

## DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA SONDA ELÉCTRICA DE MEDIDA DE CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

C. Solsona<sup>1</sup>, M. Neto<sup>2</sup>, M. Ibañez<sup>1</sup> y J. I. Rosell<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. Medi Ambient i Ciències del Sòl - Universitat de Lleida (España) email: j.i.rosell@macs.udl.es

<sup>2</sup> Escola de Agronomia - Universidade Federal de Goiás (Brasil)

**RESUMEN.** El objetivo de este trabajo fue construir una sonda que pudiese medir la cantidad de agua en el suelo con cierta precisión, con bajo coste y fuera sencilla de construir para uso en distintos proyectos del departamento. Estos proyectos requerían instrumentos para cubrir amplias zonas del terreno, como por ejemplo una cuenca, por lo que era necesario un elevado número de sensores que por su coste hacia inviable su compra. En el diseño de la sonda dadas las especificaciones nos decantamos por el uso de un pequeño circuito oscilante en el que sustituimos uno de los condensadores de sintonía por dos barras que se introducen en el suelo y que regulan la frecuencia de oscilación del dispositivo en función del contenido de agua. A partir de aquí se realizó el protocolo de construcción o reproducibilidad de la sonda así como la calibración en condiciones estándares y las variaciones de esta calibración respecto la temperatura, salinidad, contenido en arcilla y materia orgánica destinado a aquellos estudios que requieran medidas de más precisión. Para determinar la validez de las diferentes ecuaciones fueron realizados dos tests estadísticos el t de Student y F de Fischer. Como valores de referencia fueron tomados los conseguidos por el método TDR utilizando el dispositivo 1502c de Tektronics

**ABSTRACT.** The objective of this study was to develop and test, an accurate soil water content probe. The new probe to be cheaply and easily made because a large number of them were needed for different purposes. The monitorization of the soil moisture over a river basin was an example. The design of the instrument was based in a small oscillating circuit. One condensator of the circuit was substituted by two parallel rods. When these rods are knocked in the soil, its water content controls the oscillations of the system. The standardisation and calibration of the probes was studied. The calibrations obtained were function of temperature, salinity, clay and organic matter soil content. The validation of these relationships was done applying Student and Fischer statistical tests. The reference values to evaluate the performance of the probes were obtained by the TDR method using the 1502 Tektronix equipment.

### 1.- Introducción:

En el desarrollo de trabajos de seguimiento, inventariado y estudio dinámico de amplias zonas de

terreno es necesario el uso de un alto número de estaciones de medida, en general cuantas mas mejor, con el objetivo de tener una idea cuanto mas próxima a la realidad del terreno. Esto implica el de disponer de un elevado numero de sensores que puedan ser conectados a un dataloger multiplexado. En concreto la medida de contenido de agua del suelo es una medida común en casi todos los trabajos extensivos de campo en el ámbito medioambiental. Es por esta razón que nos decidimos ha desarrollar un protocolo de construcción y la calibración de una sonda sencilla, robusta y barata (Solsona, 2001), para que se pueda construir con distintos componentes comerciales y obtener unos resultados con una precisión suficiente para ser válidos dentro de un estudio de campo (De la Fuente 2000).

La conexión con un dataloger convencional implica la necesidad de que la señal de salida del dispositivo sea de una frecuencia relativamente baja inferior a 16 kHz comparada con la frecuencia optima de trabajo que es de 10 MHz (Gadner et al.,1998), por este motivo se incluyó en el esquema un dispositivo divisor de frecuencia.

Una vez diseñada y montada la sonda se realizo el protocolo de construcción y calibración por el que se intentó establecer cuales eran las acciones a realizar y ha tener en cuenta para la generalización del montaje y uso de la sonda.

La calibración de la sonda se realizó a partir de la frecuencia adimensional para eliminar de esta variable todas las dependencias que interferían en el sistema temperatura y salinidad fundamentalmente.

### 2.- Material y Métodos

#### 2.1 Sonda

La sonda desarrollada es muy simple, consta de un oscilador de la familia del 555 en el que el condensador que regula la frecuencia de oscilación ha sido sustituido por dos varillas que se insertan en el suelo y que produce una variación de la frecuencia en función del medio donde las barras están insertadas El oscilador puede operar con tensiones de +5V hasta +18V (Coughlin et al., 1993) La frecuencia de trabajo es de 2MH-500kH, para la frecuencia de lectura sea mas baja se utiliza un divisor de frecuencia el 74HC4060 que tiene 16 terminales de salida y convierte la señal en una rango de 140- 400 Hz. En el circuito impreso contiene también, además de diferentes resistencias y condensadores de filtrado, un estabilizador

7808 que regula la tensión interior a 8V independientemente de la tensión de alimentación, característica que es muy interesante para la alimentación de la sonda por una batería.

Las varillas utilizadas tienen 20 cm de longitud y 4 mm de espesor, y están unidas directamente al circuito impreso, siendo la longitud total de la sonda de 25 cm, 5,5 cm de anchura y 3,0 cm de altura.

## 2.2 Lecturas

Las varillas que están insertadas en el suelo actúan como un condensador que varía su capacidad en función del valor de la permitividad global del suelo. La constante dieléctrica del agua es 80 y de la mayor parte de los materiales que forman la matriz del suelo está entre 3 y 5 (Tilló, 1995), así pues la permitividad media de la muestra será altamente modificada por la cantidad de agua que contenga. Las lecturas dependen de la constante dieléctrica del suelo que varía según el grado de humedad.

Las lecturas con las que se hizo la calibración fueron realizadas en el laboratorio sobre unas muestras de diferente tipo de suelo y humedad. Posteriormente se realizó un conjunto de lecturas en campo en condiciones de trabajo estándar para validar el resultado de la calibración.

Los datos obtenidos con la sonda fueron comparados con las lecturas de contenido de agua y salinidad tomadas con el TDR que se consideró como método de referencia y que se basó para hacer la calibración. En cada muestra de suelo se realizaron dos repeticiones para cada lectura con el TDR y la sonda. Con los resultados obtenidos se pasó a calcular la regresión lineal para verificar cual de las dos variables tenía mayor influencia en las lecturas.

Para obtener lecturas adecuadas, se comprobó que es importante que se mantenga el paralelismo de las dos barras, y que la sonda se clave hasta el fondo sobre agujero nuevo no utilizado con anterioridad (Solsona, 2001), si no se cumple estas condiciones se dan lecturas erróneas.

## 2.3 Tipos de Suelo

Se eligió cinco tipos de suelo de diferente clase textural y diferentes propiedades físicas (cantidad de arcilla, limo, arena y materia orgánica) que pudieran afectar las lecturas de frecuencia con la sonda pero que fueran representativas del medio agrícola. Los tipos elegidos: Franco, Franco Arcilloso, Franco Limoso, Franco Arenoso y Arenoso, los cuales fueron localizados en un mapa de suelo de la provincia de Lleida con escala de 1:25.000 (Sastrón y López, 1997), y en todas las muestras se realizó un análisis textural para caracterizarlas.

El segundo paso fue la preparación de las muestras de suelo utilizadas, que consistió en tamizar las muestras con un tamiz de 2 mm de diámetro para separar los restos vegetales, los elementos gruesos y los agregados; después de tamizadas fueron secadas en una estufa a 105°C durante 24 horas. Cuando las muestras estuvieron preparadas se pusieron en recipientes de plástico de 1,5 litros. Se montaron cinco muestras en cinco recipientes diferentes para cada tipo de suelo con cantidades de agua distintas y

se realizaron dos lecturas para cada muestra. Se utilizó agua destilada para humedecer las muestras para no alterar su salinidad. Después de ser humedecidos los recipientes, fueron cerrados con una tapa de plástico para evitar que el agua se evaporase.

## 2.4 TDR:

El método de medida utilizado como referencia fue el TDR siendo el dispositivo de medida el Tektronix 1502C Metallic Time Domain Reflectometer que emite impulsos con un flanco de entrada de frecuencia de aproximadamente 1 GHz y una amplitud de 225 milivolts. Todas las lecturas hechas con el TDR fueron realizadas con una única sonda para mantener la uniformidad. Se utilizó también el programa WinTdr de la Universidad de Utha (Or et al., 1998), para realizar las lecturas de manera que se elimine el carácter aleatorio de determinación del contenido de agua. Mediante el TDR se obtuvieron también las medidas de conductividad eléctrica de las muestras.

## 2.5 Tratamiento Estadístico:

Para obtener la relación entre la frecuencia y la cantidad de agua tendrá que tener en cuenta todas las variables de influencia; por ello utilizamos dos métodos estadísticos: la regresión y la estimación lineal. La estimación lineal nos permite saber si existen diferencias entre los resultados reales y los teóricos, dichos resultados obtenidos se analizaron con el test de Fischer (F) y el test de student (t) a través de las respectivas tablas.

La regresión lineal también nos muestra la importancia de cada variable en relación con la frecuencia. A través de los tratamientos estadísticos pudimos observar cual era la variable que más afectaba a las lecturas y así desarrollamos una ecuación de calibración para saber la cantidad de agua con una mayor precisión. Las variables observadas fueron: cantidad de agua, salinidad, frecuencia en corto circuito y la temperatura.

## 2.6 Tiempo de estabilización.

La sonda en el inicio de estar conectada nos da una frecuencia elevada, que a través del tiempo va disminuyendo hasta llegar a una lectura de corto circuito estable, para saber el tiempo de estabilización, se realizó una lectura cada 10 segundos y se realizó la gráfica del resultado. A partir de este tiempo dado de estabilización podemos saber el tiempo necesario que tiene que transcurrir desde que la sonda se conecta hasta que está disponible para realizar lecturas fiables.

## 2.7 Tensión de trabajo.

La sonda está compuesta de un estabilizador, LC 7808 que mantiene la tensión de entrada en 8 V permitiendo que la sonda trabaje en un intervalo de tensiones de 10-14 V, asegurando de esta forma lecturas fiables cuando utilizamos como fuente de alimentación una batería. Para

comprobar este punto se midió la lectura de la sonda en cortocircuito para diferentes potenciales dentro del intervalo comentado, no obteniendo diferencias significativas en las lecturas.

## 2.8 Consumo de la Sonda

El test de consumo fue realizado con una sonda en corto circuito con un amperímetro conectado en serie con la fuente de alimentación y la sonda para medir la intensidad. Las lecturas fueron realizadas en intervalos de 1V. Con este procedimiento se puede saber la intensidad de consumo en cada tensión de trabajo.

## 2.9 Dependencia de las lecturas con la temperatura

Como ya se ha descrito la lectura de la sonda esta influenciada por algunas variables, las cuales fueron estudiadas para realizar una ecuación calibración que transforma las lecturas de frecuencia (Hz) en contenido volumétrico de agua ( $m^3/m^3$ ).

Para verificar la influencia de la temperatura, colocamos la sonda en corto circuito y la pusimos en una estufa de secado a una temperatura inicial de 20° C y realizamos la primera lectura. Posteriormente aumentamos la temperatura en 5° C cada vez y esperábamos un tiempo para que se estabilizara la temperatura antes de realizar la lectura. Este procedimiento fue repetido hasta conseguir una temperatura de 50° C.

## 2.10 Dependencia de las lecturas con la conductividad eléctrica

Para verificar el efecto de la salinidad, utilizamos una muestra de agua destilada a la que fuimos añadiendo sal común para aumentar la conductividad haciendo las lecturas para las distintas salinidades. Las lecturas se realizaron con la sonda objeto de estudio y el TDR como valor de referencia. La temperatura de trabajo fue 23 °C.

## 2.11 Reproducibilidad

Uno de los objetivos principales del trabajo era determinar que parámetros, elementos y detalles del montaje eran necesarios tener presente en la construcción de la sonda para que la calibración determinada sea extensible a todas las sondas construidas.

Para encontrar estos elementos determinantes se construyeron cuatro sondas idénticas utilizando material comercial y se procedió a la comparación mediante correlaciones de las medidas realizadas por las diferentes sondas sobre idénticas muestras.

## 2.12 Encapsulamiento

Finalmente se procedió a la determinación de la afectación producida por el encapsulamiento de la sonda. Este proceso se llevo a cabo comparando las lecturas de las sondas encapsuladas con las lecturas de las sondas no encapsuladas, realizando las gráficas de correlación 1:1 y

comparando la pendiente de la recta de regresión que interpolan los valores con el valor teórico que ha de ser la unidad.

## 3.- Resultados y discusión

Del conjunto de medidas realizadas con la sonda en las diferentes condiciones descritas en el punto anterior las dependencias con la temperatura y la salinidad de la muestra son las más relevantes. En la figura 1 se observa la variación de la frecuencia de cortocircuito de la sonda con la temperatura. La dependencia es una dependencia lineal con pendiente negativa y un coeficiente de determinación de 0.99 que refleja un comportamiento muy determinista con respecto esta magnitud.

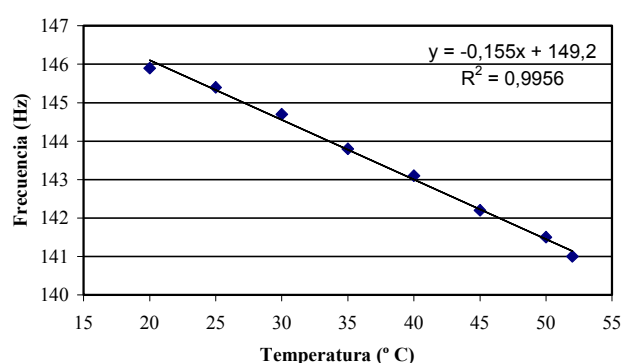


Figura 1: Efecto de la temperatura en la frecuencia de C.C.

La dependencia de la frecuencia con la salinidad de la muestra es descrita en la figura 2 que han sido adquiridas siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 2.10. Se observa una fuerte dependencia de la lectura con esta magnitud cosa que de antemano ya se podía prever ya que la presencia de una conductividad elevada en el medio de medida representa que las dos barras que realizan funciones de armaduras del condensador están cortocircuitadas. De los resultados mostrados en esta figura hace falta resaltar que para valores de la conductividad eléctrica superiores a 1,5  $dS m^{-1}$  las lecturas de la sonda se pueden considerar no válida, esto implica que la sonda no puede emplearse para terrenos en que la conductividad eléctrica a saturación sea mayor a ese valor.

En vistas de reducir la dependencia con las diferentes magnitudes que influyen la lectura de la sonda se definió una frecuencia adimensional  $f_{sd}$  de la siguiente forma:

$$f_{sd} = \frac{f - f_0}{f_s - f_0 + f_r}$$

Donde  $f$  es la frecuencia medida

$f_0$  es la frecuencia de cortocircuito

$f_s$  es la frecuencia de saturación y

$f_r$  es la frecuencia de referencia que se determina

experimental y que permite eliminar la discontinuidad que aparece en el caso en que la frecuencia de cortocircuito sea igual a la frecuencia de saturación.

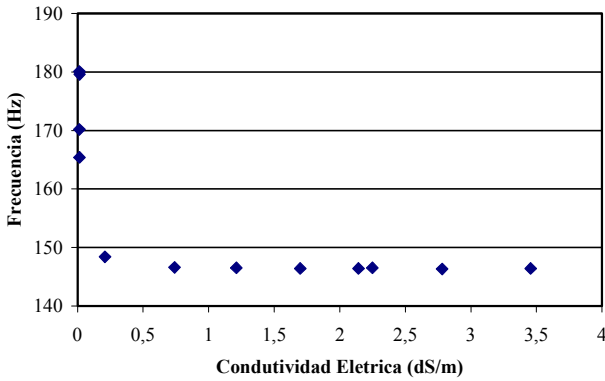


Figura 2: Efecto de la salinidad en la frecuencia de C.C.

En la calibración de la sonda fue usada esta magnitud adimensional como variable independiente para determinar finalmente el contenido volumétrico de agua.

### 3.1 Ecuación de calibración

Utilizando las diferentes muestras de los cinco tipos de suelo comentadas en el apartado 2.3 y utilizando la sistemática descrita en el punto 2.2 se obtuvieron las lecturas de 50 puntos experimentales que se pasamos a realizar las diferentes pruebas estadísticas:

Primeramente obtuvimos la ecuación de calibración de la figura 3. Donde se muestra el logaritmo del contenido de agua en función de la frecuencia adimensional definida en la ecuación 1 utilizando un valor de  $f_r = 0,1$  Hz. La interpolación que ha dado mejor resultado es la polinomial de tercer grado (ecuación que se muestra en la gráfica) con un coeficiente de determinación de  $r^2=0,919$ .

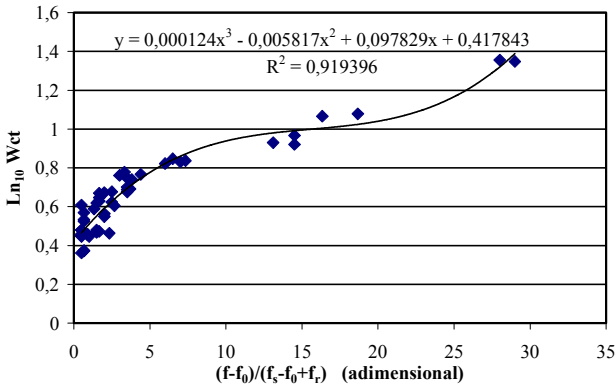


Figura 3: Calibración Logarítmica

En la figura 4 se muestra la calibración exponencial hecha sobre la gráfica que representa el contenido de agua en función de la frecuencia adimensional es una relación mas sencilla de aplicar pero que da un coeficiente de determinación mas bajo (0,847).

La adimensionalización de la frecuencia repercute satisfactoriamente en la eliminación de las dependencias de la temperatura y salinidad, este punto fue comprobado mediante los tests de Student y Fischer aplicados a una regresión lineal multivariable aplicada sobre el logaritmo del contenido de agua como variable dependiente y el

logaritmo de la frecuencia adimensional, el logaritmo de la conductividad a saturación de la muestra, la temperatura, el contenido de materia orgánica y el contenido de arcilla de la muestra como variables independientes. Los resultados de los tests estadísticos dieron que todas las variables comentadas eran no significativas a excepción de la frecuencia adimensional. También se comprobó que no había diferencias significativas entre las calibraciones obtenidas para las diferentes clases texturales.

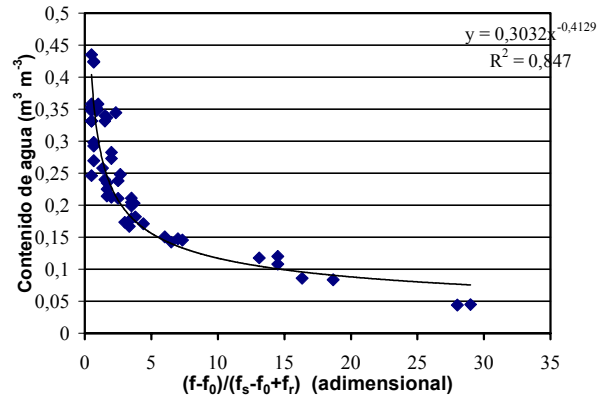


Figura 4: Calibración Exponencial

### 3.2 Reproducibilidad

La figura 5 muestra los resultados de la comparación realizada sobre dos de las diferentes sondas realizadas para determinar el protocolo de construcción.

En la práctica se observó que las diferentes versiones de la sonda tenían diferentes frecuencias de oscilación estándar que se reflejaba en diferentes frecuencias de cortocircuito. Ahora bien los beneficios del uso de variables adimensionales afecta también en este ámbito de tal forma que al utilizar la frecuencia adimensional no hay diferencia significativa entre las diferentes versiones de sondas construidas, lo que representa que el protocolo de construcción únicamente queda reducido al uso de los materiales comerciales especificados en el diseño de la sonda conjuntamente con el uso de la calibración adimensional que aparece en la figura 3

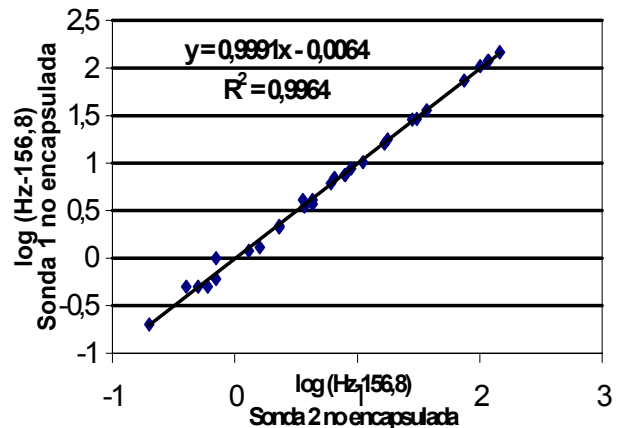


Figura 5: Reproducibilidad

De la misma forma la figura 6 muestra una de las gráficas obtenidas de comparar una sonda encapsulada con una sonda sin encapsulamiento tal como se describe en el apartado 2.12. En esta fig al igual que la figura 5 se observa que la correlaciones obtenidas son francamente aceptables porque se ajustan bastante bien a la recta 1:1.

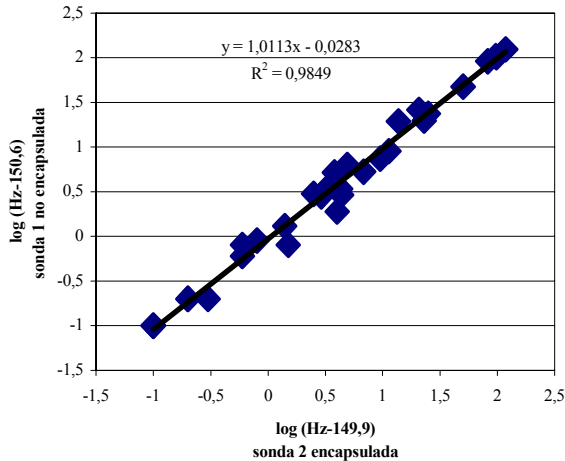


Figura 6: Comparación de una Sond encapsulada con una no encapsulada

### 3.3 Caracterización física de la sonda

Finalmente a la sonda se le realizaron una serie de pruebas para tenerla caracterizada totalmente. Estas pruebas fueron: determinación del tiempo de estabilización, del potencial de trabajo y el consumo eléctrico de la sonda

El tiempo de estabilización de la sonda después de ser conectada mostró una gran importancia para la obtención de medidas fiables porque la frecuencia de corto circuito es una variable esencial para la formación de la ecuación de estabilización. (figura 7).

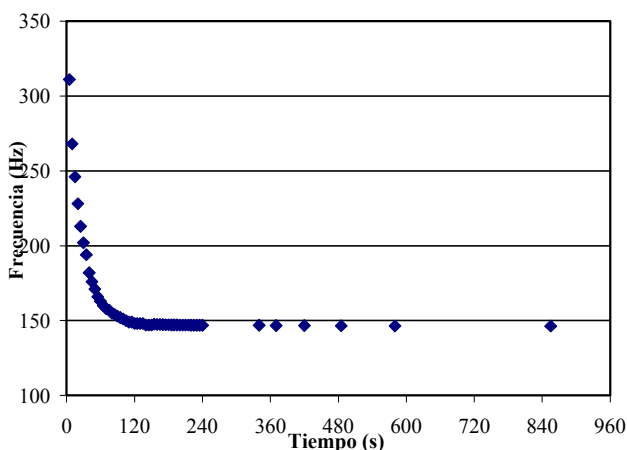


Figura 7: Tiempo de estabilizacion de la sonda en C.C.

Sobre el consumo de la sonda se puede decir que este es bajo de aproximadamente 12 mA y que por lo tanto implica que alimentada por una batería tenga esta tenga

una elevada autonomía. La tensión de trabajo requerida es de 10 a 14 V, este intervalo esta limitado por el dispositivo que estabiliza la tensión a 8 V, manteniendo la frecuencia constante con distintas tensiones de trabajo. Concluimos que no se puede trabajar con tensiones menores de 10 V, por que no se obtiene una tensión interna de 8 V, no consiguiendo buenas lecturas. Por encima de 14 V, se puede producir el deterioro físico del circuito cosa que no es probable que pase ya que las tensiones en una batería de 12 V nominales la tensión máxima es de 13,8 V. El consumo se estabiliza cuando se utilizan tensiones por encima de los 10 V como se aprecia en el gráfico siguiente (figura 8).

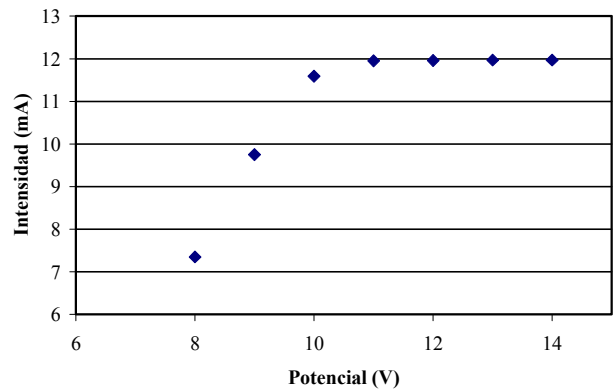


Figura 8: Consumo de la sonda para distintas tensiones

### 4.- Conclusiones

De los datos aportados se puede concluir que el uso de la frecuencia adimensional ha significado un avance importante en la calibración de la sonda y que ha permitido eliminar las dependencias de la temperatura y la salinidad de la calibración final. La sonda diseñada es una sonda sencilla, económica y de fácil construcción. Como se ha realizado el protocolo de construcción su duplicación y la validez de la calibración realizada para otros dispositivos también ha estado demostrado. El consumo de la sonda es bajo por lo que no aporta problemas de alimentación en campo. El único inconveniente que se puede derivar en usos determinados es el largo periodo de estabilización necesario para la realización de la primera lectura después de la conexión a la alimentación eléctrica. Para acabar de comprobar la solidez de las medidas realizadas de la sonda conviene realizar una extensa validación en campo utilizando si puede ser un método de medida continuo o comandable con dataloger.

### 5.- Bibliografía

Coughlin, F.R. & Driscoll, F.F., "Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales" (Cuarta edición). Penitence-Hall Hispanoamericana, S.A. México 1993.  
 De la Fuente Plana, Albert, "Monitorización continua del flux d'agua en sòls de vessants forestals: metodologia i mesura" PFC.ETSEA-UdL. Lleida 2000.

- Gardner et al, "Soil physics measurements". Ed. Catena Verlag. Germany 1999.
- Tilló Torres, J., "Avaluació del reg a pulsos en taules a la zona del Canal d'Urgel i estudi d'una sonda de TDR per mesurar el contingut d'aigua del sòl". PFC ETSEA- UdL. Lleida 1995.
- OR et al, "WinTDR 98 V4.0 – Users Guide-(USU soil Physics Group)". Utah State University – Plants, Soils, & Biometeorology. Logan 1998.
- Sastrón, E. A. & López, J.M., "Mapa de sòls detallat(E. 1:25000) de les terrasses baixes del segre i noguera ribagorçana". Secció d'avaluació de recursos i noves tecnologies (DARP). Lleida 1997.
- Solsona Codorniu C. "Construcció i calibració d'una sonda electrònica destinada a al mesura del contingut d'aigua del sòl." TFC.ETSEA-Udl. Lleida 2001.