

## Technical note / Nota Técnica

### In situ calibration of two FDR gauges under saline soil conditions in the hyperarid of Chile

Calibración *in situ* de dos sondas FDR bajo condiciones de suelo salino en el hiperárido de Chile

Calibração in situ de dois medidores FDR sob condições do solo salino, no hiper árido do Chile

Cristián Kremer Fariña\*, Rodrigo Candia Antich, Ian Homer Bannister y Oscar Seguel Seguel

Coll. Agronomic Scs, University of Chile, Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago, Chile.  
Postal code 8820808. E-mail: (CK) [ckremer@uchile.cl](mailto:ckremer@uchile.cl), ; (RC) [rcandia87@gmail.com](mailto:rcandia87@gmail.com),  (IH); [ihomer@uchile.cl](mailto:ihomer@uchile.cl), ; (OS) [oseguel@uchile.cl](mailto:oseguel@uchile.cl) .

#### Abstract

A calibration method was developed for two FDR sensors (GS3 and POGO) in saline soil conditions with predominantly fine textures and electrical conductivities that fluctuate between 4.4 and 16.5 dS.m<sup>-1</sup>. The methodology included the use of infiltration trenches and the recording of the variation of the water content over time. The results showed that there is an overestimation of  $\theta$  as a function of the salt content. The standard error obtained with the manufacturer's calibration was 0.09 and 0.19 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup> for GS3 and POGO, respectively. After calibration, the standard error decreased to 0.04 and 0.05 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, respectively. The R<sup>2</sup> of the calibration equations for GS3 and POGO were 0.94 and 0.86 respectively, not being necessary a differentiated calibration by salinity ranges. The GS3 sensor performed better than the POGO in the salinity conditions encountered. Keywords: soil water content, dielectric permittivity, soil salinity, dielectric constant.

#### Resumen

Se desarrolló un método de calibración para dos sensores FDR (GS3 y POGO) en condiciones de suelo salino con texturas predominantemente finas y

Received: 01-10-2020 • Accepted: 20-11-20.

\*Corresponding autor. Email: [ckremer@uchile.cl](mailto:ckremer@uchile.cl)

conductividades eléctrica que fluctúan entre 4,4 y 16,5 dS.m<sup>-1</sup>. La metodología contempló el uso de zanjas de infiltración y el registro de la variación del contenido del agua en el tiempo. Los resultados mostraron que existe una sobreestimación del en función del contenido de sal. El error estándar obtenido con la calibración del fabricante fue de 0,09 y 0,19 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup> para GS3 y POGO, respectivamente. Después de la calibración, el error estándar disminuyó a 0,04 y 0,05 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, respectivamente. El R<sup>2</sup> de las ecuaciones de calibración para GS3 y POGO fueron 0,94 y 0,86 respectivamente, no siendo necesaria una calibración diferenciada por rangos de salinidad. El sensor GS3 funcionó mejor que el POGO en las condiciones de salinidad encontradas.

**Palabras claves:** contenido de agua del suelo, permisividad dieléctrica, salinidad del suelo, constante dieléctrica.

## Resumo

Este trabalho focou em a calibração de dois sensores FDR (GS3 e POGO) em condições de solo salino em três olivais do Vale de Copiapó, no hiper árido do Chile (27,5°S), com texturas predominantemente finas e valores de condutividade eléctrica que flutuam entre 4.4 e 16.5 dS.m<sup>-1</sup>. A metodologia contemplou o uso de valas de infiltração e o registro da variação do conteúdo da água no tempo. Os resultados mostraram que existe uma sobre estimação do conteúdo de água nos solos salinos dependendo do teor de sal. O erro estándar obtido com a calibração do fabricante com respeito aos valores reais de  $\theta$  foi de 0.09 e 0.19 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup> para GS3 y POGO, respectivamente. Depois da calibração, o erro estándar diminuiu a 0.04 e 0.05 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, correspondentemente. O R<sup>2</sup> das equações de calibração para GS3 e POGO foram 0.94 e 0.86 respectivamente, sem necessidade de uma calibração diferenciada por faixas de salinidade. O sensor GS3 funcionou melhor que o POGO, nas condições de salinidade encontradas.

**Palavras chaves:** conteúdo de água do solo, permissividade dieléctrica, salinidade do solo, constante dieléctrica.

## Introduction

Indirect estimations of the soil's water content ( $\theta$ ), based on the variation of its dielectric permittivity ( $\epsilon_a$ ), particularly the dielectric constant ( $K_a$ ), have proven to be successful as a tool to establish a more efficient irrigation schedule (Callejas *et al.*, 2014).

## Introducción

Estimaciones indirectas del contenido de agua del suelo ( $\theta$ ), basadas en la variación de su permisividad dieléctrica ( $\epsilon_a$ ), particularmente la constante dieléctrica ( $K_a$ ), han demostrado su eficacia como una herramienta para establecer un programa de riego más eficiente (Callejas *et al.*, 2014).

Among the methods available to estimate  $\theta$ , Frequency Domain Reflectometry (FDR) provides measurements, by means of an electromagnetic wave that is transmitted along probes and records the frequency of the reflected wave, which depends on the capacitance of the medium where the probe is located, which is directly related to the  $\epsilon_a$  of the soil (Sevostianova *et al.*, 2015). Later, the value of water content present in the soil is estimated using the model proposed by Topp *et al.* (1980):

$$\theta = 4,3 \times 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon_a - 5,3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

This method works properly for most of the mineral soils. However, one of the greatest restrictions on the use of this technology is the content of salts, since soils rich in salts or with a high ionic charge (ex: Clay soils) can produce significant ionic and dielectric losses, over estimating the value of  $\epsilon_a$  and  $\theta$  (Sevostianova *et al.*, 2015, Ojo *et al.*, 2015).

In recent years there has been an increase in soil water monitoring technologies that lead to improving the scheduling of micro-irrigation systems, but the low quality of irrigation water has led to soil salinization, which that affects the operation and calibration of these technologies. In this context, the main objectives of this research were: (1) to evaluate the accuracy in field of two FDR sensors used in salty soils, by comparing the soil moisture output from their factory default calibration with the volumetric water content determined using the thermogravimetric method, and (2) to develop a calibration equation for each sensor to operate correctly in these salty soils.

Entre los métodos disponibles para estimar  $\theta$ , se encuentra la Reflectometría de Dominio de Frecuencia (FDR), la cual proporciona medidas por medio de una onda electromagnética que se transmite a lo largo de las sondas y registra la frecuencia de la onda reflejada, la cual depende de la capacitancia del medio donde se encuentra la sonda, lo cual está directamente relacionado al  $\epsilon_a$  del suelo (Sevostianova *et al.*, 2015). Posteriormente, se estima el valor del contenido del agua presente en el suelo utilizando el modelo propuesto por Topp *et al.* (1980):

$$\theta = 4,3 \times 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon_a - 5,3 \times 10^{-2} \quad (1)$$

Este método funciona correctamente para la mayoría de los suelos minerales. Sin embargo, una de las mayores restricciones sobre el uso de esta tecnología es el contenido de sales, ya que los suelos ricos en sales o con una alta carga iónica (ej: Suelos arcillosos) pueden producir pérdidas iónicas y dieléctricas significantes, sobreestimando el valor de  $\epsilon_a$  y  $\theta$  (Sevostianova *et al.*, 2015, Ojo *et al.*, 2015).

En los años recientes ha habido un incremento en las tecnologías de monitoreo de agua en el suelo que llevan a el mejoramiento del horario de los sistemas de micro-riego, pero la baja calidad del agua de riego ha conllevado a la salinización del suelo, lo cual afecta la operación y la calibración de estas tecnologías. En este contexto, los objetivos principales de esta investigación fueron: (1) Evaluar la precisión

## Materials and methods

### Sites

The study was carried out in the Copiapó Province, Atacama Region, Chile, in three olive orchards, called “La Castellana” (27°19'00”S and 70°35'00”W), “Mallorquina” (27°20'00” S and 70°34'00”O) and “Vasangel” (27°18'00”S and 70°27'00”W). The climate of the area is low marginal desert type. The dominant soils are Aridisols, derived from deposits of the Copiapó River.

### Sites Characterization

A description was made through one pit for each site. Particle size distribution, bulk density by core method, and particle density by pycnometer were determined. The samples were obtained from the pits at 3 depths (30, 50 and 80 cm) with three replicates. Additionally, electrical conductivity was determined using the saturation extract method and conductivity determination. The samples were obtained from the previously mentioned pits at 3 depths (30, 50 and 80 cm) with one replicate.

### Gauges

The gauges used were: POGO (or Hydra Probe) (Stevens Water Monitoring Systems, USA), and GS3 (Decagon Devices, USA).

### Treatments and design of experiments

#### Calibration

Three trenches 0.6 m wide, 0.8 m long and 0.2 m deep were dug in each orchard. The purpose of these trenches was to remove the

en el campo de dos sensores FDR utilizados en suelos salinos, comparando la salida de humedad del suelo de su calibración por defecto, con el contenido volumétrico de agua determinado mediante el método termogravimétrico, y (2) desarrollar una ecuación de calibración para que cada sensor funcione correctamente en estos suelos salinos.

## Materiales y métodos

### Sitios de estudio

El estudio se llevó a cabo en la provincial de Copiapó, región de Atacama, Chile, en tres huertos de olivo, llamados “La Castellana” (27°19'00”S y 70°35'00”W), “Mallorquina” (27°20'00” S y 70°34'00”O) y “Vasangel” (27°18'00”S y 70°27'00”W). El clima del área es de tipo desierto marginal bajo. Los suelos dominantes son los aridisoles, derivados de los depósitos del río Copiapó.

### Caracterización de sitios de estudio

Se realizó una descripción a través de una fosa para cada sitio. Se determinó la distribución del tamaño de las partículas, la densidad aparente por el método del núcleo y la densidad de las partículas por el picnómetro. Las muestras se obtuvieron de las fosas a tres profundidades (30, 50 y 80 cm) con tres replicas. Adicionalmente, la conductividad eléctrica se determinó utilizando el método del extracto de saturación y la determinación de la conductividad. Las muestras se obtuvieron de las fosas mencionadas

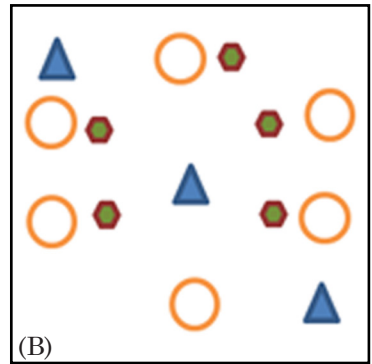
horizon of salt accumulation due to capillary ascents, and to generate a homogeneous infiltration zone (Figure 1a). Once ready they were filled once with irrigation water and the water was expected to fully infiltrate. Once this condition was fulfilled, it was waited 1 hour to carry out the first measurement (Ti1).

anteriormente a 3 profundidades (30, 50 y 80 cm) con una réplica.

### Sensores

Los sensores utilizados fueron: POGO (o Hydra Probe) (Stevens Water Monitoring Systems, USA), y GS3 (Decagon Devices, USA).

### Tratamientos y diseño experimental



**Figure 1. Calibration trenches for GS3 and POGO sensors.** (a) Trenches; (b) gauge positions (triangles GS3, rhombuses POGO) and soil samples (circles thermogravimetric method).

**Figura 1. Zanjas de calibración para los sensores GS3 y POGO.** (a) Zanjas; (b) posiciones de sensores (triángulos: GS3, rombos: POGO) y muestras de suelo (método termogravimétrico: círculos).

Previously, at the bottom of each trench, three GS3 sensors were installed in a horizontal and permanent position (Figure 1b, 9 sensors per site). In the case of the POGO sensor, in each measurement periods, 5 points were recorded for each trench, introducing it perpendicular to the bottom of the trench. The soil was then allowed to dry for 12 hours and the

### Calibración

Se excavaron tres zanjas de 0,6 m de ancho, 0,8 m de largo y 0,2 m de profundidad en cada huerto. La finalidad de estas zanjas era eliminar el horizonte de acumulación de sales debido a los ascensos capilares y generar una zona de infiltración homogénea (Figura 1a). Una vez listas se llenaron con agua de riego y se esperaba que el

corresponding measurements for Ti2 were repeated, 4 more measurement periods were made following the same procedure already described, however the remaining measurement times varied according to the site, we sought to obtain data in a wide range of  $\theta$ . For each measurement period (Ti) and site, data was taken every 2 minutes, for 20 minutes and registered in a Datalogger (Em50, Decagon Devices) for GS3 and by hand for POGO.

Immediately after recording all the data from the gauges in each measurement period, a soil core sample was taken to determine its volumetric water content ( $\theta$ ) by thermogravimetry (Figure 1b).

Prior to field installation, the difference in the records between sensors of the same origin was reviewed. For both the GS3 and POGO gauges, an analysis of variance was performed with measurements in free water, where no significant differences were found for the measured parameters ( $\theta$ ,  $\epsilon_a$ ) at a significance level of 5% ( $p \leq 0.05$ ).

### Statistical analysis

A grade 3 polynomial regression was utilized to fit the Topp *et al.* (1980) equation parameters, using the permittivity outputs from the sensors as the independent variable and the thermogravimetric soil water contents as the dependent variable. The coefficient of determination ( $R^2$ ), was used to display the degree of similarity between the sensor calibration equation and soil thermogravimetric measurements. Additionally, linear regressions were adjusted where the dependent variable was the soil

agua se infiltrara completamente. Una vez cumplida esta condición, se esperó 1 hora para realizar la primera medición (Ti1).

Previamente, en el fondo de cada zanja, se instalaron tres sensores GS3 en posición horizontal y permanente (Figura 1b, 9 sensores por sitio). En el caso del sensor POGO, en cada período de medición se registraron 5 puntos por cada zanja, introduciéndolo perpendicularmente al fondo de la misma. Luego se dejó secar el suelo durante 12 horas y se repitieron las mediciones correspondientes para Ti2, se realizaron 4 períodos de medición más siguiendo el mismo procedimiento ya descrito, sin embargo, los tiempos de medición restantes variaron según el sitio, se buscó obtener datos en un amplio rango de  $\theta$ . Para cada periodo de medición (Ti) y sitio, se tomaron datos cada 2 minutos, durante 20 minutos y se registraron en un Datalogger (Em50, Decagon Devices) para GS3 y a mano para POGO.

Inmediatamente después de registrar los datos de los sensores en cada período de medición, se tomó una muestra de núcleo de suelo para determinar su contenido volumétrico de agua ( $\theta$ ) por termogravimetría (Figura 1b).

Antes de la instalación de campo, se revisó la diferencia de los registros entre los sensores del mismo origen. Tanto para los sensores GS3 como para los POGO, se realizó un análisis de varianza con mediciones en agua libre, donde no se encontraron diferencias significativas para los parámetros medidos ( $\theta$ ,  $\epsilon_a$ ), a un nivel de significancia de 5% ( $p \leq 0,05$ ).



water content obtained from the factory calibrations and from this work, and the independent variable was the soil water content obtained by thermogravimetry. Slopes were compared using Student's t test, with a 95 % confidence level. Furthermore, the standard error of estimates (SEE, equation 2) was utilized to compare the performance of the different equations to estimate the real soil water content (Thermogravimetry):

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{N}} \quad (2)$$

Where N is number of pair data (x), is the predicted soil water content and is the soil water content from thermogravimetry. As the smaller SEE is, the better it's the model performance.

## Results and discussion

### Texture, particle density and bulk density

The results showed silt contents in a wide range (29.8 % to 78 %), with a dominance of this fraction, which generates textural class soils ranging from loam to silty loam. The values obtained for the bulk density ranged between 1.07 and 1.39 Mg.m<sup>-3</sup> were lower than would be expected based on the texture class presented by the sampled horizons, especially at the Mallorquina site. The values of particle density were relatively homogeneous and high (2.73 to 2.83 Mg.m<sup>-3</sup>) compared to the reference value of 2.65 Mg.m<sup>-3</sup> indicated by Sandoval *et al.* (2012).

### Análisis estadístico

Se utilizó una regresión polinómica de 3<sup>er</sup> grado para ajustar los parámetros de la ecuación de Topp *et al.* (1980), utilizando las salidas de permisividad de los sensores como una variable independiente y los contenidos termograviméticos de agua del suelo como variable dependiente. El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), se utilizó para mostrar el grado de similitud entre la ecuación de calibración del sensor y las mediciones termogravimétricas del suelo. Adicionalmente, las regresiones lineales se ajustaron donde la variable dependiente fue el contenido de agua del suelo obtenido de las calibraciones de fábrica y de este trabajo, y la variable independiente fue el contenido de agua del suelo obtenido por termogravimetría. Las pendientes se compararon mediante la prueba T de Student, con un nivel de confianza (seguridad) del 95 %. Además, se utilizó el error estándar de las estimaciones (SEE, ecuación 2) para comparar el rendimiento de las diferentes ecuaciones y estimar el contenido real de agua del suelo termogravimetría:

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (y - \bar{y})^2}{N}} \quad (2)$$

Donde N es el número de datos pares (x), es el contenido de agua del suelo esperado, e es el contenido de agua del suelo por termogravimetría. Cuanto más pequeño sea el SEE, mejor será el rendimiento del modelo.

## Electrical conductivity in saturated extract (ECs)

The ECs values characterize these soils as saline. For all sites, the most extended values of ECs were found in the most superficial horizons, decreasing in depth. The highest ECs ranges were found in Mallorca (15.2 to 16.5 dS.m<sup>-1</sup>), followed by Vasangel (6.58 to 9, 71 dS.m<sup>-1</sup>) and La Castellana (5.83 to 7.59 dS.m<sup>-1</sup>).

## Soil water content and gauges measurements

All the measurements obtained from the sites are detailed on Table 1. It is important to notice that there is an anomaly on the results of soil water content in La Castellana site, specifically there is a value of 0.63 cm<sup>3</sup>. cm<sup>-3</sup>, which is larger than the porosity of the soil. For further analysis, it will not be considered.

Figure 2 shows  $\theta$  measured by the sensors as a function of the  $\theta$  obtained by thermogravimetry, in a 1:1 relationship. The soil water content measured by the sensors (based on factory calibration) showed a clear overestimation over the entire measurement range (Table, 1, Figure 2). Both sensors behave pretty consistent and similar on the range between 0.2 to 0.4 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, however, with larger soil water contents POGO had a larger overestimation.

Equations 3 and 4 were developed considering all the sampling periods in the different sites with the average permittivity values obtained by each sensor (Figure 3)

In this way, considering the data set of the three soils under study, the following calibration equations were obtained:

## Resultados y discusión

### Textura, densidad de las partículas y densidad aparente

Los resultados mostraron contenidos de limo en un amplio rango (29,8 % a 78 %), con una dominancia de esta fracción, lo cual genera una clase textural de suelos que van desde franco a franco limoso. Los valores obtenidos para la densidad aparente variaron entre 1,07 y 1,39 Mg.m<sup>-3</sup>, fueron inferiores a lo esperado, en función a la clase textural presentada por los horizontes muestreados, especialmente en el sitio Mallorca. Los valores de densidad de las partículas fueron relativamente homogéneos y elevados (2,73 a 2,83 Mg.m<sup>3</sup>), comparados a el valor de referencia de 2,65 Mg.m<sup>-3</sup> indicado por Sandoval *et al.* (2012).

### Conductividad eléctrica en extracto saturado (CEs)

Los valores de CEs caracterizan estos suelos como salinos. Para todos los sitios, los valores más extensos de CEs se encontraron en los horizontes más superficiales, disminuyendo en profundidad. Los rangos más altos de CEs se encontraron en Mallorca (15,2 a 16,5 dS.m<sup>-1</sup>), seguidos por Vasangel (6,58 a 9,71 dS.m<sup>-1</sup>) y La Castellana (5,83 a 7,59 dS.m<sup>-1</sup>).

### Contenido de agua del suelo y medidas de los sensores

Todas las mediciones obtenidas de los sitios se detallan en el cuadro 1. Es importante mencionar que existe una anomalía en los resultados del contenido de agua del suelo en el sitio La Castellana, específicamente existe un valor de 0,63 cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>, lo cual es



**Table 1. Measurements of volumetric water content ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) obtained from the field. Values of GS3 and Hydra Probe sensors, and direct measurement (Soil).**

**Cuadro 1. Mediciones del contenido volumétrico de agua ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ) obtenidas en el campo. Valores de los sensores GS3 e Hydra Probe, y de la medición directa (suelo).**

Site	Ti	GS3			e <sub>a</sub>			POGO			e <sub>a</sub>			Soil	
		θ ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ )			Prom	Desv	CV	θ ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ )			Prom	Desv	CV	θ <sup>(0)</sup> ( $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ )	
Mallorquina	1	0.485	0.032	6.67	28.53	4.43	15.54	0.47	0	0.98	36.29	0.47	1.3	0.35	
	2	0.477	0.046	9.64	28.1	6.03	21.46	0.38	0.06	15.01	26.15	5.06	19.34	0.38	
	3	0.448	0.043	9.66	24.61	4.8	19.51	0.49	0.05	11.11	38.86	6.35	16.33	0.3	
	4	0.359	0.039	10.81	17.27	2.55	14.79	0.33	0.04	10.89	23.05	3.37	14.63	0.27	
	5	0.31	0.041	13.3	14.39	2.24	15.61	0.3	0.02	5.97	19.68	1.46	7.39	0.23	
	6	0.276	0.021	7.53	12.55	1.01	8.08	0.23	0.02	9.38	14.39	1.51	10.51	0.22	
La Castellana	1	0.588	0.026	4.37	48.89	5.25	10.75	0.68	0.15	21.59	65.59	21.04	32.07	0.58	
	2	0.579	0.019	3.25	47.14	4.56	9.67	0.44	0.11	25.49	33.21	11.82	35.59	0.63	
	3	0.571	0.026	4.6	44.91	5.93	13.21	0.93	0.05	5.22	105.19	9.12	8.67	0.58	
	4	0.568	0.026	4.62	44.46	5.87	13.21	0.84	0.05	5.47	87.78	7.66	8.72	0.56	
	5	0.554	0.059	10.66	42.75	9.2	21.52	0.83	0.11	12.76	86.88	17.09	19.67	0.53	
	6	0.556	0.086	15.49	43.85	12.8	29.19	0.8	0.11	13.48	84.72	17.09	20.17	0.44	
Vasangel	1	0.406	0.04	9.95	20.69	3.11	15.03	0.44	0.03	6.58	32.34	3.03	9.37	0.27	
	2	0.364	0.048	13.17	17.64	3.05	17.31	0.39	0.03	7.64	27.41	2.83	10.34	0.24	
	3	0.354	0.052	14.72	17.09	3.23	18.91	0.42	0.01	2.87	31.37	1.31	4.17	0.28	
	4	0.319	0.04	12.64	14.87	2.23	15.02	0.37	0.03	7.49	25.73	2.6	10.11	0.3	
	5	0.284	0.03	10.55	13.13	1.75	13.34	0.3	0.01	2.53	19.68	0.64	3.26	0.21	
	6	0.25	0.018	7.4	11.29	0.85	7.49	0.24	0.02	10.26	15.12	1.71	11.34	0.14	

Ti: time interval; Av: average (n=9 GS3, n=15 POGO); S: standard deviation; CV: coefficient of variation.

Ti: Intervalo de tiempo; Av: promedio (n=9 GS3, n=15 POGO); S: desviación estándar; CV: Coeficiente de variación

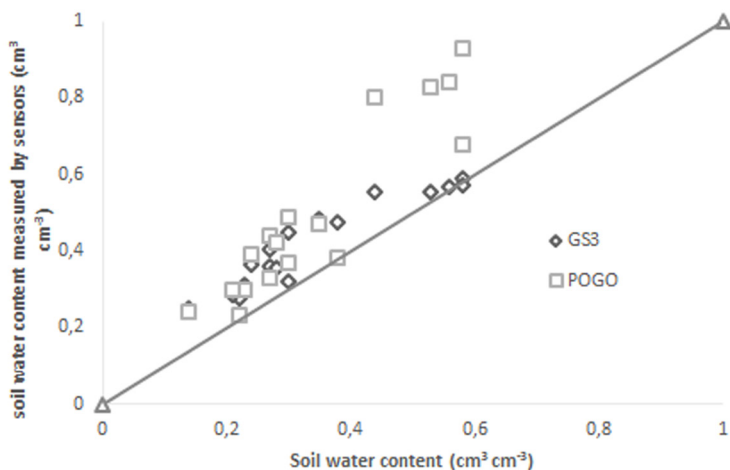


Figure 2. Average soil water content (n=9 GS3, n=15 POGO) measured by the sensors as a function of the soil water content obtained by thermogravimetry.

Figura 2. Contenido promedio de agua del suelo (n=9 GS3, n=15 POGO) medido por los sensores en función del contenido de agua del suelo obtenido por termogravimetría.

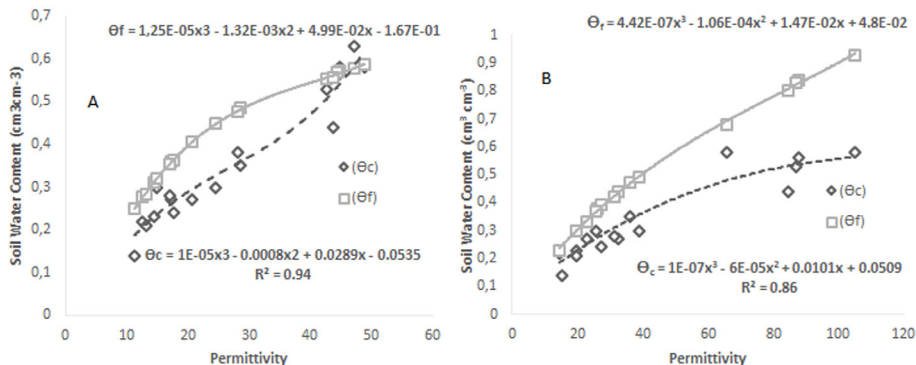


Figure 3. Soil water content curves obtained from factory calibration ( $\theta_f$ ) and the calibration from this work ( $\theta_c$ ) for the GS3 (A) and POGO (B) sensors.

Figura 3. Curvas del contenido de agua del suelo obtenidas a partir de la calibración de fábrica ( $\theta_f$ ) y de la calibración de este trabajo ( $\theta_c$ ) para los sensores GS3 (A) y POGO (B).

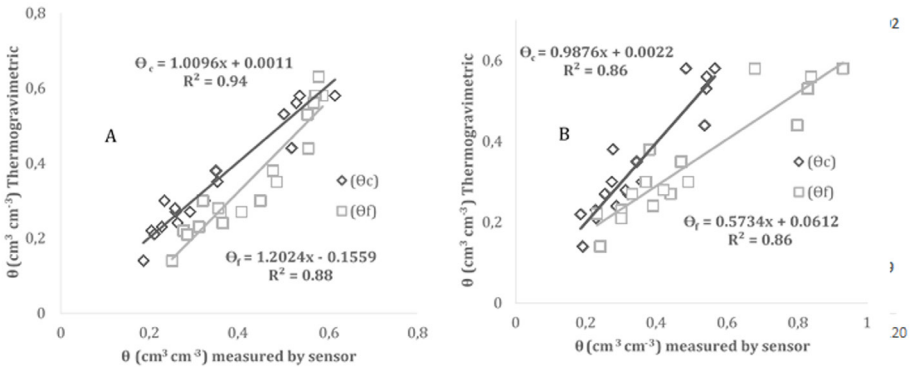


Figure 4. Relationship between the soil water contents estimated by the thermogravimetric method with the Factory calibration ( $\theta_p$ ) and the calibration equation generated with this work ( $\theta_c$ ) for the GS3 (A) and POGO (B) sensors.

Figure 4. Relación entre los contenidos de agua del suelo estimados por el método de termogravimetría con la calibración de fábrica ( $\theta_p$ ) y la ecuación de calibración generada con este trabajo ( $\theta_c$ ) para los sensores GS3 (A) y POGO (B).

$$\theta_{GS3} = 10^{-5}\epsilon_a^3 - 0.0008\epsilon_a^2 + 0.0289\epsilon_a - 0.0535 \quad (3)$$

$$\theta_{POGO} = 10^{-7}\epsilon_a^3 - 6 \times 10^{-5}\epsilon_a^2 + 0.0101 \times 10^{-3}\epsilon_a + 0.00509 \quad (4)$$

Considering the breadth of silt content and salinity levels, the sensors work well, adjusting with good performance (Figure 3) over a wide range of soil conditions. The SEE obtained with the manufacturer’s calibration with respect to the real values of  $\theta$  is 0.09 and 0.19  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  for the GS3 and POGO, respectively. The behavior of the error is different in each case: for GS3 gauge, the error increase with lower water contents, while in POGO gauge the error increase with higher water content. On the other hand, the calibration equations (3 and 4) showed high determination

mayor que la porosidad del suelo. Para el análisis posterior, no se tendrá en cuenta.

Las ecuaciones 3 y 4 se desarrollaron considerando todos los períodos de muestreo en los diferentes sitios con los valores promedio de permisividad obtenidos por cada sensor (Figura 3).

En este sentido, considerando el conjunto de datos de los tres suelos en estudio, se obtuvieron las siguientes ecuaciones de calibración:

$$\theta_{GS3} = 10^{-5}\epsilon_a^3 - 0.0008\epsilon_a^2 + 0.0289\epsilon_a - 0.0535 \quad (3)$$

$$\theta_{POGO} = 10^{-7}\epsilon_a^3 - 6 \times 10^{-5}\epsilon_a^2 + 0.0101 \times 10^{-3}\epsilon_a + 0.00509 \quad (4)$$

Considerando la amplitud del contenido de limo y los niveles de salinidad, los sensores funcionan bien, ajustándose con un buen

coefficients, varying from 0.94 to 0.86 for the GS3 and POGO respectively (Figure 3), reducing the SEE to 0.04 and 0.05  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , for the GS3 and POGO respectively. These results are similar to those obtained by Fares *et al.* (2009) who worked with an ECH2O model EC-20 sensor (Decagon Devices, Inc., Pullman WA, USA) managing to reduce the salinity error to 2 % with calibration for saline conditions.

In addition, the linear relationship between the  $\theta$  values estimated by the sensor and those estimated by the fitted model against the values obtained through thermogravimetry (Figure 4) showed different slope behavior. While the GS3, the regression slopes did not show statistical differences, the Pogo's slopes did. These results depicted a more confident performance of the GS3 gauge under saline condition. The linear adjustments of GS3 measurements in function of direct measurement, showed high significance with both, the calibration ( $\theta_c$ ,  $R^2 = 0.94$ ) and the factory ( $\theta_f$ ,  $R^2 = 0.84$ ) equations, with standard errors of 0.04 ( $\theta_c$ , similar to that found with the adjusted polynomial equation) and 0.05  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  ( $\theta_f$ ). This is interesting because of, although the linear adjustment with the calibrated values has a slope close to unity, the adjustment made with the direct values measured with the gauge, usually simpler to execute, may be an alternative to consider. In the case of the POGO, we got a similar conclusion, were  $R^2$  and SEE were close to 0.86 and 0.05  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  respectively for the two adjustments.

rendimiento (Figura 3) a una amplia gama de condiciones del suelo. El SEE obtenido con la calibración de fábrica con respecto a los valores reales de  $\theta$  es de 0,09 y 0,19  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$  para el GS3 y POGO, respectivamente. El comportamiento de error es diferente en cada caso: Para el sensor GS3, el error aumenta con contenidos de agua más bajos, mientras que en el sensor POGO, el error aumenta con contenidos de agua más altos. Por otro lado, las ecuaciones de calibración (3 y 4) mostraron altos coeficientes de determinación, variando de 0,94 a 0,86 para GS3 y POGO respectivamente (Figura 3), reduciendo el SEE de 0,04 y 0,05  $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ , para GS3 y POGO respectivamente. Estos resultados son similares a aquellos obtenidos por Fares *et al.* (2009) quienes trabajaron con un sensor ECH2O modelo EC-20 (Decagon Devices, Inc., Pullman WA, USA) consiguiendo reducir el error de salinidad al 2 % con la calibración para condiciones salinas.

Además, la relación lineal entre los valores de  $\theta$  estimados por el sensor y aquellos estimados por el modelo ajustado frente a los valores obtenidos a través de la termogavimetría (figura 4) mostró un comportamiento diferente de pendiente. Mientras que, en el GS3, las pendientes de regresión no mostraron diferencias estadísticas, las pendientes de POGO sí. Estos resultados mostraron un rendimiento más seguro del medidor GS3 en condiciones salinas. Los ajustes lineales de las mediciones del GS3 en función de las mediciones directas, mostraron una alta significancia tanto para la ecuación de calibración ( $\theta_c$ ,  $R^2$

Although both sensors overestimated the  $\theta$ , they performed reasonably well under variable conditions using factory calibration, and only POGO experienced difficulties at one of the sites. However, the estimates can be improved with local calibrations, which is of utmost importance in soils with high salt content.

## Conclusion

The results showed that there is an overestimation of  $\theta$  as a function of the salt content. When comparing the sensors of this study with the factory calibration, the GS3 sensor better represent the value of  $\theta$  in the three study sites, with a lower SEE of  $0.09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , while the POGO sensor presented a greater error in its estimation, having a SEE of  $0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Once calibrated, the sensors achieve estimations with a low SEE ranging from  $0.04$  to  $0.05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectively. The calibration equations obtained are valid for the entire range of ECs and  $\theta$  in which this study was performed. However, it must be considered for their use that they are specific for the soils of this study or others with similar characteristics and physical properties.

### End of English Version

$= 0,94$ ) como para la de fábrica ( $\theta_f$ ,  $R^2 = 0,84$ ) con errores estándar de  $0,04$  ( $\theta_c$ , similar al encontrado con la ecuación polinómica ajustada) y  $0,05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  ( $\theta$ ).

Esto resulta interesante, porque, aunque el ajuste lineal con los valores calibrados tiene una pendiente cercana a la unidad, el ajuste realizado con los valores directos medidos con el sensor, normalmente más sencillo de ejecutar, puede ser una alternativa a considerar. En el caso del POGO, obtuvimos una conclusión similar, ya que  $R^2$  y el SEE fueron cercanos a  $0,86$  y  $0,05 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  respectivamente para los dos ajustes.

Aunque ambos sensores sobreestimaron el  $\theta$ , funcionaron razonablemente bien bajo las condiciones de variable utilizando la calibración de fábrica, y solo POGO experimentó dificultades en uno de los sitios. Sin embargo, las estimaciones pueden mejorarse con calibraciones locales, lo cual es de suma importancia en suelos con alto contenido de sal.

## Conclusion

Los resultados mostraron que existe una sobreestimación de  $\theta$  en función del contenido de sal. Al comparar los sensores de este estudio con la calibración de fábrica, el sensor GS3 representa mejor el valor de  $\theta$  en los tres sitios de estudio, con un SEE menor de  $0,09 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , mientras que el sensor POGO presentó un mayor error en su estimación, teniendo un SEE de  $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Una vez calibrados, los sensores consiguen estimaciones con un bajo SEE que oscila entre  $0,04$  a  $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente. Las ecuaciones de calibración obtenidas son válidas para todo el rango de CE y  $\theta$  en el cual se llevó a cabo este estudio. Sin embargo, debe considerarse para

su uso que éstas son específicas para los suelos de este estudio u otros con características y propiedades físicas similares.

### Cited literature

Callejas, R., C. Kremer y M. Rioseco. 2014. Experiencia práctica en la implementación de monitorización continúa. p.86-101. In: Callejas, R., Vera, J., Kremer, C (Eds.). Riego de precisión en frutales con sensores de suelo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas.

Fares, A., M. Safeeq and D.M. Jenkins.2009. Adjusting Temperature and Salinity Effects on Single Capacitance Sensors. *Pedosphere*. 19(5):588-596.

Ojo, E.R., P. Bullock, and J. Fitzmaurice. 2015. Field performance of five soil moisture

Sandoval, E., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillan, Chile. 80p.

Sevostianova, E., S. Deb, M. Serena, D. Vanleeuwen and B. Leinauer. 2015. Accuracy of two electromagnetic soil water content sensors in saline soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79: 1752-1759.

Topp, G., J. Davis and A. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* 16(3): 574-582.