tomamuestras hasta la profundidad deseada de muestreo y retraer el varillaje de

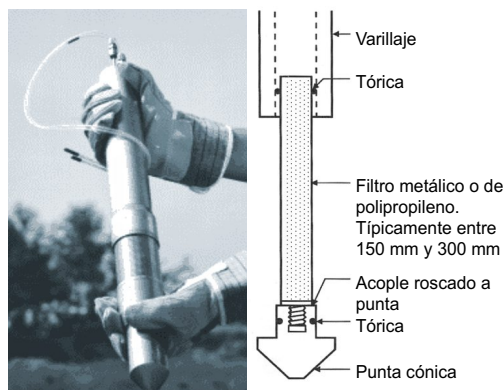


Figura 10. Toma muestras de fluidos tipo hidropunch

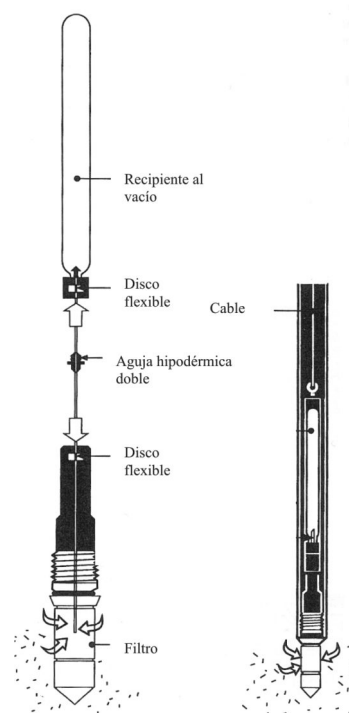


Figura 11. Tomamuestras tipo BAT, Tortenenson, 1984

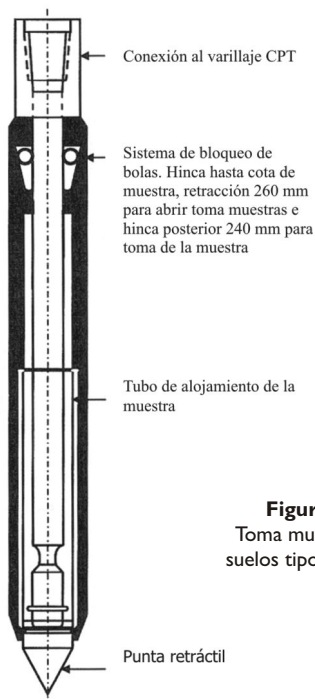
forma que el filtro queda expuesto al medio. La toma de la muestra puede realizarse bajando un pequeño bailer por el interior del varillaje o directamente mediante bomba desde la superficie. Los filtros suelen ser de acero inoxidable o polipropileno y su longitud puede variar en función de la permeabilidad del suelo y del tipo de contaminante a muestrear. Este tipo de dispositivo evita la contaminación cruzada y es muy simple, pudiendo realizar un número elevado de muestras en una jornada de trabajo. Existen en el mercado versiones modificadas de este dispositivo desarrolladas para dejarse instaladas en el terreno para puntos de monitoreo. Algunas versiones permiten incluso el sellado del filtro al retirar el varillaje de instalación.

El toma muestras BAT es algo más sofisticado. Consiste en hincar una punta retráctil, bajar por el interior del varillaje un recipiente esterilizado al vacío mediante un cable. Una aguja hipodérmica permite el llenado del recipiente. Este sistema tiene la ventaja de que la presión del fluido muestreado es igual a la presión in situ. El volumen de la muestra es de 150 ml. Midiendo el tiempo de llenado y el volumen recogido se puede hacer una estimación de la permeabilidad del terreno.

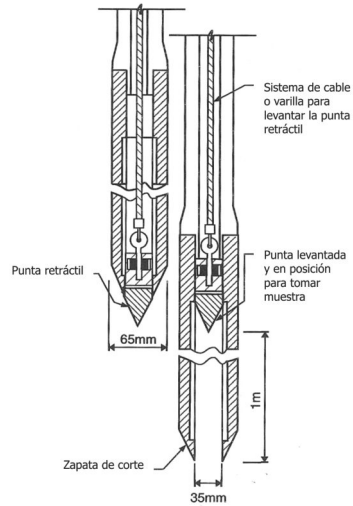
La toma de muestras de gas puede realizarse de forma similar debiendo tener especial cuidado en el purgado del sistema.

### Tomas de Muestras de Suelo

Existen actualmente distintos sistemas para la toma de muestras de suelos. En la Figura 12 y en Figura 13 se muestran los más usuales. Los dispositivos se hincan hasta la

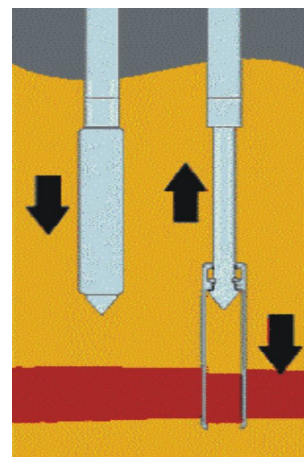


**Figura 12.**  
Toma muestras de suelos tipo GOUDA



**Figura 13.** Toma muestras de suelos tipo MOSTAP

profundidad que se desea obtener una muestra, se retrae la punta cónica y se hince nuevamente (Figura 14). Existen también dispositivos con sistemas de "wire line" de manera que múltiples muestras pueden ser obtenidas en un mismo taladro.



**Figura 14.** Proceso de toma de muestra de suelos. Cortesía EPA

## Sensores Medioambientales

En los últimos años se han desarrollado una serie de captosres adicionales a los tradicionalmente utilizados con el ensayo CPT o CPTU destinados a la caracterización geoambiental y cuyo uso principal está destinado al estudio de suelos contaminados. Si bien la aplicación de estas técnicas es prácticamente nula en España, su uso está muy extendido e incluso normalizado en otros países (ver por ejemplo EPA, 1997, 2001, etc.). En la Tabla 3 se enumeran los conos ambientales de uso más extendido. En los epígrafes siguientes se describen algunos de ellos.

### Sensores de Temperatura

Originalmente, la medida de la temperatura del suelo se utilizaba para calibrar los transductores de los conos de investigación (las células de carga y presión) y para medir el incremento de la temperatura del suelo debido a la fricción producida por la hincada del cono. Actualmente, la medida de dicho parámetro puede ser utilizada también para

complementar o corregir los resultados obtenidos por otros sensores, por ejemplo, los de pH. Debido al incremento de la temperatura producido por las reacciones químicas y microbianas, la medida de dicho parámetro in situ puede proveer de información sobre una posible contaminación del suelo.

### Resistividad y Conductividad Eléctrica

La medición de la conductividad eléctrica se basa en el hecho de que la variación de voltaje entre un par de electrodos a los que se aplica una cierta corriente es proporcional a la resistividad eléctrica del suelo y ésta se correlaciona con la conductividad mediante la fórmula:

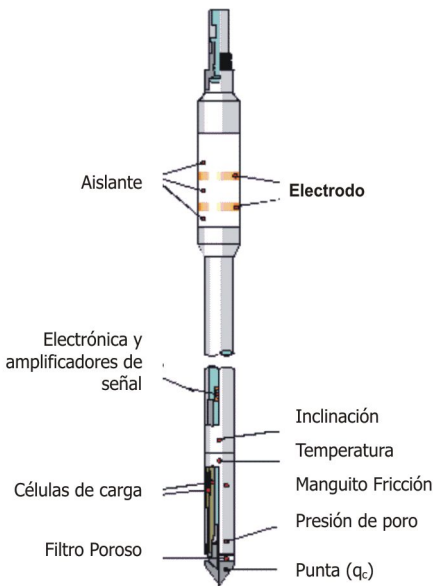
$$C \text{ (mS/m)} = 1000 \cdot \frac{I}{R} \left( \frac{1}{\Omega m} \right)^{(1)}$$

Los sensores montados en los conos ambientales constan de 2 o más anillos de acero inoxidable situados a una distancia que varía de 10 a 15 mm (dependiendo de ello la penetración del campo eléctrico en el suelo) y

Tabla 3. Tipos de conos ambientales

Sensores	Método de Lectura	Parámetros Medidos	Aplicaciones
Temperatura	Transductor de T °C	Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Localización contaminantes con reacciones exotérmicas</li> </ul>
Humedad	Características dieléctricas	Contenido de humedad en el suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Estimar contenido de humedad</li> <li>■ Indicación de niveles potencialmente contaminados</li> </ul>
Potencial Redox	Electrodo de Platino/Mercurio	Intercambio iónico de O <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Localización contaminantes con reacciones exotérmicas</li> </ul>
Conductividad y Resistividad	Conductividad	Conductividad eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Intrusiones salinas</li> <li>■ Metales pesados</li> <li>■ Niveles altos de hidrocarburos y solventes clorados</li> </ul>
Fluorescencia Ultravioleta Inducida	Fuente de Nitrógeno, Argón y Mercurio. Láser	Respuesta de fluorescencia inducida	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Presencia de derivados del petróleo</li> <li>■ Tipo de contaminante</li> </ul>
Radioactividad	Cristal de Yoduro de Sodio con análisis espectral	Nivel de radiación gamma en el suelo	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Localización contaminantes con reacciones exotérmicas</li> </ul>
Espectrometría	Láser de longitudes de 514 y 758 nm, CDD espectrómetro	TCE y PCE a niveles altos	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Localización contaminantes con reacciones exotérmicas</li> </ul>

que se encuentran separados entre sí y del resto de los componentes por un material aislante como plástico no conductor, cerámica, etc. Asimismo, presentan una posición dentro del conjunto del cono variable, pudiéndose encontrar en la punta o detrás del cuerpo principal del cono (Figura 15).



**Figura 15.** Cono CPTU y Resistividad

Normalmente, la corriente aplicada sobre los electrodos es de tipo sinusoidal y proviene de una fuente que emite con un voltaje que evite la polarización de los electrodos. Dicha corriente puede ser modificada para obtener una respuesta lineal frente a cambios bruscos en la resistividad, cosa que permite medidas entre 1 y 250 m, con una precisión del 2 %. El hecho de obtener el voltaje de forma continua permite la lectura de la resistividad de forma prácticamente ininterrumpida a lo largo de la perforación, con resoluciones de 2 a 5 cm/lectura.

La conductividad medida depende de diversos factores, y esta medida es función a

su vez de otros componentes como se indica en la fórmula

$$C = \frac{L}{A * R} \quad (2)$$

donde:

- L:** longitud del material conductor medido
- A:** área transversal
- R:** resistencia eléctrica =  $U(\text{voltaje})/I(\text{corriente})$

Los factores que influyen en la medida se pueden resumir en:

- Geometría de los electrodos.
- Resistividad del suelo, dependiente de la proporción entre la resistividad del volumen medido y la del fluido, estructura del suelo, viscosidad del fluido de los poros, temperatura del fluido de los poros, resistividad de las partículas del suelo, etc.

La medida de la conductividad eléctrica debido a su dependencia de un parámetro intrínseco como es la geometría, ha de ser precedida de un calibrado en cámaras de calibración con una solución de conductividad eléctrica conocida, hecho que permite la obtención del parámetro de factor de cono mediante la relación:

$$C = k * C_s \quad (3)$$

donde:

- C:** conductividad del fluido
- k:** factor de calibración del cono
- Cs:** conductividad medida por el cono

### pH

El sensor de pH está constituido por electrodos que configuran un sistema de polos de lectura semi-metálicos compuestos por cloruro de antimonio/plata, para determinar la actividad de los iones de hidrogeno en el subsuelo.

La distribución consiste en tres pequeños botones incrustados en un lateral de la sonda.

El inferior es el electrodo de medida semi-metálico y el de en medio, cerámico, se utiliza como confluencia de los fluidos. El electrodo de referencia está sumergido en una solución saturada de cloruro de plata que se encuentra en una cámara situada en el interior de la sonda. El filtro cerámico saturado en cloruro de plata es el encargado de la conducción entre el electrodo sumergido y el disco de antimonio. Este sistema permite determinar un potencial electrónico entre los dos electrodos, y que se relaciona con el pH del suelo que se penetra.

La resolución de estos sensores suele ser del orden de 0,5 unidades de pH y pueden proveer de un perfil prácticamente continuo en materiales saturados o casi saturados (Pluimgraaff et al, 1995), Figura 16.

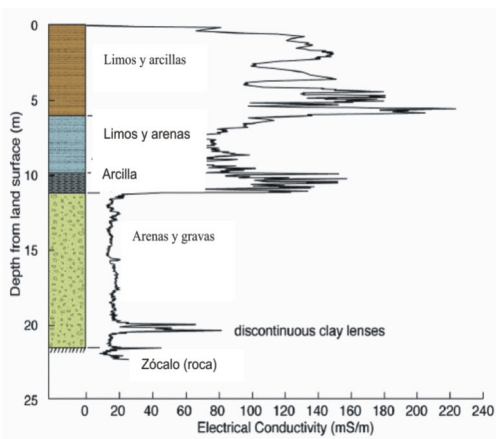


Figura 16. Gráfico de un ensayo (Butler et al. 2000)

### Potencial Redox

El sensor utilizado en las lecturas de potencial redox presenta una configuración muy similar al anterior sensor de pH, aunque el sistema electrolítico es de cloruro de platino/mercurio y el electrodo de referencia (sumergido en la solución) es de cloruro de mercurio.

El potencial eléctrico es un indicador de la energía que utilizan los microorganismos para crecer de forma substancial, debido a este hecho un conocimiento de este parámetro permite la correcta selección de los microorganismos para una bioremediación para un determinado medio.

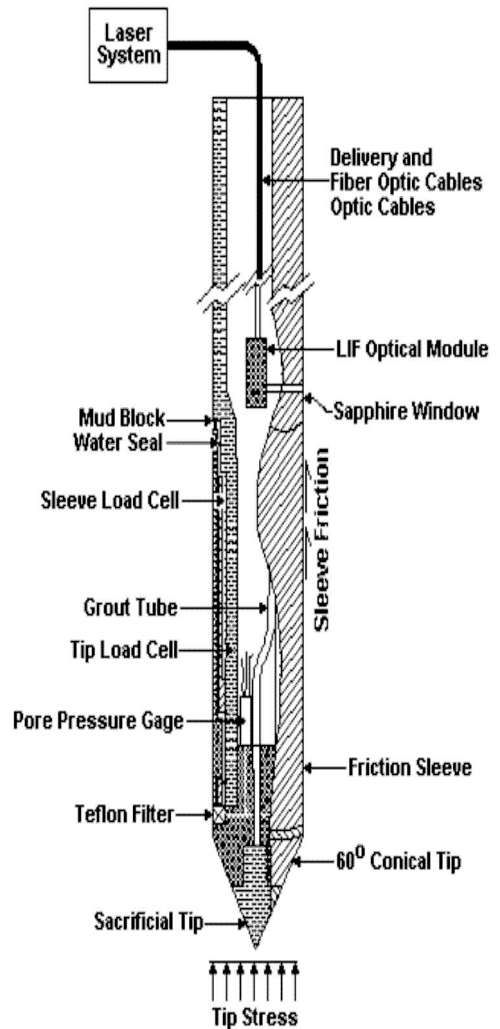


Figura 17. Cono LIF

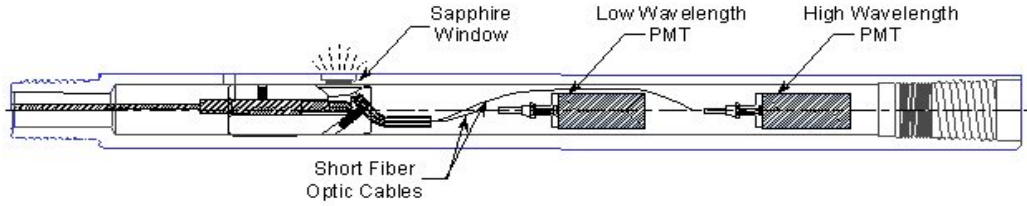


Figura 18. Cono FFD con doble fuente

### Detección de Hidrocarburos por Fluorescencia Inducida

Los hidrocarburos son uno de los contaminantes más comunes en los suelos y la mayoría de ellos, por sus constituyentes poliaromáticos producen fluorescencia cuando son irradiados por distintas formas de luz. En los últimos años se han diseñado conos con distintos tipos de fuentes como laser (LIF, Figura 17) y luz ultravioleta (FFD, Figura 18).

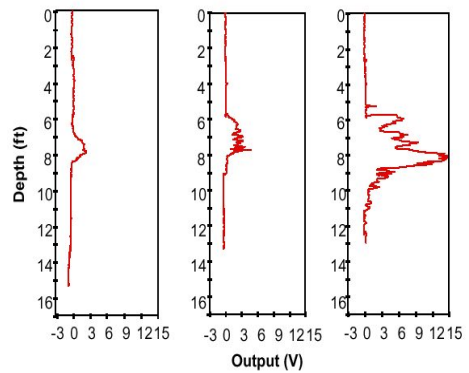


Figura 20. Resultados de tres ensayos con cono FFD en el que se aprecia la distribución de la pluma de contaminación

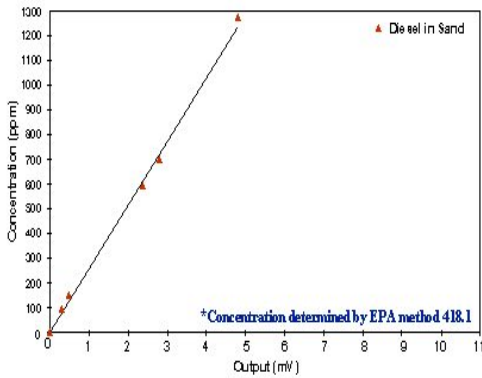


Figura 19. Calibración de sensor en laboratorio

Los captadores deben ser calibrados en laboratorio para poder obtener una información cuantitativa en ppm del contaminante, Figura 19. Un ejemplo de tres ensayos en los que se puede observar la distribución de la pluma de contaminación se presenta en la Figura 20.

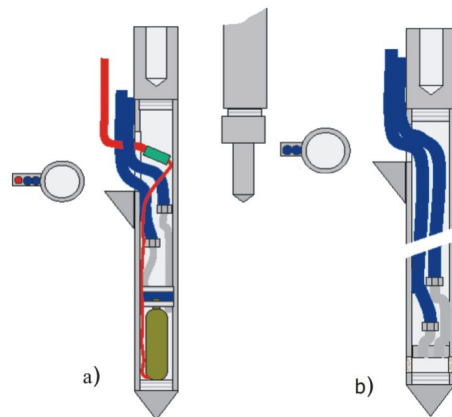
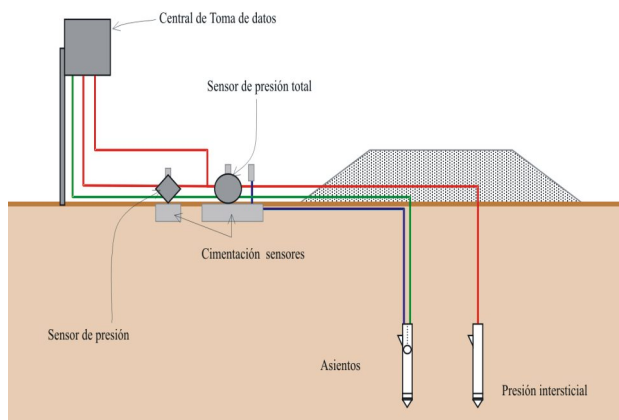


Figura 21. a) células de asiento hidrostáticas. b) piezómetros. Cortesía NGI.

## CPTU E INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA

La técnica de hinca estática puede ser de gran utilidad en la instalación de instrumentos tales como piezómetros (push-in piezometers) o células de asiento hidráulicas en suelos blandos. En la Figura 21 se presentan sensores especialmente diseñados para la hinca mediante un penetrómetro CPT. En la Figura 22 se observa la disposición general para la monitorización de un terraplén con estos equipos.



**Figura 22.** Auscultación de un terraplén con sensores instalados por hinca estática con penetrómetro CPT

## BIBLIOGRAFÍA

- Butler, J.J. Jr; Lanier, A.A.; Healey J.M.; Sellwood, S.M.; McCall, W y Garnett, E., 2000. Direct-Push Hydraulic Profiling in an Unconsolidated Alluvial Aquifer. Kansas Geological Survey, Open-file Report 2000-62
- Colàs, S., 2003. Aplicacions Geoestadístiques en la Construcció de Models Tridimensionals Caracterització Sedimentològica del subsòl de la Nova Depuradora del Riu Llobregat. Dept. Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines, Facultat de Geologia, Universitat de Barcelona.
- Devincenzi, M y Gómez, R., 1996. El Ensayo de Penetración Estática (CPT) y el Piezocono (CPTU). Ingeopres n° 36.
- Devincenzi, M.; Colàs, S. y Falivene, O., 2003. High Resolution Stratigraphy and Detailed Sedimentology Study of Llobregat Delta (Barcelona) from CPT/CPTU tests". International Conf. On Site Characterization (ISC'2), Porto, Portugal. Preprint.
- Environmental Protection Agency, EPA, 1997. Report 542 R97 011 Field Analytical and Site Characterization Technologies Summary of Applications.
- Environmental Protection Agency, EPA, 2001. Report 542 F01 030b. Resources for Strategic Site Investigation and Monitoring.
- Jiménez Salas, J.A., Justo, J.L. y Serrano, A., 1981. Geotecnia y Cimientos II. Ed. Rueda, Madrid.
- Pluimgraaff, D; Braton, W.L. y Hilhorst, M., 1995. CPT Sensors for Bio-Characterization of Contaminated Sites. Proc. International Symp. on Cone Penetration Testing, CPT'95. Linköping, Suecia.
- Roberston, P.K.; Campanella, R.G.; Gillespie, D y Greig, J. 1986. Use of Piezometer Cone Data. Proc. Specialty Conf. In Situ'86: Use of in situ Tests in Geotech. Eng. Blacksburg, American Soc. Of Eng. (ASCE).
- Tortenson, B.A., 1984. A New System for Groundwater Monitoring. Ground Water Review, 4(4) 131-8.
- Worth, C.P., 1984. The Interpretation of In Situ Soil Tests. Géotechnique, Vol 34, n° 4.