



industriales
etsii

Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Industrial

Análisis y Modelado de Sensores de Reflectometría en Frecuencia para Medida de Agua en el Suelo

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Autor: Juan Domingo González Teruel
Directores: Roque Torres Sánchez
Fulgencio Soto Valles

Cartagena, 09-10-2017



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Dedicado a
mi familia

Análisis y Modelado de Sensores de Reflectometría en Frecuencia para la Medida de Agua en el Suelo

Juan Domingo González Teruel

Resumen

El trabajo realizado tiene su origen en las necesidades de racionalización de los recursos hídricos sobre su principal actividad consumidora: la agricultura. La creciente aplicación de la tecnología al control de los cultivos ha llevado al desarrollo de múltiples sistemas de medida del contenido de humedad del suelo. Uno de los métodos que mayores ventajas presenta es la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia. Sin embargo, el coste de los equipos es elevado. Por este motivo, se considera necesario profundizar en el desarrollo de dispositivos de bajo coste.

Por tanto, se ha llevado a cabo el diseño, construcción y calibración de un sensor de bajo coste basado en la tecnología del dominio de la frecuencia. El diseño del sensor se centra en la variación de la capacidad de un condensador en función del contenido hídrico del suelo.

Se ha definido un protocolo de calibración que ha permitido obtener una expresión entre la magnitud de salida del sensor y el contenido de humedad del suelo. El ensayo con dos sensores experimentales ha dado lugar al análisis de parámetros como la repetitividad y la reproducibilidad del dispositivo desarrollado. Además, se ha determinado, a partir de la curva de ajuste obtenida, la exactitud que el sensor es capaz de proporcionar.

El comportamiento del sensor experimental se ha comparado con el del sensor comercial Decagon ECH₂O 10HS, obteniendo una trazabilidad equivalente. Asimismo, los ensayos llevados a cabo con dicho sensor comercial han permitido caracterizarlo y realizar una comparación con las especificaciones aportadas por el fabricante.

Analysing and Modelling Sensors of Reflectometry in Frequency for the Measure of Water in Soil

Juan Domingo González Teruel

Abstract

This research results from the needs for streamlining the hydric resources that are managed by its main consuming activity: agriculture. The increasing application of technology to the control of crops has led to the development of multiple systems that measure the quantity of moisture in soil. One of the most advantageous methods is the Frequency Domain Reflectometry. However, the cost of the devices is high, so it is necessary to go deeply into the development of low-cost mechanisms.

Therefore, this study has carried out the design, construction and calibration of a low-cost sensor which is based on the technology of frequency domain. The design of the sensor focuses on the variation of the capacity of a capacitor according to the water content in soil.

A calibration protocol that was defined has allowed to obtain an expression between the output variable of the sensor and the quantity of moisture in soil. The test on two experimental sensors brings the analysis of parameters such as the repeatability and the reproducibility of the developed device. Furthermore, this research has determined, based on the obtained setting curve, the accuracy that the sensor is able to provide.

The performance of the experimental sensor has been compared with the one by the commercial sensor Decagon ECH₂O 10HS, thus obtaining an equivalent traceability. Additionally, the tests on the already mentioned commercial sensor have allowed to characterize it and compare it with the specifications given by the manufacturer.

AGRADECIMIENTOS

A mis directores de Trabajo Dr. Roque Torres Sánchez y Dr. Pencho Soto Valles, porque la casualidad nos unió una temprana mañana en el pasillo del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, y cambiaron mi futuro. Gracias por la confianza y por esta gran oportunidad.

A todos aquellos integrantes de los Departamentos de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática que han aportado su granito de arena en este trabajo.

A mis padres, por su constante sacrificio para llegar hasta aquí y por su apuesta incondicional por mi futuro. Lo hemos vuelto a conseguir.

A mi hermano, porque por fin se dignó a hacerme un regalo de cumpleaños y porque a partir de ahora seremos compañeros de viaje en nuestras nuevas andaduras.

A mis abuelos, tíos y familia en general, porque siempre esperan algo grande de mí.

A mi segunda familia, la “Family23”, porque nadie iba a imaginar que en dos años se fueran a crear un enlace tan fuerte entre nosotros. Se puede decir que hubo química... y saltó la chispa. Más que el oxígeno, habéis sido el óxido nitroso en estos dos años de maratón.

A Antonio, porque su habilidad en el dibujo despertó mi atención de sobremanera. Esa fue realmente la energía de activación y no aquel famoso juicio.

A Fran, porque a pesar de que no tiene buen gusto futbolístico, supuso para mí un gran descubrimiento de paralelismo y antagonismo a la vez. Él es el culpable de la entropía.

A Elena, por hacer de cada día la primavera y llenar las mañanas de alegría. Ella es la que lleva la bombona de óxido nitroso.

A Rodrigo, porque el destino nos quiso unir dos años más, aunque depende de qué lado se mire. Él es la chispa; tan fugaz que no se sabe si está o no está.

Y cómo no, a Miriam, por ser mi otra mitad durante tanto tiempo, mi mejor amiga. Por aguantar mis largas ausencias en época de exámenes y mis largas noches terminando trabajos, como ahora mismo. Su apoyo ha sido clave durante estos dos años.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Origen del estudio	1
1.2	Objetivos del trabajo	3
2	ESTADO DEL ARTE.....	5
2.1	Métodos y tecnologías de determinación del contenido de agua en el suelo	5
2.1.1	Técnicas clásicas	6
2.1.2	Técnicas modernas	9
2.2	Sensores FD comerciales y equipos experimentales	23
2.2.1	Sensores comerciales.....	24
2.2.2	Sensores experimentales y de bajo coste.....	33
3	MATERIAL Y MÉTODOS	37
3.1	El suelo.....	37
3.1.1	El perfil y los horizontes del suelo	38
3.1.2	Composición del suelo	39
3.1.3	Propiedades físicas del suelo.....	40
3.2	Uso de la medida dieléctrica	51
3.3	Método de calibración.....	56
3.3.1	Material necesario	56
3.3.2	Obtención de muestras de suelo	57
3.3.3	Preparación del suelo	57
3.3.4	Calibración	57
3.3.5	Cálculos.....	59
3.3.6	Obtención de la función de calibración.....	59
4	DESARROLLO DEL EQUIPO	61
4.1	Diseño del circuito	62
4.1.1	Bloque I. Sensor	62
4.1.2	Bloque II. Filtro.....	65
4.1.3	Bloque III. Sustractor	65
4.2	Diseño de la placa	66
5	EXPERIMENTACIÓN	68
5.1	Fase I. Pruebas preliminares.....	68
5.2	Fase II. Calibración del sensor	70
5.2.1	Materiales.....	71

5.2.2	Procedimiento.....	73
6	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
6.1	Análisis preliminares.....	79
6.2	Estudio de la variabilidad	82
6.2.1	Resultados Test ANOVA	88
6.2.2	Indicadores de repetitividad y reproducibilidad	93
6.3	Obtención de la curva de ajuste del sensor.....	95
6.4	Caracterización del sensor comercial 10HS	103
6.4.1	Comparación entre el sensor 10HS y el sensor Arifrut	103
6.4.2	Evaluación de la ecuación de calibración del fabricante	105
7	CONCLUSIONES	111
7.1	Trabajos futuros.....	112
	BIBLIOGRAFÍA.....	114
	ANEXO.....	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Diagrama de un indicador de humedad por dispersión de neutrones (Martin 2014).	10
Figura 2-2. Disposición de los electrodos en el suelo según el método Wenner (Wenner 1915).	12
Figura 2-3. Esquema de un equipo TDR (Susha Lekshmi et al. 2014)	14
Figura 2-4. Sondas FD (Dominio de la Frecuencia): a) Placa plana cubierta de aislante; b) Barras cilíndricas; c) Anillos (Muñoz-Carpena et al. 2004).....	16
Figura 2-5. Sensor capacitivo modelo 10HS de Decagon con sonda en forma de dientes (Decagon Devices 2016).	16
Figura 2-6. Esquema de la medida del contenido en agua del suelo mediante un analizador de impedancias (Susha Lekshmi et al. 2014).....	18
Figura 2-7. Esquema de la medida del contenido de agua en el suelo mediante la técnica DPHP (Susha Lekshmi et al. 2014).	19
Figura 2-8. Esquema de un tensiómetro (Muñoz-Carpena et al. 2004).....	21
Figura 2-9. Sensor Decagon ECH2O EC-5.....	24
Figura 2-10. Sensor Decagon ECH2O 10HS.	25
Figura 2-11. Sensor Decagon 5TM.	26
Figura 2-12. Sensor Decagon 5TE.	27
Figura 2-13. Sensor Bambach Tensio-Technik SMT 100.....	28
Figura 2-14. Sensor Spectrum SM 100 WaterScout.	28
Figura 2-15. Sensor Delta-T SM150T.....	29
Figura 2-16. Sensor Delta-T ML3 ThetaProbe.	30
Figura 2-17. Sensor EnviroSCAN.....	31
Figura 2-18. Sensor Hydra Probe II.	32
Figura 2-19. Sensor INAUT. Esquema de la sonda y distribución de las líneas de campo (Carlos & Capraro 2008).	34
Figura 2-20. Esquema del sustrato de cobre impreso sobre la película de PET (Kojima et al. 2016).	36
Figura 2-21. Sensores desarrollados por (Kojima et al. 2016).	36
Figura 3-1. Esquema de las fases del suelo (Jordán López 2005).....	40
Figura 3-2. Tipos de estructura de suelo más comunes (FAO n.d.).	41
Figura 3-3. Crecimiento de plantas de tomate en suelos con diferentes densidades aparentes (Rickman et al. 1965).	44
Figura 3-4. Comparación visual de dos texturas de suelo: partículas finas (izquierda) y partículas gruesas (derecha). (Jordán López 2005).	48
Figura 3-5. Tamaño relativo de las partículas del suelo (Jordán López 2005).....	49
Figura 3-6. Diagrama textural de la USDA.....	50
Figura 3-7. Circuito serie RC (Burbano et al. 2003)	52
Figura 3-8. Curva de carga de un condensador en un circuito serie RC (Burbano et al. 2003). .	52
Figura 3-9. Vista frontal del Agilent 4395A.	53
Figura 3-10. Representación gráfica de la comparación del módulo de la impedancia entre aire y agua como dieléctricos obtenida con el analizador de impedancias.	54
Figura 3-11. Representación gráfica de la capacidad serie con aire como dieléctrico obtenida con el analizador de impedancias.....	54
Figura 3-12. Representación gráfica de la capacidad serie con agua como dieléctrico obtenida con el analizador de impedancias.....	55

Figura 3-13. Representación gráfica de la comparación de la capacidad serie entre aire (verde) y agua (azul) como dieléctricos obtenida con el analizador de impedancias.	55
Figura 3-14. Gráfico de un ejemplo de datos de calibración (Cobos & Chambers 2010).....	60
Figura 4-1. Esquemático del sensor experimental dividido en bloques.	61
Figura 4-2. Esquema del LMC555 en configuración astable.	63
Figura 4-3. Onda generada por el LMC555 en modo de operación astable.....	63
Figura 4-4. Layout del PCB del sensor experimental con distribución de los componentes electrónicos.	66
Figura 4-5. Layout del PCB del sensor experimental con distribución de los componentes electrónicos y pistas de conexión.	66
Figura 4-6. Aspecto del sensor Arifrut.....	67
Figura 5-1. Esquema de los puertos de entrada y salida del CR1000 (Campbell Scientific 2016).	68
Figura 5-2. Prueba de trazabilidad. Sistema de drenaje.	69
Figura 5-3. Tubo de muestreo volumétrico.	72
Figura 5-4. Báscula Inateck DS1001.....	73
Figura 5-5. Proceso de secado al aire libre de los tres tipos de suelo ensayados. De izquierda a derecha: ARE-LS, AR-LP y AR-BM.....	74
Figura 5-6. Proceso de cribado del suelo seco.	74
Figura 5-7. Vista general del sensor enterrado en el recipiente de calibración.	75
Figura 5-8. Vista detallada del sensor enterrado en el recipiente de calibración.	76
Figura 5-9. Muestra de suelo obtenida con el tubo de muestreo volumétrico.....	77
Figura 5-10. Proceso de pesado de la muestra de suelo húmeda.....	77
Figura 5-11. Muestras de suelo secando en el horno.	78
Figura 6-1. Nube de puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en el suelo AR-BM.....	79
Figura 6-2. Nube de puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en el suelo AR-LP.	80
Figura 6-3. Nube de puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en el suelo AR-LS.	81
Figura 6-4. Comparación de los puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en los tres suelos.	82
Figura 6-5. Comparación sensores Arifrut 1 y Arifrut 2 en el suelo AR-BM.....	83
Figura 6-6. Comparación sensores Arifrut 1 y Arifrut 2 en el suelo AR-LP.	84
Figura 6-7. Representación de medias y desviaciones típicas de los sensores Arifrut1 y Arifrut2 en el suelo AR-LP.	84
Figura 6-8. Comparación sensores Arifrut 1 y Arifrut 2 en el suelo ARE-LS.....	85
Figura 6-9. Medidas normalizadas de los sensores Arifrut1 y Arifrut2 en el suelo AR-BM.....	87
Figura 6-10. Ajuste polinómico grado 1 en suelo AR-LP.....	96
Figura 6-11. Ajuste polinómico grado 2 en suelo AR-LP.....	96
Figura 6-12. Ajuste exponencial en suelo AR-LP.....	97
Figura 6-13. Ajuste Fourier en suelo AR-LP.	97
Figura 6-14. Ajuste racional en suelo AR-LP.	98
Figura 6-15. Ajuste potencial en suelo AR-LP.	98
Figura 6-16. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo AR-LP.	99
Figura 6-17. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo AR-BM.....	100
Figura 6-18. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo AR-LP.	101
Figura 6-19. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo ARE-LS.....	102
Figura 6-20. Comparación de valores medios entre los sensores Arifrut1 y 10HS en el suelo AR-BM.....	104
Figura 6-21. Comparación de valores medios entre los sensores Arifrut1 y 10HS en el suelo AR-LP.	104

Figura 6-22. Comparación de valores medios entre los sensores Arifrut1 y 10HS en el suelo ARE-LS.....	105
Figura 6-23. Comparación medidas teóricas y empíricas de VWC con el sensor 10HS en el suelo AR-BM.	106
Figura 6-24. Comparación medidas teóricas y empíricas de VWC con el sensor 10HS en el suelo AR-LP.....	106
Figura 6-25. Comparación medidas teóricas y empíricas de VWC con el sensor 10HS en el suelo ARE-LS.	107
Figura 6-26. Ajuste polinómico grado 3 del sensor 10HS con límites de predicción en suelo AR-BM.	108
Figura 6-27. Ajuste polinómico grado 3 del sensor 10HS con límites de predicción en suelo AR-LP.	108
Figura 6-28. Ajuste polinómico grado 3 del sensor 10HS con límites de predicción en suelo ARE-LS.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Demandas brutas en la Demarcación Hidrográfica del Segura (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España 2016)	2
Tabla 2-1. Descripción de los parámetros de la textura del suelo usados para determinar la humedad del suelo utilizando el método del tacto (USDA 1998).	7
Tabla 2-2. Resumen comparativo de las técnicas de medida de contenido de agua en el suelo más importantes	23
Tabla 2-3. Especificaciones técnicas del sensor Decagon ECH2O EC-5.	24
Tabla 2-4. Especificaciones técnicas del sensor Decagon ECH2O 10HS.....	25
Tabla 2-5. Especificaciones técnicas del sensor Decagon 5TM.....	26
Tabla 2-6. Especificaciones técnicas del sensor Decagon 5TE.....	27
Tabla 2-7. Especificaciones técnicas del sensor Bambach Tensio-Technik SMT 100.	28
Tabla 2-8. Especificaciones técnicas del sensor Spectrum SM 100 WaterScout.	29
Tabla 2-9. Especificaciones técnicas del sensor Delta-T SM150T.	29
Tabla 2-10. Especificaciones técnicas del sensor Delta-T ML3 ThetaProbe.	30
Tabla 2-11. Especificaciones técnicas del sensor EnviroSCAN.	31
Tabla 2-12. Especificaciones técnicas del sensor Hydra Probe II.	32
Tabla 3-1. Clasificación y propiedades de los poros del suelo en función de su tamaño (Jordán López 2005).	41
Tabla 3-2. Colores y propiedades asociadas del suelo (Jordán López 2005)	47
Tabla 3-3. Clasificación del tamaño de las partículas de suelo según (USDA 2017).	48
Tabla 3-4. Clasificación del tamaño de las partículas de suelo según (ISSS 1929).	49
Tabla 3-5. Clasificación general del tamaño de las partículas de suelo.	49
Tabla 4-1. Pines del LMC555.	62
Tabla 4-2. Lista de componentes electrónicos del sensor experimental.	65
Tabla 6-1. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 1 en el suelo AR-BM.....	88
Tabla 6-2. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 2 en el suelo AR-BM.....	88
Tabla 6-3. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 3 en el suelo AR-BM.....	89
Tabla 6-4. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 4 en el suelo AR-BM.....	89
Tabla 6-5. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 5 en el suelo AR-BM.....	89
Tabla 6-6. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 1 en el suelo AR-LP.	89
Tabla 6-7. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 2 en el suelo AR-LP.	90
Tabla 6-8. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 3 en el suelo AR-LP.	90
Tabla 6-9. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 4 en el suelo AR-LP.	90
Tabla 6-10. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 5 en el suelo AR-LP.	90
Tabla 6-11. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 6 en el suelo AR-LP.	90
Tabla 6-12. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 7 en el suelo AR-LP.	90
Tabla 6-13. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 8 en el suelo AR-LP.	91
Tabla 6-14. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 9 en el suelo AR-LP.	91
Tabla 6-15. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 10 en el suelo AR-LP.	91
Tabla 6-16. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 11 en el suelo AR-LP.	91
Tabla 6-17. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 1 en el suelo ARE-LS.....	91
Tabla 6-18. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 2 en el suelo ARE-LS.....	92
Tabla 6-19. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 3 en el suelo ARE-LS.....	92
Tabla 6-20. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 4 en el suelo ARE-LS.....	92
Tabla 6-21. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 5 en el suelo ARE-LS.....	92

Tabla 6-22. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 6 en el suelo ARE-LS.....	92
Tabla 6-23. Estimadores de repetitividad y reproducibilidad en el suelo AR-BM.	94
Tabla 6-24. Estimadores de repetitividad y reproducibilidad en el suelo AR-LP.	94
Tabla 6-25. Estimadores de repetitividad y reproducibilidad en el suelo ARE-LS.	94
Tabla 6-26. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo AR-LP. ..	99
Tabla 6-27. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo AR-BM.	100
Tabla 6-28. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo AR-LP.	101
Tabla 6-29. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo ARE-LS.	102
Tabla 6-30. Estadísticos de la bondad del ajuste del sensor 10HS en el suelo AR-BM.....	109
Tabla 6-31. Estadísticos de la bondad del ajuste del sensor 10HS en el suelo AR-LP.	110
Tabla 6-32. Estadísticos de la bondad del ajuste del sensor 10HS en el suelo ARE-LS.....	110

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto se enmarca en el ámbito de aplicación de las nuevas tecnologías a la mejora del desarrollo de la actividad agrícola. En concreto, la agricultura de precisión y la gestión automatizada del riego son los principales marcos en los que se encuadra el trabajo desarrollado.

Dentro de este campo, muchas son las vertientes a tratar y, sin duda, una de las más importantes es la toma de medidas. Una gran cantidad de variables influyen en el desarrollo vegetativo de los cultivos agrícolas, y su conocimiento permite un mayor control del proceso y de la gestión de los recursos necesarios. Esto genera un mayor beneficio económico y ecológico, así como una mayor comprensión del comportamiento de éstos.

Una de las variables más determinantes en el desarrollo de los cultivos es el contenido de agua en el suelo, ya que el agua es el recurso principal para el desarrollo vegetativo y que, dada su escasez en algunas zonas del planeta, es un factor muy limitante para la producción vegetal. Por lo tanto, desde el punto de vista de la monitorización y control del riego, resulta primordial la tenencia de un indicador que permita conocer la cantidad de agua presente en el terreno. En este sentido, existen multitud de técnicas y dispositivos capaces de proporcionar dicha información. Entre estas técnicas se encuentra la *Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR)*, una de las más utilizadas en la actualidad, dada su menor vulnerabilidad a las diferentes condiciones en el medio. Sin embargo, el coste de estos sensores que realicen medidas de calidad, así como el tratamiento de la información que proporcionan, hace que su uso no esté muy difundido en el sector de la producción agrícola, limitándose más a entornos de investigación. Es, por tanto, prioritario, realizar estudios y desarrollos de sistemas de coste reducido que permitan el acceso de estos dispositivos.

En este trabajo se expone el desarrollo de un nuevo sensor de bajo coste, basado en la tecnología FDR y haciendo especial hincapié en su calibración. Se presenta el diseño del mismo, el protocolo de calibración seguido y los resultados obtenidos para tres tipos de suelo diferentes.

1.1 Origen del estudio

La escasez de recursos hídricos en ciertas zonas del planeta supone un condicionante para el desarrollo de cierto tipo de actividades. En el sureste de la Península Ibérica, donde se encuentra la Región de Murcia y algunas provincias de Andalucía y Castilla-La Mancha dedicadas a la actividad agrícola, el problema de la falta de agua es un asunto latente. Las condiciones geográficas y las propiedades del terreno hacen de esta zona un lugar propenso para el cultivo, de tal forma que constituye uno de los referentes en la producción de vegetales a nivel europeo. Sin embargo, la situación geográfica también implica una deficiencia hídrica que dificulta el desempeño de esta labor. Por

este motivo, resulta imprescindible la racionalización de los recursos hídricos en actividades con alta demanda.

Según el Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015/21 en su Anejo 3: Usos y Demandas (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España 2016), el 86% de la demanda bruta de esta área corresponde a la actividad agraria, con un volumen en torno a 1490 hm³ anuales. El 14% restante corresponde a la demanda urbana, con un 11% del total, y a otras actividades como las industriales no conectadas a la red urbana, el riego de campos de golf o el mantenimiento de humedales, tal como se presenta en la Tabla 1-1. Las previsiones de demanda para los próximos 15 años apenas arrojan cambios significativos, aunque siempre con tendencia ascendente.

Tabla 1-1. Demandas brutas en la Demarcación Hidrográfica del Segura (Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España 2016).

	Urbana		Agraria		Industrial no conectada		Servicios (Riego de campos de Golf)		Mantenimiento humedales (consuntiva)		Total	
	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%	hm ³	%
Demanda horizonte de referencia 2012	185,5	10,8%	1.487,1	86,3%	9,0	0,5%	11,3	0,7%	29,6	1,7%	1.722,5	100
Demanda horizonte 2015	189,1	11,0%	1.487,1	86,1%	9,1	0,5%	11,3	0,7%	29,6	1,7%	1.726,2	100
Demanda horizonte 2021	194,3	11,2%	1.487,1	85,9%	9,5	0,5%	11,3	0,7%	29,6	1,7%	1.731,8	100
Demanda horizonte 2027	208,3	11,9%	1.490,9	85,2%	10,3	0,6%	11,3	0,7%	29,6	1,7%	1.750,4	100
Demanda horizonte 2033	210,9	12,0%	1.490,9	84,5%	11,5	0,7%	20,6	1,2%	29,6	1,7%	1.763,5	100

Queda patente que la principal actividad de consumo de agua en esta zona es la agricultura, por lo que los esfuerzos en el ahorro deben concentrarse en este ámbito. En este sentido, la integración de la “Agricultura de Precisión” cobra especial relevancia.

Desde principios de los años 90, el concepto de Agricultura de Precisión se ha ido transformando en una realidad, a la vez que ha ido evolucionando de acuerdo con su carácter dinámico, propio de las nuevas tecnologías. La Agricultura de Precisión (AP) consiste en la aplicación de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) a la producción agraria (Agüera Vega & Pérez Ruiz 2013). Resulta evidente que la racionalización del uso de agua en actividades agrícolas es una tarea propia de la Agricultura de Precisión. Esta nueva forma de entender la producción agraria abarca el uso de diversas tecnologías: desde sistemas de localización GPS hasta vehículos autónomos, pasando por sensores inteligentes y todo tipo de sistemas de automatización. Su implantación se ha hecho relativamente efectiva en cultivos de gran extensión, tanto en el centro y norte de Europa como en Estados Unidos, Australia o

Sudamérica, con el principal objetivo de maximizar la rentabilidad (EIP-AGRI Focus Group 2015). En la zona del Mediterráneo comienza a establecerse, motivada principalmente por la escasez de agua y manifestándose en el llamado riego de precisión. A pesar de ello, su implantación en Europa no está lo suficientemente extendida y motivo de ello es la incertidumbre ante el riesgo de inversión (EIP-AGRI Focus Group 2015).

Algunos de los principales retos para el éxito y la adopción generalizada de la Agricultura de Precisión en Europa consisten en superar el riesgo de la inversión, percibir la complejidad de sus soluciones y determinar los beneficios específicos para el agricultor individual. El riesgo ante la inversión inicial y el desconocimiento y la falta de información parecen ser los principales motivos por los que la Agricultura de Precisión no termina de establecerse (EIP-AGRI Focus Group 2015).

De este modo, la ingeniería debe trabajar en pro de eliminar estas barreras al crecimiento. Centrando la atención en el aspecto económico, la reducción de la inversión inicial por parte de los agricultores es un aspecto a potenciar. En este sentido, muchos son los investigadores que trabajan en el desarrollo de dispositivos y tecnologías de bajo coste aplicadas a la Agricultura de Precisión (Zhou et al. 2009; Mahan et al. 2010; Xiang & Tian 2011; Wang & Nguang 2007; García Martínez 2016; Vázquez de León et al. 2016; Vázquez de León et al. 2015; Kargas & Soulis 2011). Surge entonces la necesidad de aportar un grano de arena más en esta línea mediante el desarrollo de un nuevo sensor de bajo coste para la medida del contenido de agua en el suelo.

1.2 Objetivos del trabajo

Este trabajo tiene como objetivo principal el desarrollo de un nuevo sensor de contenido de agua en el suelo de bajo coste basado en la tecnología de la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), utilizando un diseño electrónico diferente a los encontrados en la bibliografía. Además, se desea dotar al mismo de operatividad, de manera que pueda competir con sensores comerciales de la misma naturaleza. Para tal fin, el segundo objetivo de este trabajo es llevar a cabo la calibración del sensor, de manera que se establezca una relación matemática entre la magnitud de salida del mismo y el valor medido de contenido de agua en el suelo, obteniéndose así un modelo útil de aplicación. En este sentido, será necesario analizar diferentes pautas de comportamiento para evaluar ciertos indicadores de calidad, como la repetitividad o la reproducibilidad en las medidas proporcionadas por el sensor. Como objetivos secundarios se establecen la extensión del modelo de calibración a diferentes tipos de suelo y la identificación de variables influyentes en la calidad de la medida y del funcionamiento del sensor, con vistas a realizar posibles mejoras futuras en el diseño. Por otro lado, se dispone de una serie de subobjetivos consistentes en tareas necesarias a desarrollar que permiten, en conjunto, la consecución de los objetivos principales. Estos

son: la construcción del sensor y la definición de un protocolo de calibración adecuado a las características del sensor.

Se realiza a continuación una enumeración de los objetivos planteados.

Objetivos principales:

- Diseño y modelado de un sensor FDR de contenido de agua en el suelo de bajo coste.
 - Construcción del sensor.
- Calibración del sensor.
 - Definición de un protocolo de calibración.

Objetivos secundarios:

- Calibración del sensor en diferentes tipos de suelo.
- Identificación de variables y aspectos del diseño mejorables.

2 ESTADO DEL ARTE

En todo estudio es necesario realizar una revisión bibliográfica previa para situar el problema planteado dentro de las líneas de conocimiento existentes y evaluar su grado de innovación y trascendencia. Por este motivo, se presenta a continuación un análisis de investigaciones y trabajos relacionados con este propósito.

En primer lugar, es necesario analizar los diferentes métodos y tecnologías de medición de contenido de agua en el suelo, su evolución a lo largo del tiempo y las ventajas e inconvenientes de unos sobre otros. Además, como el diseño planteado en este estudio se basa en la tecnología de la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia, conviene conocer la misma con mayor profundidad y evaluar las diferentes tipologías de equipos y sensores desarrollados en este ámbito. Por su parte, se deben estudiar las características de los diferentes sensores comerciales basados en la tecnología FDR para poder tener una referencia comparativa con el nuevo sensor a desarrollar, tanto a nivel económico como tecnológico.

2.1 Métodos y tecnologías de determinación del contenido de agua en el suelo

La agricultura es una de las actividades más antiguas desempeñadas por el ser humano. Se conoce que la cantidad de agua presente en el suelo es un factor determinante en el crecimiento de las plantas y de ahí que se requiera de la labor de regadío. Sin embargo, no siempre ha sido fácil determinar en qué momento y en qué medida llevar a cabo esta labor.

La determinación de la cantidad de agua en el suelo permite conocer el estado hídrico del mismo y, de alguna manera, las necesidades hídricas del cultivo. Para tal fin, a lo largo de los años se han ido desarrollando técnicas y dispositivos que ayudan a obtener una medida más o menos precisa de esta variable.

Las diferentes técnicas de medida de agua en el suelo se pueden clasificar en técnicas clásicas y técnicas modernas. Entre las técnicas clásicas se encuentra el método del tacto, el método termo-gravimétrico y la técnica del carburo de calcio (ASTM 1998; Martin 2014; Bittelli 2011; Susha Lekshmi et al. 2014; Dobriyal et al. 2012; IAEA 2008; Hanson 2009). Por su parte, las técnicas modernas incluyen sensores de resistividad del suelo (Sreedeeep et al. 2004; Chavanne & Jean-Pierre 2014), tensiómetros (Singh & Kuriyan 2002; Ridley & Burland 1993), balance de humedad por infrarrojos (Terhoeven-Urselmans et al. 2008; Al-Asadi & Mouazen 2014), técnicas dieléctricas, como son la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) (Will & Rolfes 2014; Blonquist et al. 2005; Dey et al. 2015), la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) o las tecnologías capacitivas (Chavanne & Jean-Pierre 2014; García Martínez 2016; Visconti et al. 2014; Calamita et al. 2015; Al-Asadi & Mouazen

2014; Shukla et al. 2014; Vázquez de León et al. 2015; Wilczek et al. 2012; Scudiero et al. 2012; Ojo et al. 2015; Kargas & Soulis 2011; Yao et al. 2016), sensores de flujo térmico (Tarara & Ham 1997), técnicas de dispersión de neutrones (Zreda et al. 2008; Li et al. 2003; Elder & Rasmussen 1994; Kodikara et al. 2014), sistemas micro electro mecánicos (Liu et al. 2008; Jackson et al. 2008) o técnicas ópticas (Alessi & Prunty 1986; Scott et al. 2003; Al-Asadi & Mouazen 2014), entre otras.

2.1.1 Técnicas clásicas

2.1.1.1 Método del tacto

Se trata del método más antiguo y arcaico, utilizado por todos los agricultores a lo largo de la historia. No requiere de ningún tipo de tecnología. Consiste en presionar la tierra entre los dedos pulgar e índice o exprimirla en la palma de la mano, de manera que, en función de la sensación de humedad que se perciba mediante el tacto de la piel, se obtiene una estimación de la cantidad de agua en el suelo (Martin 2014). El dominio de este método requiere experiencia, y cuanto mayor sea ésta, mayor será la precisión alcanzada. El método del tacto es un método cualitativo y los valores de humedad del suelo se bareman en relación a sensaciones y a criterios no objetivos, tal como se muestra en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Descripción de los parámetros de la textura del suelo usados para determinar la humedad del suelo utilizando el método del tacto (USDA 1998).

Contenido de agua disponible en el suelo (%)	Granular/Gruesa (Arenosa y Arenofrancosa)	Moderadamente gruesa (Franco-arenosa)	Textura media (Franco-arcillo-arenosa, franca o franco-limosa)	Textura fina (Arcillosa, Franco arcillosa o Franco-arcillo-limosa)
0-25	Seca y suelta. Se desliza entre los dedos	Seca, forma una bola débil que se desgrana fácilmente.	Seca. Los segmentos se rompen fácilmente. No deja manchas en los dedos. Los terrones se desmoronan entre los dedos.	Seca. Los fragmentos se separan fácilmente. Los terrones son difíciles de romper.
25-50	Ligeramente húmedo, forma una bola muy débil, marcas en los dedos bien definidas. Una ligera capa de granos sueltos queda en los dedos.	Ligeramente húmedo, forma una bola débil, marcas definidas en los dedos, de color oscuro, no queda agua en los dedos. Los granos se separan.	Ligeramente húmedo, forma una bola débil con superficies rugosas, sin manchas de agua en los dedos, pocos granos de suelo agregados se separan.	Ligeramente húmedo, forma una bola débil, muy pocos segmentos del suelo se rompen, no hay manchas de agua, terrones se aplanan con la presión aplicada.
50-75	Húmedo, forma una bola débil con granos de arena sueltos y agregados en los dedos, color oscurecido, rastro moderado del agua en los dedos, no se puede hacer una cinta.	Húmedo, forma una bola con marcas de dedos definidas, ligero rastro de agua en los dedos, color oscuro, no mancha.	Húmedo, forma una bola, mancha muy ligera de agua en los dedos, color oscuro, flexible, forma una cinta débil entre el pulgar y el índice.	Húmedo, forma una bola lisa con las marcas de los dedos definidas, rastro ligero de suelo/agua en los dedos, forma una cinta entre el pulgar y el índice.
75-100	Húmedo, forma una bola débil, los granos de arena sueltos y agregados permanecen en los dedos, color oscuro, rastro de agua en los dedos, no se puede formar una cinta.	Húmedo, forma una bola que deja un contorno húmedo en la mano, ligero-medio rastro de agua en los dedos, hace una cinta débil entre el pulgar y el índice.	Húmedo, forma una bola con marcas de dedos bien definidas, rastro ligero-intenso de agua/suelo en los dedos, cintas entre pulgar e índice.	Húmedo, forma una bola, rastro medio-intenso e irregular de agua/suelo en los dedos, formación de cintas fácilmente entre el pulgar y el índice.
Capacidad de Campo (100%)	Húmedo, forma una bola débil, rastro medio-intenso de agua/suelo en los dedos, el contorno húmedo de la bola permanece en la mano.	Húmedo, forma una bola suave, el agua libre aparece brevemente en la superficie del suelo después de presionar, medio-intenso rastro de suelo/agua en los dedos	Húmedo, forma una bola suave, el agua libre aparece brevemente en la superficie del suelo después de presionar, medio-intenso rastro de suelo/agua en los dedos.	Húmedo, forma una bola suave, el agua libre aparece brevemente en la superficie del suelo después de presionar, rastro grueso de suelo/agua en los dedos, mancha y es pegajoso.

2.1.1.2 Método termo-gravimétrico

El método termo-gravimétrico o gravimétrico, simplemente, es un método muy utilizado para determinar la cantidad de agua en el suelo y se considera como el método de referencia. La mayoría de protocolos de calibración de sensores de humedad del suelo se basan en esta técnica (ASTM 1998; Ojo et al. 2015; Shukla et al. 2014; Chen et al. 2013; Cobos & Chambers 2010; Hanson 2009).

Este método consiste en secar una muestra de suelo húmeda en un horno con convección a $110^\circ \pm 5^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Los suelos orgánicos y aquellos con contenido de yeso presentan la posibilidad de sufrir una alteración de su naturaleza a estas temperaturas, por lo que se recomienda que el secado de los mismos se realice a 60°C .

El método gravimétrico ofrece una medida precisa del contenido de agua en el suelo y no depende del tipo de suelo ni de la salinidad del mismo. Sin embargo, se trata de un método destructivo, ya que las muestras calentadas en el horno no se pueden utilizar para realizar nuevas medidas y su estructura se ve alterada tras el proceso (Susha Lekshmi et al. 2014).

Pesando la muestra antes y después del secado se obtiene la cantidad de agua contenida en el suelo. El contenido gravimétrico de agua en el suelo queda representado, por tanto, por la siguiente expresión (ASTM 1998):

$$\theta_m (\%) = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100 \quad (2-1)$$

donde,

m_w es la masa de agua

m_s es la masa de las partículas sólidas

En caso de que el volumen de la muestra sea conocido, se puede obtener también el contenido volumétrico de agua en el suelo (Hanson 2009):

$$\theta_v (\%) = \frac{V_w}{V_t} \cdot 100 = \frac{m_w/\rho_w}{V_t} \cdot 100 \quad (2-2)$$

donde,

V_w es el volumen de agua

V_t es el volumen total del suelo (agua + partículas sólidas)

ρ_w es la densidad del agua (1 g/cm^3)

El contenido volumétrico de agua en el suelo presenta, sin embargo, el inconveniente de que la medida depende de la densidad relativa del suelo, y su valor no es uniforme.

Una de las variantes conocidas de este método es el empleo de un horno microondas en lugar de un horno de convección convencional para eliminar el contenido de agua de las muestras (ASTM 2000; Fernando et al. 2007). Esto permite reducir en gran medida el tiempo de ensayo, ya que apenas se requieren unos minutos, a diferencia de las 24 horas necesarias con el horno convencional, además de resultar equipos más baratos y fáciles de transportar. Sin embargo, se considera que el uso del horno microondas resta exactitud en la medida, tal como describe Gardner (1986) y Gardner et al. (1991) (Citados en Soil Science Society of America, 2002, p. 426), implicando esto la poca extensión actual de su uso, salvo en ocasiones donde la rapidez prima por encima de un resultado extremadamente exacto.

2.1.1.3 Técnica del carburo de calcio

Se trata de una técnica rápida, aplicable tanto en laboratorio como en campo. El contenido de agua del suelo se determina a partir de la presión ejercida por la fase gaseosa generada al hacer reaccionar carburo de calcio con el agua presente en el suelo. Esta reacción da lugar a gas acetileno, que se presenta en proporción a la cantidad de agua en el suelo y se confina en una cámara sellada, donde se mide la presión con un manómetro. Los valores de presión se relacionan con valores de humedad del suelo, utilizando el método gravimétrico como referencia de calibración.

Algunos suelos, como los arcillosos con plasticidad elevada y aquellos difíciles de desgranar no ofrecen resultados representativos mediante esta técnica, dado que muchas de las partículas de agua quedan retenidas sin capacidad de contactar con el reactivo. Además, se requieren aproximadamente 22 g de carburo de calcio por cada 20 g de suelo y de personal competente para llevar a cabo los ensayos (ASTM 2011), encareciendo el desarrollo de este método.

2.1.2 Técnicas modernas

2.1.2.1 Técnica de dispersión de neutrones

Los equipos de medición del contenido de agua en el suelo mediante dispersión de neutrones utilizan una fuente que emite una cantidad determinada de neutrones a gran velocidad. Estos neutrones son, aproximadamente, del tamaño de un átomo de hidrógeno, componente esencial del agua. Al chocar con los átomos de hidrógeno, los neutrones reducen su velocidad, de manera que un detector dentro de la sonda registra la proporción de neutrones rápidos que se pierden y de neutrones lentos que regresan. A partir de esta relación se determina el contenido de agua en el suelo, ya que la probabilidad de choque de los neutrones es mayor cuanto mayor sea el número de átomos de hidrógeno y, por tanto, de agua en el suelo. Sin embargo, debido a que cada

suelo posee otras fuentes de hidrógeno diferentes al agua, se debe realizar la calibración del equipo en cada suelo específico (Martin 2014).

Los equipos de dispersión de neutrones pueden ser superficiales y de profundidad. Los equipos de profundidad constan de una sonda cilíndrica que incluye la fuente y el detector de neutrones, conectada a una caja donde se alberga la fuente de alimentación y el interfaz de lectura. Esta caja queda en la superficie, mientras que la sonda se introduce en un tubo que penetra en el suelo, permitiendo así su descenso hasta el nivel deseado, tal como muestra la Figura 2-1. Los equipos de profundidad resultan útiles en aplicaciones agrícolas y medioambientales, mientras que los superficiales no ofrecen las mismas prestaciones (Evet 2000).

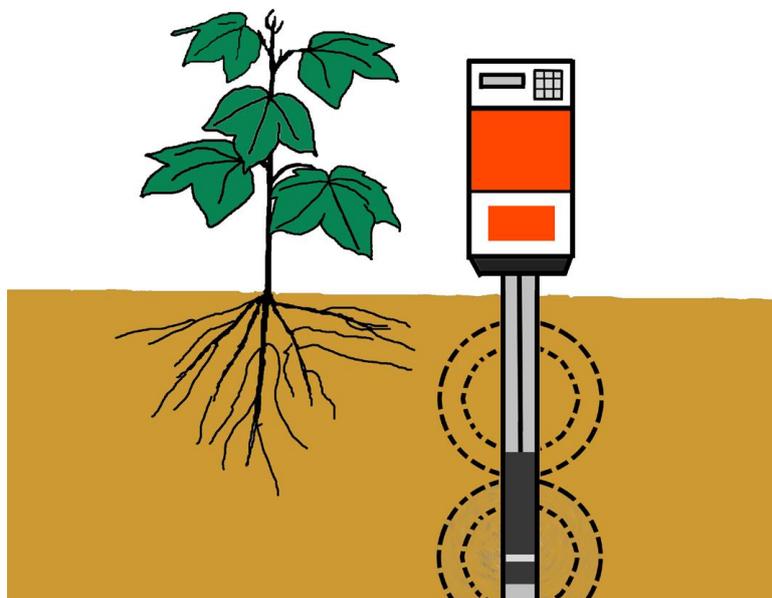


Figura 2-1. Diagrama de un indicador de humedad por dispersión de neutrones (Martin 2014).

Esta técnica ofrece una alta velocidad de respuesta (1-2 min) y la ventaja de medir grandes volúmenes de suelo, así como de medir a diferentes profundidades, permitiendo obtener un perfil de humedad del suelo. Además, se considera como una de las técnicas más precisas (Susha Lekshmi et al. 2014). En cambio, muchas son las desventajas que presenta, tales como el coste de los equipos, el bajo grado de resolución espacial, la necesidad de personal cualificado para su manejo y los inconvenientes asociados a la exposición a la radiación (Jarvis & Leeds-Harrison 1987). Asimismo, los equipos de profundidad no son sensibles a menos de 0,3 m de la superficie y resulta difícil su traslado de un punto de medida a otro diferente (Susha Lekshmi et al. 2014).

2.1.2.2 Técnica de atenuación de rayos gamma

La técnica de atenuación de rayos gamma es una técnica radiactiva que se usa para determinar la humedad del suelo a una profundidad inferior a 25 mm con una resolución muy elevada. En este caso, el principio de funcionamiento se basa en que la dispersión y

la absorción de rayos gamma están relacionadas con la densidad de las partículas que éstos encuentran a su paso, y que el peso específico de un suelo permanece relativamente constante, independientemente de las variaciones que se produzcan en su densidad húmeda como consecuencia del aumento o descenso de la cantidad de agua. Se obtienen, por tanto, cambios en la densidad húmeda a partir de la atenuación de los rayos gamma, y se determina el contenido de agua del suelo en base al cambio de densidad que se produzca (Zazueta & Xin 1994).

Esta técnica posee un tiempo de respuesta inferior a un minuto, aunque, al igual que sucede con la técnica de dispersión de neutrones, presenta inconvenientes en cuanto al coste y a la exposición a la radiación, además de encontrarse limitada a profundidades inferiores a 25 mm y verse afectada por los cambios en la densidad aparente del suelo (Zazueta & Xin 1994).

2.1.2.3 Método Wenner o técnica de la resistividad del suelo

Las técnicas electromagnéticas aprovechan la relación existente entre la humedad del suelo y sus propiedades eléctricas. La resistividad es una propiedad eléctrica del suelo que depende del contenido de agua que éste posea, sirviendo como elemento sensor. Es posible medir la resistividad entre dos electrodos insertados en el suelo o la resistividad de un material en equilibrio con el suelo (Zazueta & Xin 1994).

La medida de la resistividad del suelo se realiza en base al conocido como Método Wenner, desarrollado por Frank Wenner (Wenner 1915). Este método, utilizado usualmente para determinar la resistividad del terreno en el diseño de conexiones a tierra de instalaciones eléctricas, consiste en la colocación de cuatro electrodos en línea recta a la misma profundidad. Para introducir los electrodos en el suelo se realizan perforaciones con un diámetro inferior al 10% de la distancia entre ellos, y los electrodos deben instalarse de manera que hagan contacto con el suelo únicamente en el fondo, tal como muestra la Figura 2-2.

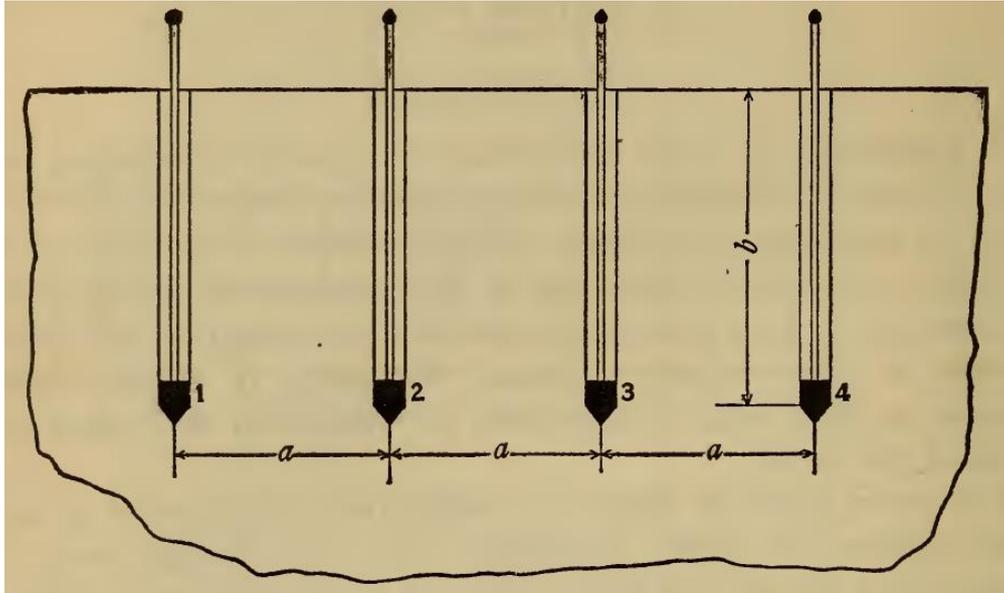


Figura 2-2. Disposición de los electrodos en el suelo según el método Wenner (Wenner 1915).

Aplicando una corriente eléctrica entre los electrodos de los extremos y midiendo la diferencia de potencial entre los electrodos centrales, se obtiene, a partir de la Ley de Ohm, la resistencia. También es posible aplicar la corriente eléctrica entre los electrodos centrales y medir la tensión entre los electrodos de los extremos. Se recomienda que dicha corriente sea alterna para evitar problemas de polarización (Wenner 1915; Zhu et al. 2007). Conocidas la resistencia eléctrica, la distancia entre los electrodos y la profundidad de los mismos se puede obtener la resistividad del suelo a partir de la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (2-3)$$

donde,

R es la resistencia medida

a es la distancia entre los electrodos

b es la profundidad de los electrodos

En caso de que b sea muy grande en comparación con a , se puede aplicar la siguiente simplificación:

$$\rho = 4\pi a R \quad (2-4)$$

Si sucede al contrario, es decir, a es muy grande en comparación con b , se puede simplificar a:

$$\rho = 2\pi aR \quad (2-5)$$

Este método no depende del tamaño de los electrodos ni del tipo de conexión eléctrica de los mismos con el suelo (Wenner 1915).

La medida de la resistividad del suelo no sólo depende del contenido de agua del mismo, sino también de otras propiedades como la salinidad, la capacidad de intercambio catiónico, el tamaño y distribución de los poros o la temperatura. Por tanto, la medida del contenido de agua del suelo a partir de la resistividad se puede ver alterada por las variaciones que se puedan producir en el resto de propiedades, especialmente en la salinidad (Zhu et al. 2007; Rhoades 1993).

2.1.2.4 Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)

La Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR) es una técnica que se basa en la relación entre las propiedades dieléctricas del suelo y su contenido en agua. Un dieléctrico es un material aislante. Sin embargo, el término *dieléctrico* se suele utilizar cuando se hace referencia a los condensadores. En un condensador, el dieléctrico es el material aislante que se sitúa entre las dos armaduras conductoras. Michael Faraday fue el primero en demostrar que al introducir un material dieléctrico llenando el espacio entre las armaduras de un condensador, su capacidad aumenta en un factor ϵ' mayor que uno, que depende solamente de la naturaleza del material dieléctrico. A ese valor ϵ' se le denomina *constante dieléctrica del medio* o *permitividad relativa* (Burbano et al. 2003).

Las técnicas dieléctricas, como la Reflectometría en el Dominio del Tiempo y la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) se fundamentan en el hecho de que existe una gran diferencia entre la constante dieléctrica del suelo seco ($\approx 2-9$) y del agua pura (≈ 81) (Blonquist et al. 2005; Campbell 1990; Susha Lekshmi et al. 2014; Selig & Mansukhani 1975).

La tecnología TDR determina la permitividad del suelo midiendo el tiempo que tarda en ir y volver un pulso electromagnético que se propaga a lo largo de una guía, normalmente en forma de sondas o conductores, insertados en el suelo (Bittelli 2011; Susha Lekshmi et al. 2014; Evett 2000; Blonquist et al. 2005). La gran diferencia existente entre la constante dieléctrica del agua y la de los constituyentes del suelo seco (partículas sólidas y aire), hace que el tiempo que tarda en viajar el pulso electromagnético dependa del contenido de agua del suelo. El pulso viaja más lentamente cuanto mayor es el contenido de agua (Martin 2014).

Para llevar a cabo la medida de la permitividad relativa del suelo, los equipos TDR se componen, normalmente, de un generador de pulsos, de un sistema que registre los pulsos reflejados, tal como un osciloscopio, y de unas sondas o conductores que

sirvan de guía a los pulsos, y que se conectan al resto del equipo a través de un cable coaxial, tal como muestra la Figura 2-3.

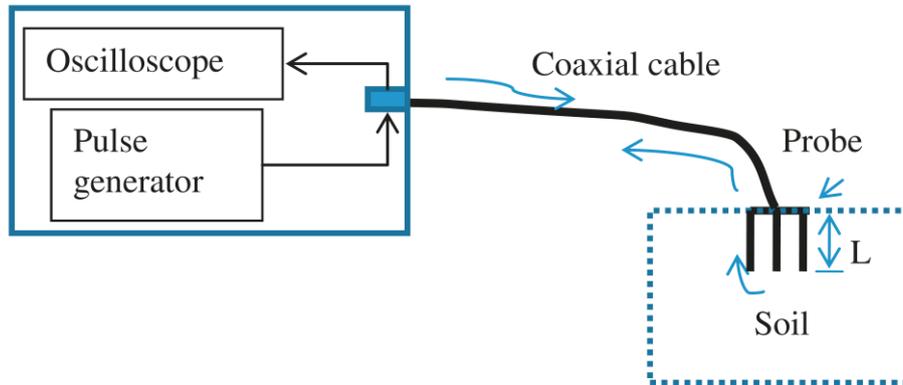


Figura 2-3. Esquema de un equipo TDR (Susha Lekshmi et al. 2014)

A partir de la longitud de la sonda, L , del tiempo que tarda en viajar el pulso electromagnético a través de ella, t , y de la velocidad de la luz en el vacío, c , se obtiene el valor de la permitividad relativa aparente del suelo, ϵ'_a :

$$\epsilon'_a = (c \cdot t / 2L)^2 \quad (2-6)$$

La permitividad relativa aparente se relaciona con el contenido volumétrico de agua del suelo, VWC , mediante la siguiente expresión, obtenida de manera empírica (Topp et al. 1980):

$$VWC = 4,3 \cdot 10^{-6} (\epsilon'_a)^3 - 5,5 \cdot 10^{-4} (\epsilon'_a)^2 + 2,92 \cdot 10^{-2} \epsilon'_a - 5,3 \cdot 10^{-2} \quad (2-7)$$

Entre las ventajas de este método se encuentra su capacidad para proporcionar una lectura inmediata e *in situ* del contenido hídrico del suelo, y su alta precisión ($< \pm 0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$) (Blonquist et al. 2005). Sin embargo, sus aplicaciones se encuentran limitadas debido al alto coste de los equipos y a los problemas que se generan cuando se conectan las sondas a cables de gran longitud, que actúan como un filtro paso bajo (IAEA 2008). Además, la Ecuación (2-7) no es válida para todo tipo de suelos, por lo que resulta necesario llevar a cabo la calibración del equipo para algunos de ellos (IAEA 2008).

2.1.2.5 Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) y sensores capacitivos

Al igual que sucede en la tecnología TDR, el contenido de agua en el suelo se determina de forma indirecta a partir de su relación con la constante dieléctrica del medio. En este caso, la determinación de la constante dieléctrica no se realiza en el dominio del tiempo, sino en el dominio de la frecuencia.

Esta técnica utiliza el suelo como dieléctrico de un condensador, de manera que, en función de su contenido en agua, la constante dieléctrica del suelo varía y, por consiguiente, también la capacidad del condensador. Si este condensador se integra en un circuito dotado de un oscilador, las variaciones en la capacidad del condensador y, por tanto, de la permitividad del medio, conllevan una variación en la frecuencia de la señal generada por el oscilador. Este es el principio de la técnica del dominio de la frecuencia (FD) (Muñoz-Carpena et al. 2004; Susha Lekshmi et al. 2014). A partir del mismo aparecen dos tipos de técnicas o dispositivos: los sensores capacitivos y los equipos FDR, aunque a menudo se hace referencia a ambos bajo la denominación FDR. En los sensores capacitivos la permitividad del medio se determina midiendo el tiempo de carga del condensador. Por su parte, los FDR realizan un barrido de frecuencia dentro de un determinado rango y obtienen la frecuencia de resonancia¹, que se relaciona con el contenido hídrico del medio.

Las sondas de este tipo de equipos suelen presentarse físicamente en tres aspectos diferentes: en forma de placas planas (*plates*), en forma de barras cilíndricas (*rods*) o en forma de anillos metálicos alrededor de un cilindro, tal como muestra la Figura 2-4. La forma de anillo corresponde normalmente a los sensores FDR. Por su parte, la tipología de placas planas también se puede presentar en forma de dientes, como se muestra en la Figura 2-5. En los sensores FDR con la configuración en anillo, la sonda se introduce dentro de un tubo de acceso ya instalado en el suelo, al igual que sucede con las sondas de dispersión de neutrones, y esto sirve, además, para instalar varios sensores que realicen medidas a diferentes profundidades, tal como se puede ver en la Figura 2-4 c.

¹ Frecuencia a la cual la amplitud de la señal es máxima (Muñoz-Carpena et al. 2004).



Figura 2-4. Sondas FD (Dominio de la Frecuencia): a) Placa plana cubierta de aislante; b) Barras cilíndricas; c) Anillos (Muñoz-Carpena et al. 2004).



Figura 2-5. Sensor capacitivo modelo 10HS de Decagon con sonda en forma de dientes (Decagon Devices 2016).

Los sensores capacitivos y FDR trabajan, en la mayoría de los casos, a frecuencias de entre 10 y 150 MHz (Kargas & Soulis 2011; Susha Lekshmi et al. 2014), aunque algunos estudios (Wilczek et al. 2012; Skierucha & Wilczek 2010) experimentan con frecuencias de hasta 500 MHz con el objetivo de medir la salinidad del suelo, evitando las pérdidas que se originan con la tecnología TDR y trabajando aún a frecuencias inferiores a las de los equipos TDR (1 GHz), que son la principal causa de su alto coste (Skierucha & Wilczek 2010). Otros trabajos (Vázquez de León et al.

2015), en cambio, desarrollan nuevos equipos de bajo coste que trabajan a frecuencias bastante más bajas (31-250 kHz), obteniendo un compromiso entre coste y rendimiento.

La permitividad relativa está representada por un número complejo. Algunos estudios (Skierucha & Wilczek 2010; Susha Lekshmi et al. 2014; Topp et al. 1980; Topp et al. 2000; Oates et al. 2016) sostienen que variables como la temperatura o la salinidad influyen en el valor de la componente imaginaria de la permitividad relativa, pudiendo producir variaciones en la medida del contenido de agua del suelo. La parte real, sin embargo, es independiente de la temperatura y de la frecuencia de trabajo (Topp et al. 1980).

Esta tecnología, al igual que el resto, presenta determinadas limitaciones. La repetitividad de los sensores en la medida del contenido volumétrico de agua es mayor en suelos con un contenido hídrico inferior al 5% y, por lo tanto, su sensibilidad se incrementa en condiciones de suelo relativamente seco (Susha Lekshmi et al. 2014). Además, presenta el inconveniente de su sensibilidad a la presencia de huecos de aire entre el suelo y la sonda, viéndose afectada la medida por el valor de la densidad relativa del suelo. Su dependencia de la textura del suelo supone la necesidad de llevar a cabo una calibración específica en cada caso.

A pesar de sus limitaciones, la tecnología basada en el dominio de la frecuencia es una de las alternativas más recurridas en la actualidad. Su menor coste con respecto a la mayoría de las tecnologías modernas, unido a sus prestaciones, le confiere una alta competitividad frente al resto de opciones. Su exactitud en la medida del contenido volumétrico de agua ($0,01-0,02 \text{ m}^3/\text{m}^3$) es similar a la que proporciona la tecnología TDR. Además, con respecto a ésta, presenta una serie de ventajas como su utilidad en suelos con gran concentración salina, mayor resolución, capacidad de medida a diferentes profundidades en un mismo lugar y, sobre todo, menor coste (Muñoz-Carpena et al. 2004).

2.1.2.6 Sensor de impedancia eléctrica o Reflectometría en el Dominio de la Amplitud (ADR)

Un sensor de impedancia eléctrica consiste en una sonda, similar a las utilizadas en la tecnología TDR, conectada mediante un cable coaxial a un analizador de impedancias, tal como muestra la Figura 2-6. El analizador de impedancias genera una onda electromagnética que viaja a través del cable y llega a la sonda, en contacto con el suelo. Cuando la onda alcanza una sección con diferente impedancia, parte de la energía transmitida se refleja. La onda reflejada interactúa con la onda incidente produciendo una onda de voltaje estacionaria, es decir, se produce un cambio en la amplitud de la onda a lo largo del conductor. Cuando la sonda se introduce en el suelo se produce un cambio en la impedancia a lo largo del conductor, lo que da lugar, por tanto, a una variación en la amplitud de la onda. Midiendo la diferencia de amplitud se obtiene un indicativo de la impedancia del suelo (Muñoz-Carpena et al. 2004). De esta forma, a partir de la impedancia del suelo se puede determinar su contenido en agua.

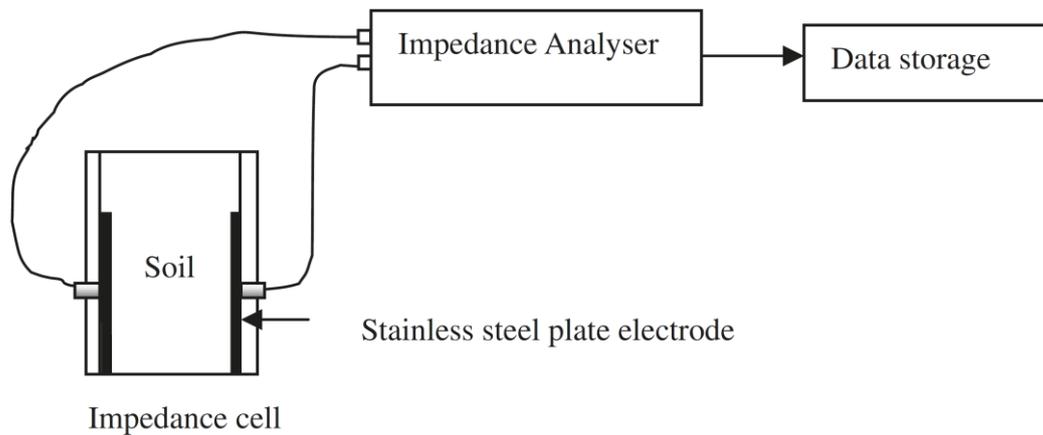


Figura 2-6. Esquema de la medida del contenido en agua del suelo mediante un analizador de impedancias (Susha Lekshmi et al. 2014)

2.1.2.7 Radar de penetración en el terreno (GPR)

La tecnología GPR utiliza la transmisión y reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia (1 MHz-1 GHz) dentro del subsuelo. Mide el tiempo que tarda en viajar la onda desde la fuente hasta una antena receptora a través de la capa superior del suelo. Este tiempo se relaciona con la constante dieléctrica del suelo, utilizada para determinar el contenido de agua del mismo.

Este método ofrece una alta resolución y permite estimar las propiedades dieléctricas del terreno a lo largo de un extenso volumen, a diferencia del resto de técnicas dieléctricas. El principal inconveniente que presenta, en cambio, es la alta formación necesaria por parte del usuario para obtener medidas adecuadas. Además, la tecnología GPR ve reducida su precisión en suelos salinos, ya que se produce una atenuación de la señal cuando tienen lugar aumentos de la conductividad relativa superiores a 1 dS/m (Susha Lekshmi et al. 2014).

2.1.2.8 Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS)

Los sistemas MEMS están basados en micro-sensores, nano-sensores y actuadores capaces de interactuar con el medio, reaccionando a cambios que se producen en éste con el uso de un microcircuito de control. Los sistemas MEMS utilizados en la medida del contenido de agua en el suelo combinan un elemento sensor de material nanopolimérico con un circuito con puente de Wheatstone basado en un elemento piezorresistivo. Este elemento sensor consta de una ménsula en cuya superficie se instala una película nano-polimérica sensible al vapor de agua. Cuando las moléculas de agua del suelo entran en contacto con esta película, la ménsula se deforma debido al esfuerzo cortante, como consecuencia del peso de las moléculas de agua. Esta deformación se transmite a una galga extensiométrica, traduciéndose en un cambio en la resistencia, relacionado de manera lineal con la deformación de la ménsula y con la concentración de moléculas de agua (Jackson et al. 2008; Susha Lekshmi et al. 2014;

Liu et al. 2008). La implementación práctica de esta tecnología y la influencia de los componentes del suelo en la misma se encuentran aún en estudio.

2.1.2.9 Técnicas térmicas

El contenido de agua en el suelo se puede determinar de forma indirecta a partir de sus propiedades térmicas. Existen básicamente dos técnicas que hacen uso de estas propiedades: la técnica por disipación de calor y la técnica de flujo de calor (Bittelli 2011).

La técnica por disipación de calor utiliza una fuente de calor y un elemento de medida de temperatura, ya sea un termistor o un termopar, que se introducen en un bloque cerámico poroso que queda enterrado en el suelo. Aplicando energía eléctrica al elemento calefactor éste disipa energía calorífica, la cual se mide utilizando el sensor de temperatura. La cantidad de calor disipado medida depende de la conductividad térmica del medio, y ésta se encuentra relacionada con la cantidad de agua presente en el bloque cerámico. Para determinar el calor disipado se recurre a la diferencia entre la temperatura antes y después del calentamiento (Bittelli 2011).

En la técnica de flujo de calor o técnica de pulso de calor (*Dual-Probe Heat Pulse, DPHP*), se dispone nuevamente de una fuente de calor y de un sensor de temperatura, tal como se muestra en la Figura 2-7. La fuente aplica un pulso de calor que es detectado por el sensor de temperatura. El tiempo que transcurre desde que se aplica el pulso en un punto hasta que se detecta en otro es función de la conductividad térmica del medio (Young et al. 2008; Tarara & Ham 1997).

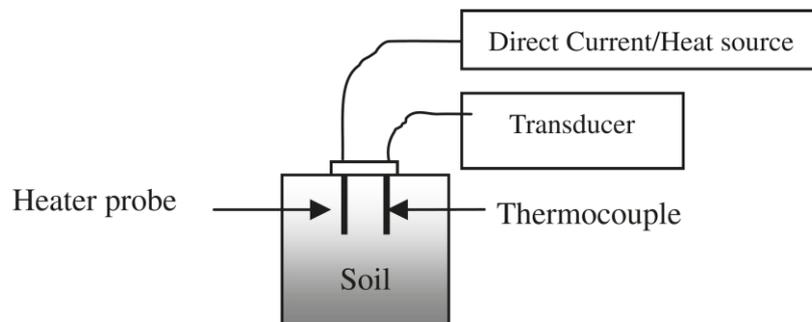


Figura 2-7. Esquema de la medida del contenido de agua en el suelo mediante la técnica DPHP (Susha Lekshmi et al. 2014).

Utilizando el método DPHP, (Tarara & Ham 1997) propone una expresión para determinar la capacidad calorífica volumétrica, considerando un modelo ideal donde el elemento calefactor tiene longitud infinita y el pulso de calor se aplica instantáneamente:

$$\rho_a \cdot c_p = \frac{q}{\pi \cdot e \cdot r^2 \cdot \Delta T_m} \quad (2-8)$$

siendo,

ρ_a es la densidad aparente o relativa del suelo.

c_p es el calor específico del suelo.

e es el número de Euler.

r es la distancia entre el elemento calefactor y el sensor de temperatura.

q es la energía aplicada por unidad de longitud del elemento calefactor.

ΔT_m es el máximo aumento de temperatura.

Por su parte, la expresión que relaciona la capacidad calorífica volumétrica y el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ_v) se atribuye a (de Vries 1963):

$$\rho_a \cdot c_p = 1,92 \cdot X_m + 2,5 \cdot X_o + 4,18 \cdot \theta_v \quad (2-9)$$

donde,

X_m es la proporción volumétrica de mineral en el suelo.

X_o es la proporción volumétrica de componentes orgánicos en el suelo.

2.1.2.10 Técnica tensiométrica

Este método obtiene el contenido de agua del suelo a partir de la medida de la tensión por capilaridad. Para tal fin se utiliza un instrumento denominado tensiómetro, mostrado en la Figura 2-8, que consta de una punta cerámica porosa conectada a una columna tubular de agua, donde se instala un manómetro. Existen diferentes tamaños y formas de punta cerámica, y la exactitud depende del manómetro utilizado (resolución típica ≈ 1 cbar). Normalmente, el rango de medida abarca de 0 a 80 cbar. Cuando el tensiómetro se introduce en el suelo, el agua presente en los poros del material cerámico entra en equilibrio con el agua del suelo, es decir, alcanza el mismo potencial de presión. Esto genera una succión en el interior del tubo, que se registra con el manómetro y que es proporcional a la cantidad de agua en el suelo (Muñoz-Carpena et al. 2004).

Esta técnica presenta ciertas ventajas, como su facilidad de uso; apenas requiere mantenimiento y la medida no se ve afectada por la salinidad del suelo. Además, se puede instalar un transductor que permita registrar la medida de forma continua. Sin embargo, el principal inconveniente que presenta es que la capacidad máxima de succión que registra es de 100 cbar, es decir, 1 bar, que representa una pequeña parte del rango de humedad disponible en el suelo. El límite inferior de humedad en el suelo para un adecuado crecimiento de los cultivos se encuentra más allá de la máxima medida que

el tensiómetro puede ofrecer. Su uso desde el punto de vista agronómico sólo es útil en suelos arenosos, donde una gran parte de la humedad disponible se mantiene a una tensión inferior a 1 bar (Susha Lekshmi et al. 2014).

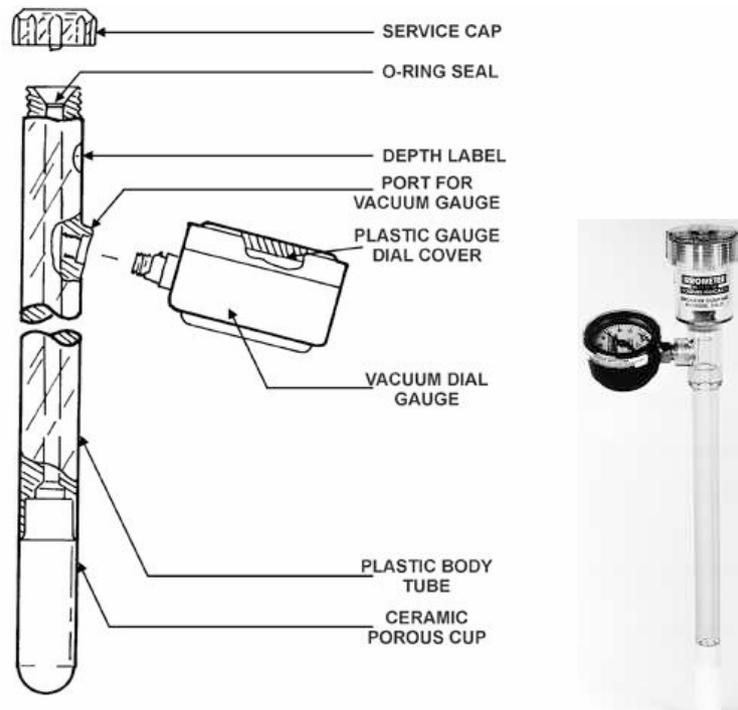


Figura 2-8. Esquema de un tensiómetro (Muñoz-Carpena et al. 2004).

2.1.2.11 Técnicas ópticas

Las técnicas ópticas se basan en el cambio en las características de la luz incidente y reflejada cuando ésta pasa a través del suelo. Entre las técnicas ópticas más conocidas se encuentran la técnica de luz polarizada, los sensores de fibra óptica y los sensores de infrarrojos cercanos (Zazueta & Xin 1994; Susha Lekshmi et al. 2014; Kaleita et al. 2005).

La técnica de luz polarizada se basa en el principio de que la presencia de agua en la superficie de reflexión tiende a generar una polarización en el haz reflejado. En esta técnica se aplica una luz monocromática sobre la superficie del suelo, y la luz reflejada se hace pasar por un polarizador situado sobre una fotocélula. Al hacer rotar al polarizador se forman señales verticales y horizontales que son detectadas por la fotocélula. El porcentaje de luz visible polarizada de cada uno de estos tipos de señales está relacionado con el contenido hídrico del suelo. Esta técnica requiere calibración en función del tipo de suelo y de su rugosidad (Susha Lekshmi et al. 2014; Zazueta & Xin 1994; Kaleita et al. 2005).

Por su parte, los sensores de fibra óptica consisten en la introducción de dicha fibra en el suelo. La atenuación de la luz en la fibra varía en función de la cantidad de agua en contacto con la misma. El contenido hídrico del suelo se cuantifica en base a la

medida de parámetros como el índice de refracción y el ángulo crítico de fricción interna de la onda lumínica (Alessi & Prunty 1986).

Finalmente, los sensores de infrarrojos cercanos se basan en la existencia de varias bandas de frecuencia en el espectro, cercanas a los infrarrojos, que pueden ser absorbidas por las moléculas de agua en sus capas superficiales. En concreto, las longitudes de onda de 1450, 1940 y 2950 nm son las más propensas. Las medidas obtenidas mediante esta técnica dependen de las características de la superficie del suelo. Además, los doseles extensos de vegetación restringen la reflexión en el suelo de las ondas con una longitud situada en la región cercana a los infrarrojos, viéndose afectada la exactitud de la medida (Susha Lekshmi et al. 2014).

Estudios como el de (Alwis et al. 2013) realizan un análisis de las diferentes técnicas ópticas de medida de humedad y sus determinadas ventajas con respecto a otros métodos. Sin embargo, su aplicabilidad a diferentes tipos de suelo y su dependencia respecto a la temperatura del mismo se encuentran aún por estudiar (Susha Lekshmi et al. 2014).

A continuación se muestra, a modo de resumen, una tabla comparativa de las técnicas descritas más relevantes, basada en la que se presenta en (Susha Lekshmi et al. 2014).

Tabla 2-2. Resumen comparativo de las técnicas de medida de contenido de agua en el suelo más importantes

Técnica	Flexibilidad de uso	Profundidad de medida	Principio	Especificación principal	Tiempo de respuesta	Coste (USD)	Observaciones
Termo-gravimétrica	Laboratorio	Cualquiera	Evaporación	105°C	24 h	≈400	Sin riesgo para la salud, gran consumo de tiempo, técnica destructiva
Dispersión de neutrones	In situ	<0,3 m	Dispersión de neutrones	Energía media de los neutrones 5 MeV	1-2 min	≈10000	Riesgo para la salud, tiempo de respuesta inmediato, mayor aplicabilidad en el subsuelo
TDR	In situ/Lab	0,3-0,6 m	Constante dieléctrica	Frecuencia de trabajo hasta 1 GHz	28 s	≈8000	Sin riesgo para la salud, método no invasivo, respuesta inmediata, fallo en suelos altamente salinos, dependencia de la frecuencia
FDR y capacitivo	In situ/Lab	1 m	Constante dieléctrica	Frecuencia de trabajo típica 10-150 MHz	Instantáneo	100-4000	Sin riesgo para la salud, requiere calibración específica, falla en suelos altamente salinos, dependencia de la frecuencia
Resistividad/Wenner	In situ/Lab	0,1-0,3 m	Resistencia eléctrica	-	Instantáneo	5-30	Sin riesgo para la salud, dependencia de la salinidad
Disipación térmica	In situ/Lab	0,1-0,3 m	Disipación de calor	50-200 mA	2-3 h	100-150	Sin riesgo para la salud, requiere calibración individual
Tensiométrica	In situ/Lab	0,15-0,6 m	Succión o tensión negativa	0-1 atm	2-3 h	≈75	Sin riesgo para la salud, consumo de tiempo, método indirecto

2.2 Sensores FD comerciales y equipos experimentales

Antes de llevar a cabo el diseño de un nuevo sensor capacitivo de bajo coste es necesario conocer las prestaciones de los diferentes modelos existentes en el mercado y los equipos experimentales desarrollados o en fase de desarrollo.

2.2.1 Sensores comerciales

Entre los sensores en el dominio de la frecuencia más conocidos y utilizados del mercado se encuentran los siguientes:

- Decagon ECH₂O EC-5

Se trata del sensor capacitivo de Decagon de pequeño tamaño. Su principio de funcionamiento se basa en la medida del tiempo de carga del condensador formado por sus dientes (armadura) y el suelo (dieléctrico). Sus dientes de 5 cm de largo permiten medir el contenido volumétrico de agua en el suelo y la permitividad dieléctrica en un volumen de aproximadamente 0,2 L. Para tal fin, trabaja a una frecuencia de 70 MHz, pretendiendo minimizar la influencia de la textura y la salinidad.

Dado su tamaño y aspecto, es quizás, el modelo más parecido al sensor desarrollado en este trabajo.



Figura 2-9. Sensor Decagon ECH₂O EC-5.

Sus principales características y especificaciones se muestran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Especificaciones técnicas del sensor Decagon ECH₂O EC-5.

Exactitud	Suelo mineral: ±3% VWC; hasta 8dS/m ±1-2% VWC con calibración específica. Lana de roca: ±3% VWC; 0,5-0,8 dS/m Tierra abonada: ±3% VWC; 3-14 dS/m
Resolución	Suelo mineral: 0,1% VWC Lana de roca: 0,25% VWC
Rango	Depende de la calibración; 0-100% VWC con ecuación polinómica.
Dimensiones	8,9 x 1,8 x 0,7 cm
Tiempo de medida	10 ms
Alimentación	2,5-3,6 VDC @ 10mA
Salida	10-40% V _{in}
Temperatura de operación	-40 a 50°C

A pesar de que el fabricante lo considera como un sensor de bajo coste, su precio en el mercado es de aproximadamente 120€, bastante superior al de los realmente considerados como sensores de bajo coste (10-20€).

- Decagon ECH₂O 10HS

Se trata del sensor capacitivo de Decagon de mayor tamaño. Es similar al modelo ECH₂O EC-5, aunque la longitud de 10 cm de sus dientes le permite realizar medidas con precisión en un volumen de suelo de hasta 1,3 L. Este modelo será el utilizado para comparar los resultados obtenidos con el sensor desarrollado en el presente estudio. Su precio se encuentra en torno a los 120€.



Figura 2-10. Sensor Decagon ECH₂O 10HS.

Tabla 2-4. Especificaciones técnicas del sensor Decagon ECH₂O 10HS.

Exactitud	Permitividad dieléctrica aparente (ϵ_a): $\pm 0,5$ para ϵ_a desde 2 hasta 10, $\pm 2,5$ para ϵ_a desde 10 hasta 50. Contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC): Utilizando la ecuación de calibración estándar: $\pm 3\%$ VWC en suelos minerales con una conductividad eléctrica < 10 dS/m. Utilizando la calibración específica: $\pm 2\%$ VWC en cualquier suelo.
Resolución	ϵ_a: 0,1 para ϵ_a desde 1 hasta 30; 0,2 para ϵ_a desde 30 hasta 50. VWC: 0,08% VWC en suelos minerales de 0 a 50% VWC.
Rango	ϵ_a: 1 (aire) a 50. VWC: Depende de la calibración; 0-57% VWC con ecuación polinómica.
Dimensiones	14,5 x 3,3 x 0,7 cm
Tiempo de medida	10 ms
Alimentación	Desde 3 VDC @ 12mA hasta 15 VDC @ 15mA
Salida	300-1250 mV, independiente de la tensión de excitación.
Temperatura de operación	0 a 50°C

- Decagon 5TM

El modelo 5TM es la evolución del EC-5. No sólo mide el contenido volumétrico de agua en el suelo, sino también la temperatura, mediante un termistor superficial colocado junto a uno de los dientes y bajo el aislante de poliuretano. Este modelo cuenta con tres dientes, en lugar de dos, como en los

modelos anteriores y con un protocolo de comunicación SDI-12, por lo que se considera un sensor digital.



Figura 2-11. Sensor Decagon 5TM.

Tabla 2-5. Especificaciones técnicas del sensor Decagon 5TM.

Exactitud	<p>Permitividad dieléctrica aparente (ϵ_a): ± 1 para ϵ_a desde 1 hasta 40, $\pm 15\%$ para ϵ_a desde 40 hasta 80.</p> <p>Contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC): Utilizando la ecuación de calibración estándar: $\pm 3\%$ VWC en suelos minerales con una conductividad eléctrica < 10 dS/m. Utilizando la calibración específica: $\pm 2\%$ VWC en cualquier medio poroso.</p> <p>Temperatura: $\pm 1^\circ\text{C}$</p>
Resolución	<p>ϵ_a: 0,1 para ϵ_a desde 1 hasta 20; $< 0,75$ para ϵ_a desde 20 hasta 80.</p> <p>VWC: 0,08% VWC en suelos minerales de 0 a 50% VWC.</p> <p>Temperatura: 0,1$^\circ\text{C}$</p>
Rango	<p>ϵ_a: 1 (aire) a 80 (agua).</p> <p>Temperatura: -40 a 60$^\circ\text{C}$</p>
Dimensiones	10 x 3,2 x 0,7 cm
Tiempo de medida	150 ms
Alimentación	3,6 – 15 VDC, 0,3 mA(inactivo) , 10 mA durante la medida.
Salida	RS232 ó SDI-12

- Decagon 5TE

El modelo 5TE es prácticamente igual que el 5TM, sólo que cuenta con un tornillo en dos de sus dientes que le permite medir la conductividad eléctrica del terreno.



Figura 2-12. Sensor Decagon 5TE.

Tabla 2-6. Especificaciones técnicas del sensor Decagon 5TE.

Exactitud	<p>Permitividad dieléctrica aparente (ϵ_a): ± 1 para ϵ_a desde 1 hasta 40, $\pm 15\%$ para ϵ_a desde 40 hasta 80.</p> <p>Contenido volumétrico de agua en el suelo (VWC): Utilizando la ecuación de calibración estándar: $\pm 3\%$ VWC en suelos minerales con una conductividad eléctrica < 10 dS/m. Utilizando la calibración específica: $\pm 2\%$ VWC en cualquier medio poroso.</p> <p>Temperatura: $\pm 1^\circ\text{C}$</p> <p>Conductividad eléctrica: $\pm 10\%$ de 0 a 7 dS/m.</p>
Resolución	<p>ϵ_a: 0,1 para ϵ_a desde 1 hasta 20; $< 0,75$ para ϵ_a desde 20 hasta 80.</p> <p>VWC: 0,08% VWC en suelos minerales de 0 a 50% VWC.</p> <p>Temperatura: 0,1$^\circ\text{C}$</p> <p>Conductividad eléctrica: 0,01 dS/m de 0 a 7 dS/m; 0,05 dS/m de 7 a 23,1 dS/m.</p>
Rango	<p>ϵ_a: 1 (aire) a 80 (agua).</p> <p>Temperatura: -40 a 60°C</p> <p>Conductividad eléctrica: 0 – 23 dS/m (relativa)</p>
Dimensiones	10 x 3,2 x 0,7 cm
Tiempo de medida	150 ms
Alimentación	3,6 – 15 VDC, 0,3 mA(inactivo) , 10 mA durante la medida.
Salida	RS232 ó SDI-12

- Bambach Tensio-Technik SMT 100

Este sensor no es un sensor capacitivo, aunque su difundido uso lleva a incluirlo en este análisis, pudiendo servir como elemento comparativo en cuanto a prestaciones. Combina el bajo coste de los sensores FDR con la precisión de los TDR. Al igual que los TDR, se basa en el tiempo que tarda en viajar una señal para determinar la constante dieléctrica del suelo. Y, del mismo modo que en un FDR, la medición se realiza en frecuencia. Para tal fin dispone de un oscilador de anillo que transforma el tiempo de viaje de la señal en la frecuencia medible. Las frecuencias alcanzadas (> 100 MHz) son suficientemente altas como para que su funcionamiento sea adecuado en suelos arcillosos. Ofrece tanto la medida del contenido volumétrico de agua en el suelo como la

temperatura del mismo. Además, existe tanto la versión digital como la analógica.

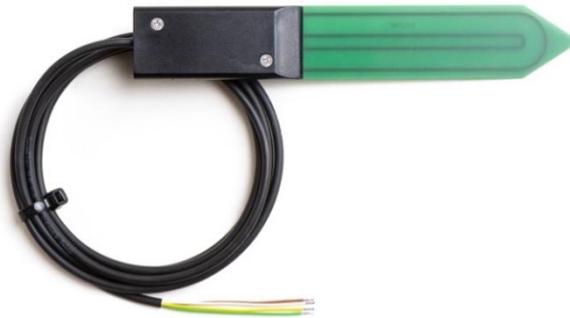


Figura 2-13. Sensor Bambach Tensio-Technik SMT 100.

Tabla 2-7. Especificaciones técnicas del sensor Bambach Tensio-Technik SMT 100.

	Digital	Analógico
Exactitud	VWC: Utilizando la ecuación de calibración estándar: $\pm 3\%$ Utilizando la calibración específica: $\pm 1\%$	
	Temperatura: $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	Temperatura: $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$
Resolución	VWC: 0,1%	
	Temperatura: 0,01 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura: 0,2 $^{\circ}\text{C}$
Rango	VWC: 0-60% (0-100% con exactitud limitada)	
	Temperatura: -40 a 80 $^{\circ}\text{C}$	Temperatura: -40 a 60 $^{\circ}\text{C}$
Dimensiones	18,2 x 3 x 1,2 cm	
Alimentación	4 – 24 VDC @ máx. 40 mA	12 – 24 VDC @ máx. 40 mA
Salida	RS485 con protocolo UGT	
		2x 0-1 V

- Spectrum SM 100 WaterScout

Este sensor presenta un aspecto similar al Bambach Tensio-Techni SMT 100 y trabaja a una frecuencia de 80 MHz.



Figura 2-14. Sensor Spectrum SM 100 WaterScout.

Tabla 2-8. Especificaciones técnicas del sensor Spectrum SM 100 WaterScout.

Exactitud	±3% VWC; hasta 8dS/m
Resolución	0,1% VWC
Rango	0% - Saturación
Dimensiones	6 x 2 x 0,3 cm
Alimentación	3-5 VDC @ 6 – 10 mA
Salida	Proporcional a la alimentación (0,5 – 1,5 V para $V_{in} = 3$ V.
Temperatura de operación	-0,5 a 80°C

- Delta-T SM150T

Se trata de un sensor basado en tecnología FDR. Este tipo de sensores suelen presentar dientes cilíndricos de acero o anillos y miden la frecuencia de resonancia, relacionada con la permitividad dieléctrica del suelo. Este modelo trabaja a 100 MHz y ofrece, además, la medida de la temperatura y de la salinidad del suelo. Sus diferentes características se muestran en la Tabla 2-9.



Figura 2-15. Sensor Delta-T SM150T.

Tabla 2-9. Especificaciones técnicas del sensor Delta-T SM150T.

Exactitud	VWC: ±3% Temperatura: ±0,5°C
Rango	VWC: 0 – 100% (Menor exactitud a partir de 70%) Salinidad: 50 – 1000 mS/m (0 – 60% VWC) Temperatura: 0 – 60°C
Dimensiones	Conjunto: 14,3 x 4Ø cm Dientes: 5,1 x 0,25Ø cm
Tiempo de medida	1 s
Alimentación	5 – 14 VDC @ 18mA durante la medida
Salida	0 – 1 V

- Delta-T ML3 ThetaProbe

Se trata de una variante del SM150T que mejora la exactitud en la medida en detrimento del rango medible.



Figura 2-16. Sensor Delta-T ML3 ThetaProbe.

Tabla 2-10. Especificaciones técnicas del sensor Delta-T ML3 ThetaProbe.

Exactitud	VWC: ±1% Temperatura: ±0,5°C (De 0 a 40°C) ±0,75°C (De -20 a 60°C)
Rango	VWC: 0 – 50% Salinidad: 50 – 500 mS/m (0 – 3,5% VWC)
Dimensiones	Conjunto: 17 x 4Ø cm
Tiempo de medida	1 s
Alimentación	5 – 14 VDC @ 18mA durante la medida
Salida	0 – 1 V

- Sentek EnviroSCAN

El EnviroSCAN, antes denominado EnviroSMART, se trata de un sensor capacitivo de forma cilíndrica con múltiples sondas dispuestas a lo largo de su longitud en forma de anillos metálicos. Su estructura permite llegar a mayores profundidades (hasta 2 m por defecto) y realizar medidas a diferentes profundidades (cada 10 cm) al mismo tiempo. Se introduce en un tubo protector de PVC instalado en el suelo, y el campo magnético de alta frecuencia generado por sus anillos alcanza el terreno atravesando el tubo. Se comunica mediante el protocolo SDI-12 y, en su versión TriSCAN, también ofrece la medida de la salinidad del suelo. Es uno de los equipos más utilizados en fincas comerciales para el control y la gestión automática del riego, así como en trabajos de investigación sobre la dinámica del agua en el suelo, el uso del agua por los cultivos y estimaciones de drenaje y lixiviación de nitratos (Thompson et al. 2007).



Figura 2-17. Sensor EnviroSCAN.

Tabla 2-11. Especificaciones técnicas del sensor EnviroSCAN.

Exactitud	VWC: $R^2 \geq 0,992$; Precisión: $\pm 0,003\%$ VWC Salinidad: $\pm 1,8\%$ (Suelo saturado con baja conductividad $55\mu\text{S/cm}$) $\pm 0,4\%$ (Suelo saturado con conductividad media: hasta $5600\mu\text{S/cm}$)
Rango	VWC: 0 –65% Salinidad: 0 – 17 dS/m
Resolución	VWC: 0,1% Salinidad: $1\mu\text{S/cm}$ (Suelo saturado con baja conductividad $55\mu\text{S/cm}$) $25\mu\text{S/cm}$ (Suelo saturado con conductividad media: hasta $5600\mu\text{S/cm}$)
Dimensiones	Sensor: 50 x 5,05Ø cm Tubo acceso: 5,65Ø cm
Tiempo de medida	1,1 s
Alimentación	12 VDC @ 100mA durante la medida @ 66 mA Standby @ 0,25 mA Sleep
Salida	SDI-12

Algunos sensores similares al EnviroSCAN son el C-Probe, Drill & Drop Probe, EasyAG Probe, AquaCheck Probe, EnviroPro o HydraScout. Todos ellos presentan la misma estructura y varían ligeramente sus prestaciones, siendo el EnviroSCAN el dispositivo de referencia.

- Stevens Hydra Probe II

El sensor Hydra Probe II de Stevens se basa en un principio de funcionamiento diferente al de los sensores capacitivos y FDR, es a lo que llaman Reflectometría Coaxial de Impedancia Dieléctrica. Sin embargo, se incluye en este análisis por su similitud con los sensores FDR y su extendido uso, siendo uno de los dispositivos de referencia a nivel comercial y en trabajos

de investigación. A diferencia de los dispositivos FDR y capacitivos, este sensor separa la parte real de la permitividad dieléctrica (asociada al almacenamiento de energía) y la parte imaginaria (asociada a las pérdidas de energía), ayudando a reducir los errores en la medida, motivados por los efectos de la temperatura, por la salinidad y por el tipo de suelo. Al igual que los sensores FD, emplea un oscilador que genera una señal, en este caso, de frecuencia 50 MHz. Según el fabricante, ofrece una exactitud permanente a largo plazo en la medida de humedad, conductividad eléctrica relativa y temperatura en cualquier tipo de suelo, así como una muy baja variabilidad entre sensores. Su extendido uso hace que, a lo largo de los años, los aportes de numerosos investigadores hayan permitido establecer los coeficientes para la calibración de este sensor en la mayoría de texturas de suelo (Bellingham 2007). Su precio es de 425\$.



Figura 2-18. Sensor Hydra Probe II.

Tabla 2-12. Especificaciones técnicas del sensor Hydra Probe II.

Exactitud	VWC: ±1% para mayoría de suelos; ±3% máx. para suelos de textura fina Parte real permitividad dieléctrica: ±0,5% (±0,2 unidades dieléctricas) Conductividad eléctrica relativa: ±2% (±0,02 S/m) Temperatura: ±0,3°C Variabilidad entre sensores: ±1,2% VWC
Rango	VWC: 0% – Saturación Parte real permitividad dieléctrica: 1 (aire) a 80 (agua). Conductividad eléctrica relativa: 0 – 1,5 S/m Temperatura: -10 a 60°C
Resolución	VWC: 0,1% Parte real permitividad dieléctrica: 0,001 Conductividad eléctrica relativa: 0,001 Temperatura: 0,1°C
Dimensiones	12,4 x 4,2Ø cm
Alimentación	9 – 20 VDC @ 10mA durante la medida @ <1 mA Standby
Salida	SDI-12

2.2.2 Sensores experimentales y de bajo coste

Los sensores comerciales ofrecen grandes prestaciones, aunque suponen una inversión económica importante que, en la mayoría de los casos no es abordable por el agricultor. Por este motivo, algunos investigadores trabajan en el desarrollo de sensores de humedad del suelo de bajo coste, con el objetivo de ofrecer un producto de calidad similar a los productos comerciales y que resulte asequible al pequeño agricultor. En este sentido, se presentan a continuación algunos de los estudios llevados a cabo en lo que respecta a la tecnología basada en el dominio de la frecuencia.

Uno de los casos más recientes es el trabajo de (Vázquez de León et al. 2015), quienes desarrollan un sensor capacitivo de bajo coste (< 10€) y evalúan la influencia que tienen en su funcionamiento diferentes aspectos, como la frecuencia de trabajo, el amplificador operacional utilizado, el tipo de sonda o el aislante de la misma. Asimismo, utilizan dos métodos de funcionamiento diferentes: el primer método consiste en utilizar la sonda como el componente capacitivo de un filtro paso bajo, mientras que el segundo utiliza la sonda como elemento capacitivo en un circuito oscilador, midiendo el tiempo de carga y descarga del condensador.

Las frecuencias del oscilador utilizadas son 250 kHz, 125 kHz, 62,5 kHz y 31 kHz. Se trata de frecuencias bastante inferiores a las normalmente encontradas en la bibliografía para este tipo de sensores, y el objetivo de ello es abaratar el coste de los componentes. A su vez, se experimenta con cinco amplificadores operacionales diferentes: dos amplificadores dobles (LM358 y OPA2134) y tres amplificadores cuádruples (TL074, MC33079 y TLC274). Se desarrollan dos modelos de sonda diferentes. Uno de ellos consiste en una tarjeta de circuito impreso de doble cara rectangular con doble huella en forma de dedos entrelazados. El otro consiste en una placa de circuito impreso con dos dientes afilados de doble cara. Ambos modelos se cubren con dos tipos de aislante diferente: barniz y esmalte de uñas.

Los resultados obtenidos sugieren que la sonda tipo diente con recubrimiento de esmalte de uñas puede ofrecer un buen funcionamiento trabajando a 125 kHz con un amplificador operacional LM358. Y, además, las características físicas de la sonda son tan influyentes como las eléctricas.

Por otro lado, (Carlos & Capraro 2008) desarrollan el sensor capacitivo INAUT. La sonda del mismo consiste de nuevo en un condensador de placas planas paralelas, construidas en fibra de vidrio con una cara cubierta por una película de cobre. Esta cara de cobre se instala hacia el interior, donde queda en contacto con el dieléctrico. El dieléctrico es una placa de policarbonato compacto cristal. Esto permite la generación de dos condensadores en paralelo cuyas capacitancias se suman: el que se forma con el dieléctrico de policarbonato y el que se forma con el suelo como dieléctrico. Éste último da lugar a la generalmente llamada capacitancia parásita, que se genera en los bordes, tal como muestra la Figura 2-19. Este sensor trabaja a una frecuencia de oscilación que varía entre 55 y 75 MHz en lo largo del rango medible. Sin embargo, se divide por 1000

para que pueda ser medida por el microprocesador. Según (Carlos & Capraro 2008), este sensor ofrece una resolución de 0,1%.

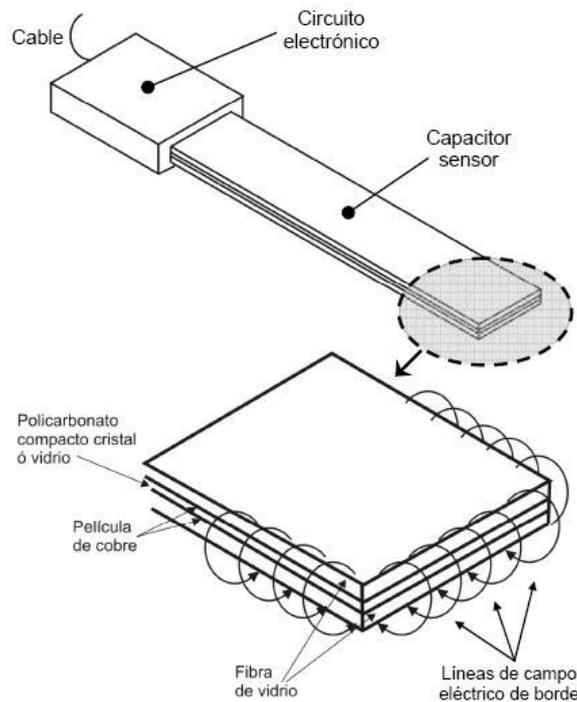


Figura 2-19. Sensor INAUT. Esquema de la sonda y distribución de las líneas de campo (Carlos & Capraro 2008).

Uno de los primeros diseños de sensor capacitivo de humedad del suelo es el realizado por (Whalley et al. 1992). Se trata de un prototipo similar al actual EnviroSCAN que, de igual forma, se introducía en un tubo de acceso en el suelo. Tras trabajar a bajas frecuencias llegan a la conclusión de que la frecuencia del oscilador debe ser superior a 30 MHz para evitar los efectos de la salinidad del suelo. De esta forma elaboran un sensor que trabaja a una frecuencia de 150 MHz. La sonda tiene forma de placa plana, cuyos bordes son de acero y están separados por una lámina de madera que los mantiene distanciados.

En el proceso de calibración de este sensor se observa que la variabilidad de las medidas se debe en un 88% al contenido de agua del suelo y a la densidad aparente del mismo. Asimismo, se afirma que el tamaño de la sonda tiene como principal criterio el volumen de terreno sobre el que se desea obtener información.

(Eller & Denoth 1996) experimentan con un sensor FDR utilizando un analizador vectorial que les permite analizar su comportamiento a diferentes frecuencias. La sonda presenta tres dientes de acero, en forma de tenedor. Realizan la medida de la constante dieléctrica de diferentes suelos en un rango de frecuencia desde 500 kHz hasta 95 MHz y afirman que trabajando a frecuencias de entre 25 MHz y 200 MHz, la relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo y la parte real de permitividad dieléctrica del mismo es independiente del tipo de suelo. Sin embargo, la parte imaginaria de la permitividad dieléctrica sí que varía de un suelo a otro.

Por su parte, (Wobschall 1978), desarrolló un sensor FDR analizando y justificando las diferentes características constructivas y eléctricas del diseño. Este dispositivo dispone de un oscilador cuya frecuencia de resonancia cambia en función del contenido hídrico del suelo. Esto es detectado por un medidor diferencial de frecuencia externo. La geometría de la sonda consiste en dos electrodos planos en forma de anillo que albergan entre sí al circuito oscilador, en una estructura tipo sándwich. Con ello se consigue una distribución del campo eléctrico generado similar a la obtenida en los típicos sensores cilíndricos con electrodos en anillo, como es el caso del EnviroSCAN. Con la disposición de los electrodos planos en lugar de en forma cilíndrica se consigue obtener un mayor espacio entre ellos y un mayor perímetro, evitando los errores que se pudieran producir en la medida como consecuencia del tamaño de las partículas. Es decir, si en el suelo existen partículas con un tamaño superior al abarcable por el campo eléctrico generado, se puede incurrir en errores. Respecto a la frecuencia de trabajo, se considera que cuanto mayor sea ésta, menores serán los cambios propiciados en la constante dieléctrica medida con respecto a su valor original. Se estima que en suelos arenosos se producen ligeras desviaciones para frecuencias inferiores a 10 MHz, mientras que en suelos arcillosos sucede hasta el límite de los gigahercios (Wobschall 1977; T. Selig & Mansukhani 1975; Mitchell & Arulanandan 1968). Por tanto, a pesar de que lo deseado era una frecuencia de trabajo lo más alta posible, las limitaciones económicas y técnicas le llevaron a seleccionar una frecuencia de 31 MHz.

Un prototipo bastante fuera de lo común es el desarrollado por (Kojima et al. 2016). En este caso se hace uso de la última tecnología para el desarrollo de un sensor capacitivo de bajo coste. Los electrodos del sensor se construyen en formato de circuito impreso pelicular; en concreto, se imprime un sustrato de cobre en una lámina de tereftalato de polietileno (PET). Esto permite reducir el coste con respecto a los circuitos impresos convencionales. Se disponen tres sensores a lo largo de la sonda separados 10 cm entre sí, tal como muestra la Figura 2-20. Cada electrodo es un rectángulo de 55 x 25 mm y están separados entre sí 1 mm, formando un condensador. Asimismo, se incluyen en la sonda diferentes sensores de temperatura, también en formato pelicular. En el extremo del circuito laminar (izquierda de la Figura 2-20), las pistas se conectan a un circuito electrónico de medida. El circuito laminar se enrolla en un tubo de PVC y se cubre con una lámina termo-retráctil de PET, tal como se muestra en la Figura 2-21. Otro de los elementos innovadores de este prototipo es el uso de un sensor capacitivo táctil, similar al utilizado en las pantallas táctiles de los diversos dispositivos electrónicos actuales. Su extendido uso en smartphones y tablets, entre otros, hace que su precio sea bastante bajo. Esto implica también que las frecuencias de trabajo sean menores (50 kHz – 3 MHz). En concreto, para el prototipo desarrollado en el citado estudio, se utiliza un sensor capacitivo táctil MPR121 controlado por un microcomputador LPC1114 y se trabaja a una frecuencia de 62 kHz, ya que ofrece la mejor resolución a la salida para las condiciones dadas.

Uno de los inconvenientes percibidos en este prototipo es su sensibilidad al contacto con el suelo. Se ha observado que la medida no es razonable hasta que no se separa el sensor del suelo, aunque dicho problema se puede solventar aumentando la frecuencia de trabajo del sensor capacitivo táctil.

El precio estimado de este sensor es de 200\$, aunque la producción en serie abarataría su coste.

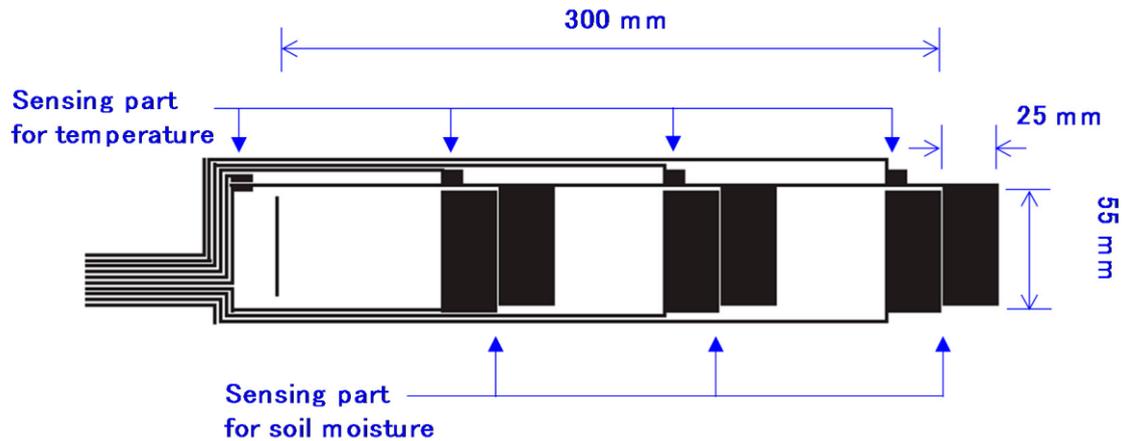


Figura 2-20. Esquema del sustrato de cobre impreso sobre la película de PET (Kojima et al. 2016).



Figura 2-21. Sensores desarrollados por (Kojima et al. 2016).

Finalmente, (Mander & Arora 2014) desarrollan un prototipo de sensor capacitivo de bajo coste basado en un oscilador 555 con un convertidor frecuencia-tensión (LM2907) para la adquisición y acondicionamiento de la señal. El procesado de la misma se lleva a cabo mediante una serie de amplificadores, que aumentan la magnitud de la señal para su entrada en un convertidor analógico-digital (ADC 0804), que permite enviar la señal a un microcontrolador 8051. Asimismo se utiliza un regulador de tensión LM7805 para establecer la tensión de alimentación del circuito.

3 MATERIAL Y MÉTODOS

Tras analizar las diferentes tecnologías relacionadas con la medida del contenido hídrico del suelo y enumerar los equipos comerciales más importantes y algunos de los diseños experimentales desarrollados, se describen en este capítulo algunos aspectos relacionados con el diseño del sensor desarrollado en este trabajo y con el procedimiento de calibración del mismo.

Por un lado, se presenta una descripción del suelo, sus tipos, propiedades y características, ya que su naturaleza influye de manera esencial en el comportamiento del sensor y en la calibración del mismo.

Por otro lado, se justifica empíricamente el uso de la medida dieléctrica como indicador de agua en el suelo, profundizando en los conceptos presentados en el capítulo anterior.

Finalmente, se describe el protocolo seguido para la calibración del sensor.

3.1 El suelo

La definición de suelo es diferente, dependiendo del contexto y de la época. La Ciencia del Suelo comienza a perfilarse a mediados del siglo XIX con las publicaciones del alemán Karl Sprengel, donde considera el suelo como un ente natural. En esta misma época, otro alemán, Frank Albert Fallou, utiliza por primera vez el término “*Pedologie*”, *Pedología* en castellano, para hacer referencia al tratamiento del suelo de un modo no sólo general, sino específico (Porta Casanellas et al. 2003). No es sino hasta la publicación de la tesis doctoral del eminente Vassilievith Dokuchaev en 1883 y a la posterior labor de Müller, introduciendo los conceptos de horizontes espódicos y de perfil, cuando se reconoce la diferenciación de dos disciplinas dentro de la Ciencia del Suelo: la edafología y la pedología.

La pedología se define como la ciencia que estudia la génesis, naturaleza, distribución y uso potencial del suelo. Comprende investigaciones de campo y laboratorio y tiene estrechas vinculaciones con la geología. La edafología, por su parte, es el estudio del suelo desde el punto de vista agronómico (Graciela 2010). De este modo, dependiendo de a qué disciplina corresponda, se pueden encontrar diferentes definiciones de suelo.

Desde el punto de vista de la pedología:

Según Dokuchaev (1870), el suelo “es un ente natural independiente que se ha formado por la alteración de la roca, debida a la acción del clima y los seres vivos en una geomorfología dada y en un espacio de tiempo dado” (Citado en Manuel Gisbert Blanquer, Ibáñez, & Moreno-Ramón, 2010, p. 1).

Ramann (1911, 1928) escribe: “El suelo es la capa superior de alteración de la corteza terrestre sólida”.

Por su parte, de acuerdo con Joffe (1936), “el suelo es un cuerpo natural donde se diferencian horizontes de mineral y constituyentes orgánicos, normalmente no consolidados, de profundidad variable, que difieren del material parental en morfología, propiedades físicas y constitución, propiedades químicas y composición, y características biológicas” (Citado en Jenny, 1994, p. 1).

Desde el punto de vista de la edafología:

Hilgard (1914) define el suelo como “El material más o menos suelto y desmenuzable en el cual, por medio de sus raíces, las plantas encuentran un punto donde afianzarse y nutrirse, así como otras condiciones de crecimiento” (Citado en Jenny, 1994, p. 1).

Una definición más reciente y que conjuga ambos puntos de vista es la del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos:

<< El suelo es un cuerpo natural formado por una fase sólida (minerales y materia orgánica), una fase líquida y una fase gaseosa que ocupa la superficie de la tierra, organizada en horizontes o capas de materiales distintos a la roca madre, como resultado de adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de materia y energía, que tiene capacidad para servir de soporte a las plantas con raíces en un medio natural. Los límites superiores del suelo son la atmósfera, las aguas superficiales poco profundas (es decir, que pueden soportar el crecimiento de raíces), las plantas vivas o el material orgánico que no ha comenzado a descomponerse. Los límites horizontales los constituyen áreas donde el suelo es invadido por aguas profundas (más de 2,5 m), materiales estériles, rocas o hielo. El límite inferior está constituido por la roca dura y continua. De manera arbitraria, la profundidad máxima del suelo se establece en 2 m >>.

3.1.1 El perfil y los horizontes del suelo

La formación del suelo comprende una serie de procesos, como son: meteorización física, alteración química y translocación de sustancias. La meteorización física da lugar a la fragmentación de la roca original en fragmentos heterogéneos y ocurre por causas esencialmente climáticas (procesos de dilatación/contracción, insolación o congelación) y geológicas, como el descenso de presión en la superficie, la cristalización de sustancias o la acción de las raíces. Por su parte, los procesos de translocación se deben a la acción del agua, variando su comportamiento en función del tipo de clima (Jordán López 2005).

La naturaleza del proceso de formación del suelo da lugar a una alteración diferencial del material, consiguiendo una estructura estratificada en capas. A cada capa

se le denomina horizonte y su superposición constituye lo que se conoce como el perfil del suelo.

Los horizontes constituyen las unidades para el estudio y la clasificación de los suelos y se establecen en función de cambios de las propiedades y constituyentes con respecto a las capas inmediatas. Para diferenciar los horizontes, generalmente basta con analizar tres propiedades: color, textura y estructura (Jordán López 2005).

Los horizontes se clasifican en función de las características del material del que están constituidos y se designan mediante letras mayúsculas. Dependiendo de la composición, algunos requieren del uso de dos letras para su denominación. Los horizontes principales son los siguientes (FAO 1998):

- H. Acumulaciones de materia orgánica sin descomponer, saturados en agua durante largos períodos. Suelen encontrarse en la superficie.
- O. Acumulaciones de materia orgánica en forma de hojarasca, musgo y líquenes acumulados en la superficie.
- A. Capa mineral formada en la superficie o bajo un horizonte O. Se caracteriza por la acumulación de una mezcla de materia orgánica húmeda y mineral, como consecuencia de actividades como el cultivo y el pastoreo, o por tener una morfología diferente a los horizontes B y C.
- E. Horizonte mineral en el que la característica principal es la pérdida de silicato de arcilla, hierro y aluminio, dejando una concentración de arena y limo, y donde la mayoría de la roca madre ha sido destruida.
- B. Horizonte enriquecido en arcilla, óxidos de hierro y aluminio o materia orgánica (no *in situ*). De colores pardos y rojos. Se compone de capas frágiles con estructura prismática.
- C. Horizonte afectado por la pérdida de propiedades de los horizontes anteriores. Formado por material mineral y, a veces, por capas silíceas y calcáreas. Sin rasgos edáficos. Se incluyen en este horizonte los sedimentos y la roca madre no consolidada.
- R. Material original. Roca dura subyacente al suelo.

3.1.2 Composición del suelo

El suelo se compone de tres fases:

- Fase sólida: agregados minerales y orgánicos.
- Fase líquida: agua de la solución del suelo.
- Fase gaseosa: atmósfera del suelo contenida en el espacio poroso.

En volumen, la fase sólida ocupa aproximadamente el 50% del total, mientras que las fases líquida y gaseosa se reparten el resto.

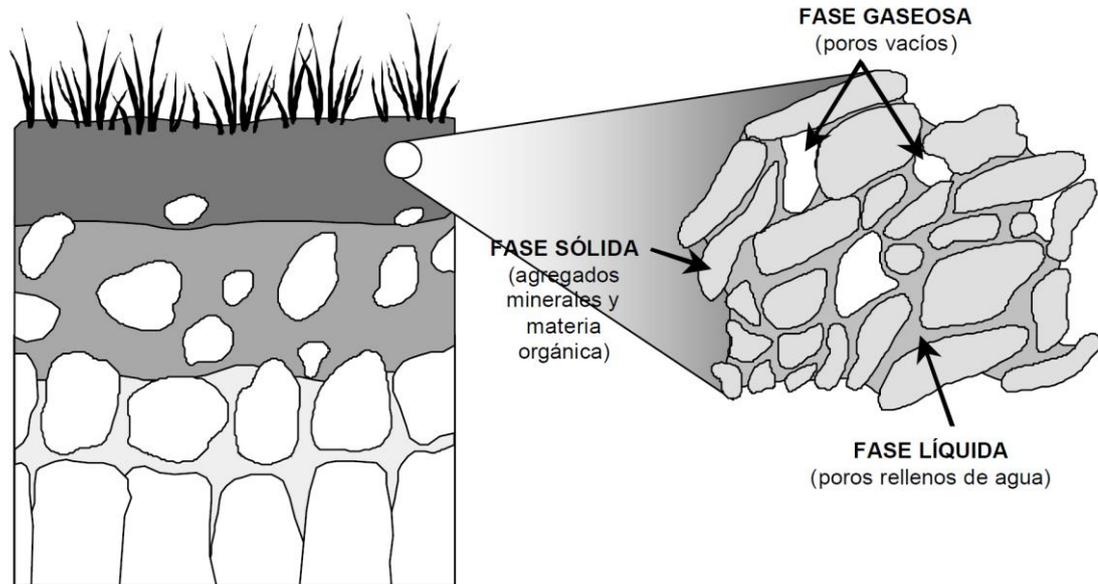


Figura 3-1. Esquema de las fases del suelo (Jordán López 2005).

La disposición de las partículas en la fase sólida define una serie de características físicas del suelo, como son: estructura, porosidad, permeabilidad y densidad.

Desde el punto de vista de la composición química del suelo, a grandes rasgos, ya que no tiene gran influencia en este estudio, se puede decir que presenta componentes sólidos inorgánicos, como son multitud de minerales de distinta naturaleza, y componentes sólidos orgánicos, como son vegetales, animales y microorganismos vivos, sus restos, y las sustancias resultantes de su degradación físico-química.

3.1.3 Propiedades físicas del suelo

El suelo presenta una serie de propiedades que resultan imprescindibles para su caracterización y ayudan a determinar la calidad y utilidad del mismo. Estas propiedades se clasifican en físicas, químicas y biológicas, aunque sólo se centrará la atención en las primeras, dada su utilidad en el presente trabajo.

Según el Portal de Suelos de la FAO (FAO n.d.), las propiedades físicas más relevantes de los suelos son:

Estructura

Las partículas texturales del suelo como arena, limo y arcilla se asocian para formar agregados y unidades de mayor tamaño. La estructura del suelo afecta directamente la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la conducción térmica, el crecimiento radicular y la resistencia a la erosión. El agua es el componente elemental que afecta a la estructura del suelo con mayor importancia, debido a su solución y precipitación de minerales y a sus efectos en el crecimiento de las plantas. En la Figura 3-2 se muestra un esquema con los tipos de estructura más comunes.

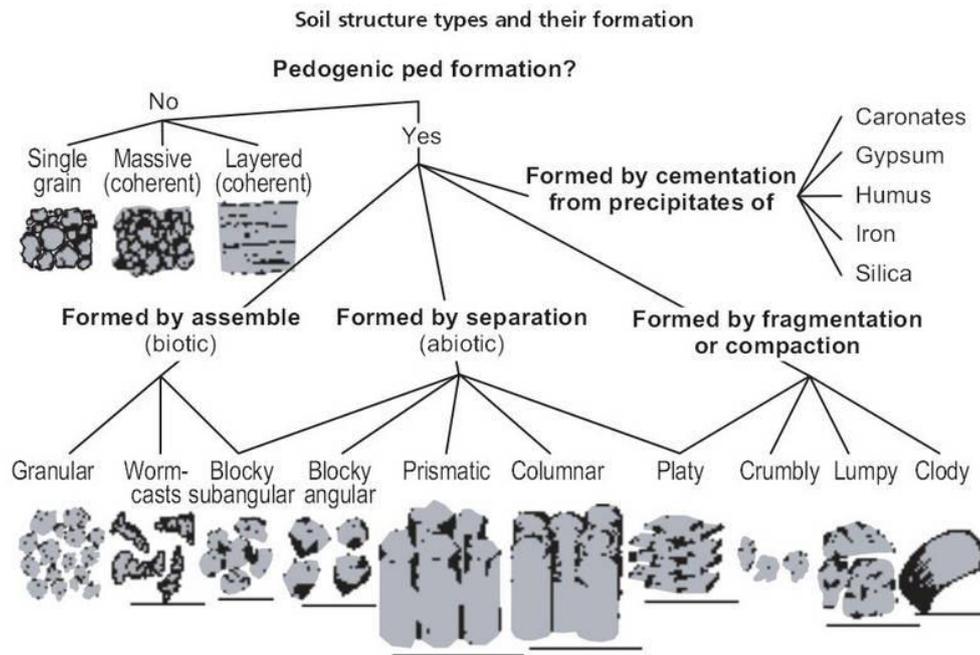


Figura 3-2. Tipos de estructura de suelo más comunes (FAO n.d.).

Profundidad

La profundidad efectiva del suelo se considera como la espesura del suelo. Sin embargo, la presencia de raíces y la actividad biológica que frecuenta a menudo en el horizonte C realza la importancia de incluir este horizonte en la definición de profundidad del suelo. En la práctica, los estudios con levantamiento de suelos utilizan límites de profundidad arbitrarios (200 cm).

Porosidad

El espacio poroso del suelo se refiere al porcentaje del volumen del suelo no ocupado por sólidos. En general, el volumen del suelo está constituido por un 50% de materiales sólidos (45% minerales y 5% materia orgánica) y un 50% de espacio poroso. Dentro del espacio poroso se puede distinguir entre macroporos, mesoporos y microporos, donde agua, nutrientes, aire y gases pueden circular o retenerse. Los macroporos no retienen agua contra la fuerza de la gravedad, son responsables del drenaje, aireación del suelo y constituyen el espacio donde se forman las raíces. Los mesoporos retienen agua, parte de la cual se encuentra a disponibilidad de las plantas, mientras que los microporos retienen agua no útil para las plantas.

Tabla 3-1. Clasificación y propiedades de los poros del suelo en función de su tamaño (Jordán López 2005).

Diámetro de poro	Tipo	Propiedades
> 30 µm	Macroporos	Permiten el movimiento libre de fluidos. El agua de lluvia se pierde por gravedad fácilmente y no puede ser aprovechada por las plantas.
30 – 10 µm	Mesoporos	Retienen el agua que pueden utilizar las plantas (agua útil).
10 – 0,2 µm	Microporos	Retienen el agua con mucha fuerza, de manera que no puede ser utilizada por las plantas.

Se definen dos parámetros importantes, como son la porosidad y el índice de poros (Muzás Labad 2007):

Porosidad (n): cociente entre el volumen que ocupan los poros (V_P) y el volumen total del suelo (suma de huecos y partículas sólidas) (V_T).

$$n = V_P/V_T \quad (3-1)$$

Índice de poros (e): cociente entre el volumen que ocupan los poros (V_P) y el volumen que ocupan las partículas sólidas (V_S).

$$e = V_P/V_S \quad (3-2)$$

Densidad y Compacidad

La porosidad de los suelos se encuentra estrechamente relacionada con la densidad. En el suelo se definen dos tipos de densidad: densidad real y densidad aparente.

La densidad real se define como la densidad de las partículas sólidas del suelo, es decir, el cociente entre la masa y el volumen ocupado por las partículas sólidas. Este valor es prácticamente constante en la mayoría de los suelos, y oscila en torno a 2,65 g/cm³. La posible variación de la densidad real del suelo se debe normalmente a la variación de la cantidad de materia orgánica (Jordán López 2005).

$$\rho_r = \frac{m_S}{V_S} \quad (g/cm^3) \quad (3-3)$$

donde,

m_S es la masa de las partículas sólidas

V_S es el volumen de las partículas sólidas

La densidad aparente o relativa es la densidad del suelo seco en su conjunto (fase sólida más fase gaseosa), es decir, se define como el cociente entre la masa de las partículas sólidas y la suma del volumen de éstas y de los poros. La densidad aparente oscila, generalmente, entre 1 g/cm³ en suelos bien estructurados y 1,8 g/cm³ en suelos muy compactados (Jordán López 2005).

$$\rho_a = \frac{m_S}{V_S + V_P} = \frac{m_S}{V_T} \quad (g/cm^3) \quad (3-4)$$

donde,

V_p es el volumen de los poros

Se puede relacionar, por tanto, la porosidad con las densidades real y aparente, mediante la siguiente expresión:

$$n = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (3-5)$$

Por otro lado, se define la densidad húmeda del suelo como el cociente entre la masa total (partículas sólidas más agua) y el volumen total del suelo:

$$\rho_h = \frac{m_s + m_w}{V_s + V_p} \quad (g/cm^3) \quad (3-6)$$

donde,

m_w es la masa de agua

Se define, además, el término compactación, como “la mayor o menor presencia de huecos entre las partículas del suelo” (Muzás Labad 2007), de manera que cuanto mayor es la densidad aparente, mayor es la compactación del suelo.

Desde el punto de vista agrícola, la compactación del suelo es una de las variables influyentes y a tener en cuenta en el desarrollo vegetativo de los cultivos. El agua, la temperatura, la presencia de oxígeno y la resistencia mecánica del suelo influyen directamente en el desarrollo de las plantas (Letey 1958).

Para un óptimo desarrollo del metabolismo de la planta es necesario que se produzca el fenómeno de aireación, consistente en el intercambio de gases entre la raíz y su entorno atmosférico. El oxígeno necesario para su respiración alcanza el entorno de la raíz por difusión. Por su parte, la resistencia mecánica del suelo afecta a la dificultad que encuentra la planta para su crecimiento, tanto en el proceso de emergencia sobre la superficie del suelo, como en el crecimiento de la raíz (Letey 1958).

No existe, sin embargo, una determinación de valores óptimos de estos factores para el crecimiento de los cultivos. Esto se debe a la alta variabilidad de los mismos en el tiempo y el espacio y a su interrelación, que impide su influencia de manera independiente.

La densidad aparente del suelo afecta de manera indirecta en el crecimiento de los cultivos, influyendo en el contenido de agua en el suelo, en la aireación, la temperatura y la resistencia mecánica del mismo. Esto se demuestra en (Rickman et al. 1965), donde se lleva a cabo un estudio del crecimiento de tomates en suelos con diferentes densidades relativas. Las densidades del suelo ensayadas van desde los 1,32 hasta los 1,76 g/cm³, teniendo todas las muestras una capa superior de 12 cm con 1,3 g/cm³ de densidad aparente para facilitar la consolidación de la raíz. En la Figura 3-3 se muestra

cómo a medida que aumenta la densidad aparente del suelo, la raíz alcanza una menor profundidad y el crecimiento de la planta sobre la superficie del suelo es menor, quedando patente que una mayor compactación del suelo afecta negativamente al desarrollo de los cultivos.

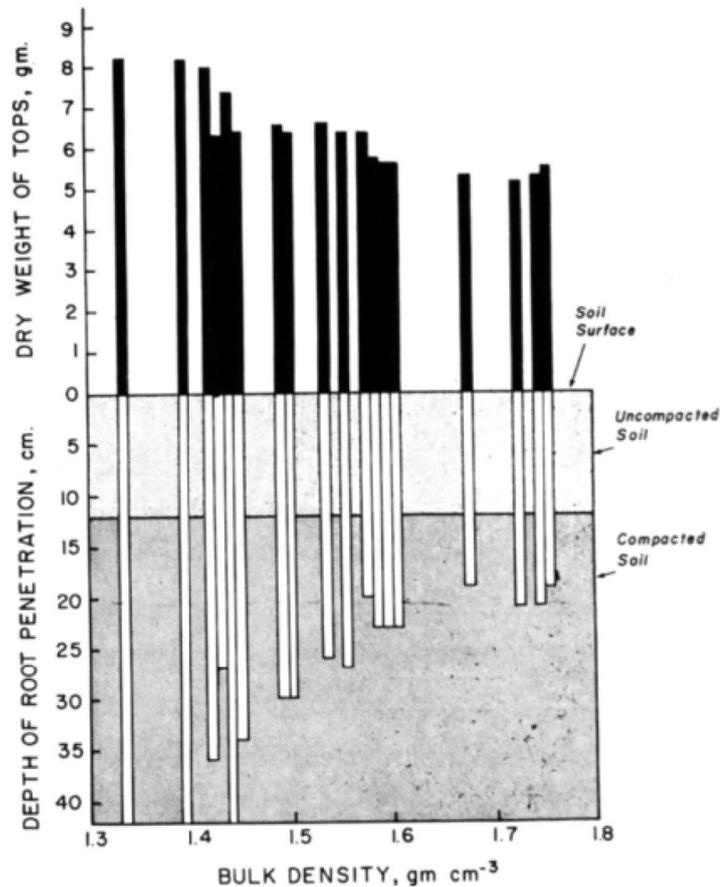


Figura 3-3. Crecimiento de plantas de tomate en suelos con diferentes densidades aparentes (Rickman et al. 1965).

Un estudio posterior de estos mismos autores (Rickman et al. 1966) trata de identificar si la influencia de la densidad aparente sobre el crecimiento de los vegetales se debe a la variación que ésta provoca en la cantidad de oxígeno difundida en el suelo o a la variación en la resistencia mecánica del mismo. Para tal fin, se llevaron a cabo ensayos con suelo muy compactado y otros con suelo poco compactado. En condiciones normales, el suelo poco compactado presenta mayor cantidad de oxígeno difundido. Sin embargo, se establecieron unas condiciones en las que se aumentaba artificialmente el contenido de oxígeno en el suelo muy compactado y se reducía en el poco compactado, consiguiendo así cuatro variedades: suelo muy compactado con alto contenido de oxígeno, suelo muy compactado con bajo contenido de oxígeno, suelo poco compactado con alto contenido de oxígeno y suelo poco compactado con bajo contenido de oxígeno. Se apreció que el crecimiento de la planta sobre la superficie del suelo era mayor cuando el contenido de oxígeno en el suelo era alto, independientemente del grado de compactación del mismo. Asimismo, aunque la penetración de la raíz en el suelo era menor en suelo muy compactado que en suelo poco compactado, se observó una mayor profundidad alcanzada por la raíz en suelo muy compactado con alto contenido de

oxígeno frente a la conseguida en suelo con la misma densidad aparente, pero con bajo contenido de oxígeno.

Se concluye, por tanto, con que una mayor compacidad del suelo perjudica el desarrollo vegetativo, infiriendo, mayormente, en la reducción de la capacidad de aireación de la planta.

Disponibilidad de agua en el suelo

La disponibilidad de agua en el suelo y la dinámica entre ambos es, quizás, una de las propiedades más importantes del suelo desde el punto de vista de la agricultura. Además, el comportamiento geológico, biológico, ecológico, hidrológico y agronómico del suelo dependen de su contenido de agua (Campbell 1974; Letey 1958; USDA 2017).

La humedad del suelo se presenta en tres formas diferentes: humedad gravitacional, humedad por capilaridad y humedad higroscópica (Briggs 1897). Según (Susha Lekshmi et al. 2014), la humedad gravitacional se define como la humedad debida al agua que se desplaza libremente a través de los macroporos del suelo como consecuencia de la fuerza de la gravedad. Su movimiento es bastante rápido y, por lo tanto, no se considera como humedad disponible. La humedad por capilaridad es la debida al agua presente en los mesoporos, la cual se mantiene retenida en el suelo por las fuerzas de cohesión y adhesión frente a la fuerza de la gravedad. Es la responsable de todas las interacciones físico-químicas entre el suelo y el entorno. Por su parte, la humedad higroscópica consiste en la formación de una capa muy fina de agua alrededor de las partículas del suelo. “Es el agua que queda retenida en los microporos” (Jordán López 2005). Debido a que el agua se encuentra fuertemente adherida a la superficie de las partículas, resulta muy difícil de eliminar.

Con el objetivo de relacionar el contenido de agua en el suelo y el desarrollo de los vegetales, (Widtsøe & McLaughlin 1912) diferencian el contenido de agua por capilaridad en dos conceptos: Capacidad de Campo y Punto de Marchitez o Marchitamiento. Según (FAO n.d.), se denomina Capacidad de Campo (CC) a la cantidad de agua que el suelo es capaz de retener después de ser saturado y dejado drenar libremente evitando la evapotranspiración y hasta que el potencial hídrico se estabilice (después de 24 a 48 horas de lluvia o riego). El punto de Capacidad de Campo corresponde a una succión de aproximadamente 1/3 bar. Las plantas deben producir una succión de hasta, aproximadamente, 15 bares como máximo para nutrirse. A partir de 15 bares de succión, la cantidad de agua en el suelo se denomina Punto de Marchitez Permanente (PMP). A ese punto las plantas pierden la capacidad de succión y siguen perdiendo agua mediante la evapotranspiración. Por su parte, se denomina Capacidad Disponible de Agua a la cantidad de agua disponible para la nutrición de las plantas, y se encuentra entre la Capacidad de Campo y el Punto Permanente de Marchitez.

Otro concepto importante que relaciona el suelo y el agua es la saturación. Ésta se refiere al contenido de agua del suelo cuando todos los espacios están llenos de agua. En los suelos bien drenados es un estado temporal, ya que el exceso de agua drena de los

poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire. En base a ello se define el grado de saturación (S_r) como el cociente entre el volumen de agua que hay en los poros (V_w) y el volumen total de los poros (V_p) (Muzás Labad 2007).

$$S_r = V_w/V_p \quad (3-7)$$

Por su parte, la propiedad más relevante en el presente estudio es el contenido de agua en el suelo o contenido de humedad del suelo. Ésta se puede expresar en forma másica (MWC) o volumétrica (VWC). En el primer caso se define como la relación entre el peso del agua que contiene el suelo y el peso del suelo seco (Muzás Labad 2007; ASTM 1998). En el caso volumétrico, se define como la relación entre el volumen de agua que contiene el suelo y el volumen total del suelo (Starr & Paltineanu 2002).

$$MWC = m_w/m_s \quad (3-8)$$

$$VWC = V_w/V_T \quad (3-9)$$

Color

El color del suelo depende de sus componentes y varía con el contenido de humedad, materia orgánica y grado de oxidación de minerales presentes. Se puede evaluar como una medida indirecta de ciertas propiedades del suelo. Se usa para distinguir las secuencias en un perfil del suelo, determinar el origen de materia parental, presencia de materia orgánica, estado de drenaje y presencia de sales y carbonato. En la Tabla 3-2 se aprecia una clasificación general de los colores de suelo que se pueden encontrar y sus propiedades asociadas.

Tabla 3-2. Colores y propiedades asociadas del suelo (Jordán López 2005)

Color	Propiedades del suelo
Oscuro o negro	Normalmente se debe a la presencia de materia orgánica, de forma que cuanto más oscuro es el horizonte superficial más contenido en materia orgánica se le supone. Es característico de horizontes A y, en ocasiones, de horizontes Bh. Si el color oscuro se restringe a nódulos y películas se le atribuye a los compuestos de hierro y, sobre todo, de manganeso.
Claro o blanco	Normalmente se debe a los carbonatos de calcio y magnesio o al yeso u otras sales más solubles. Los carbonatos pueden presentarse con distintos patrones, de manera continua o discontinua: en forma de nódulos, películas sobre los agregados o pseudomicelios. Las sales como el ClNa pueden acumularse también formando una costra superficial. La acumulación de carbonatos o sales más solubles puede deberse a la presencia de estas sustancias en el material original o a la aridez del clima. En los horizontes eluviales (E), el color claro es consecuencia del lavado de las arenas (constituidas fundamentalmente por cuarzo).
Pardo amarillento	Se debe a la presencia de óxidos de hierro hidratados, FeO(OH) (goethita), y unidos a la arcilla y a la materia orgánica.
Rojo	El color rojo aparece en el suelo como consecuencia de la alteración de minerales de arcilla, por lo que se presenta habitualmente en los horizontes Bw o Bt. Se debe a la liberación de óxidos férricos como la hematita (Fe ₂ O ₃). Este proceso se ve favorecido en climas cálidos con estaciones de intensa y larga sequía, como el clima mediterráneo. El color rojo indica un buen drenaje del suelo, lo que permite la existencia de condiciones oxidantes para formar los óxidos.
Grisés y abigarrados	Se debe a la presencia de compuestos ferrosos y férricos. Estos colores son característicos de los suelos pseudogley con condiciones alternantes de reducción y oxidación. El abigarrado o veteado se presenta como grupos de manchas de colores rojos, amarillos y grises. Esta propiedad aparece en suelos que se encharcan durante un período del año. En ocasiones, puede deberse a la actividad de raíces de plantas que viven en condiciones de encharcamiento.
Gris y/o verdoso azulado	Se debe a la presencia de compuestos como el Fe(OH) ₂ , arcillas saturadas con Fe ²⁺ . Son característicos de suelos que sufren una intensa hidromorfía. Normalmente indica una falta de oxígeno en el suelo, bien por encharcamiento, bien por una baja porosidad.
Violeta	Indica la presencia de determinados minerales, como el yeso.

En lo que respecta a los suelos agrícolas, que son los que más interés suscitan en este estudio, su color suele estar poco influenciado por la presencia de materia orgánica, de manera que distinguir entre horizontes orgánicos y minerales resulta más complicado, debiendo acudir a otras propiedades como la estructura o la textura (Jordán López 2005).

Textura

La textura hace referencia a la composición granulométrica de la fracción inorgánica del suelo (Jordán López 2005) y se define como “la proporción (en porcentaje de peso) de las partículas menores a 2 mm de diámetro (arena, arcilla y limo) existentes en los horizontes del suelo” (Manuel Gisbert Blanquer et al. 2010).

La arena es la fracción más grande del suelo y se compone principalmente de granos de cuarzo, feldespatos y micas. No posee capacidad de agregación, por lo que sus partículas no se unen entre sí y aparecen de manera individualizada.

El limo presenta una composición química similar a la de la arena, aunque lo forman partículas de menor tamaño. No presenta, al igual que la arena, capacidad de agregación, de manera que sus partículas no forman ningún tipo de estructura.

La arcilla es la fracción más pequeña. A diferencia de la arena y el limo, que proceden del fraccionamiento físico de la roca, la arcilla proviene de la alteración química del material original. Se compone, por tanto, de minerales originados por la meteorización y presenta capacidad de agregación.

El tamaño de las partículas afecta al número y tamaño de los poros, y a la superficie interna del suelo, de manera que un menor tamaño de partícula da lugar a una mayor superficie interna y a un menor volumen de poros, tal como muestra Figura 3-4.

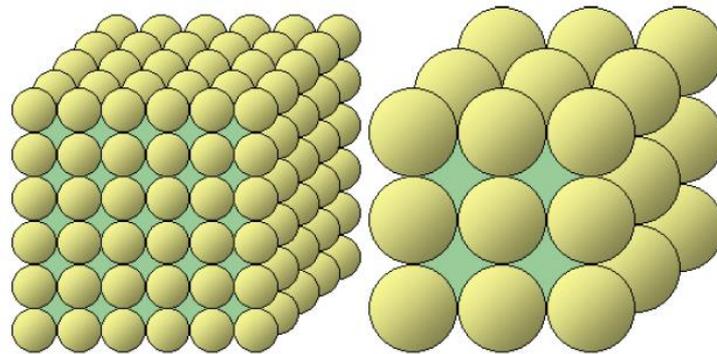


Figura 3-4. Comparación visual de dos texturas de suelo: partículas finas (izquierda) y partículas gruesas (derecha). (Jordán López 2005).

Existen diferentes clasificaciones de tamaño de partícula en función de la fuente. Así, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA 2017) y la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (ISSS 1929), establecen las siguientes:

Tabla 3-3. Clasificación del tamaño de las partículas de suelo según (USDA 2017).

USDA	Ø (µm)
Arena muy gruesa	2000 – 1000
Arena gruesa	1000 – 500
Arena media	500 – 250
Arena fina	250 – 100
Arena muy fina	100 – 50
Limo grueso	50 – 20
Limo fino	20 – 2
Arcilla gruesa	2 – 0,2
Arcilla fina	< 0,2

Tabla 3-4. Clasificación del tamaño de las partículas de suelo según (ISSS 1929).

ISSS	\varnothing (μm)
Arena gruesa	2000 – 200
Arena fina	200 – 50
Limo grueso	50 – 20
Limo fino	20 – 2
Arcilla	< 2

Se puede establecer, no obstante, una clasificación más general basada en las tres clases principales, como se muestra en la Tabla 3-5 y se ilustra en la Figura 3-5.

Tabla 3-5. Clasificación general del tamaño de las partículas de suelo.

	\varnothing (μm)
Arena	2000 – 50
Limo	50 – 2
Arcilla	< 2

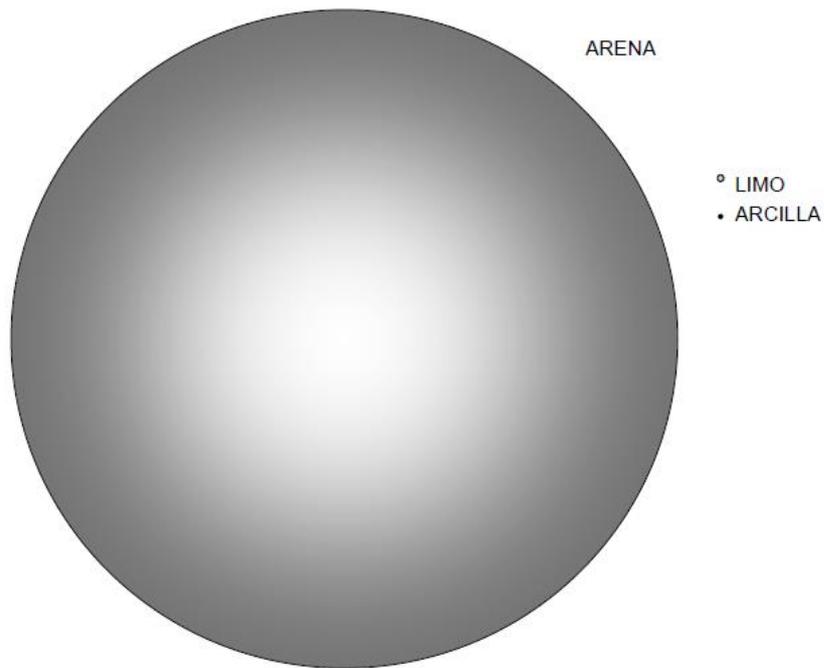


Figura 3-5. Tamaño relativo de las partículas del suelo (Jordán López 2005).

La textura de un suelo se suele representar gráficamente mediante el diagrama textural. Se trata de una herramienta consistente en un triángulo equilátero, donde cada uno de sus lados representa el porcentaje de arena, limo y arcilla. Esta herramienta permite obtener las clases texturales en función de la proporción de las clases de partículas presentes en el suelo.

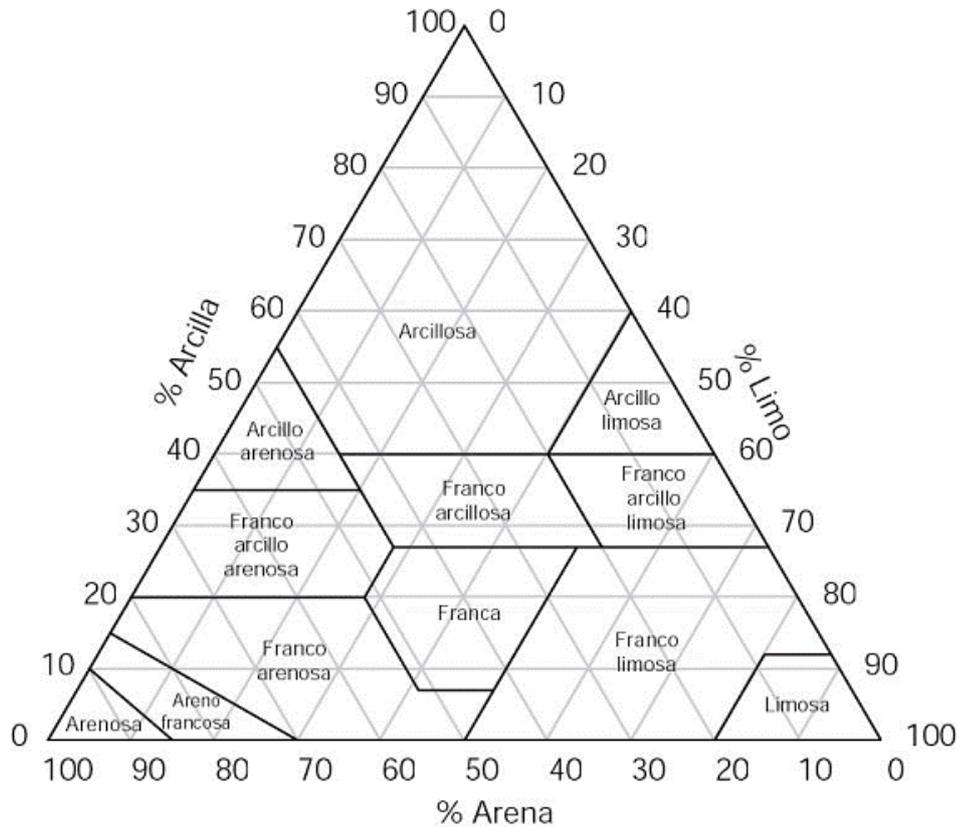


Figura 3-6. Diagrama textural de la USDA.

Se establecen, en base al diagrama textural, doce clases texturales diferentes, las cuales representan grupos de texturas con aptitudes o propiedades análogas. No obstante, se reconocen cuatro clases principales: arenosa, limosa, arcillosa y franca (Manuel Gisbert Blanquer et al. 2010).

- Las texturas arcillosas dan lugar a suelos plásticos y difíciles de trabajar. La gran cantidad de microporos que presentan da lugar a una amplia retención de agua y nutrientes. A pesar de ello, presentan una permeabilidad baja, a menos que estén bien estructurados y formen un buen sistema de grietas. Desde el punto de vista agronómico, se trata de suelos muy activos químicamente, funcionando como reserva de nutrientes y con una gran capacidad de regulación del pH. Asimismo, la arcilla puede retener una delgada capa de moléculas de agua en su superficie, produciendo una elevación del punto de marchitez.
- La textura arenosa es la contrapuesta a la arcillosa, dada su escasa plasticidad y facilidad de trabajo. Presenta una excelente aireación debido a que las partículas dominantes de gran tamaño facilitan la penetración del aire. Únicamente cuando se producen lluvias intensas se puede generar encharcamiento o escorrentía, momento en el que la erosión laminar es muy importante. La acumulación de materia orgánica es mínima y el lavado de los elementos minerales es elevado. Desde el punto de vista agronómico, los suelos arenosos son inertes químicamente y presentan una

escasa capacidad de retención de agua, limitando el desarrollo vegetativo en climas secos.

- La textura limosa presenta carencia de propiedades coloidales formadoras de estructura, formando suelos que se apelmazan con facilidad impidiendo la aireación y la circulación del agua. Es fácil la formación de costras superficiales que impiden la emergencia de las plántulas².
- Las texturas francas, al tener un mayor equilibrio entre sus componentes, gozan de los efectos favorables de las anteriores sin sufrir sus defectos. El estado ideal sería la textura franca, apareciendo inconvenientes a medida que se produce el alejamiento respecto a la misma.

3.2 Uso de la medida dieléctrica

Las técnicas dieléctricas para la medida del contenido de agua en el suelo se fundamentan en el hecho de que las constantes dieléctricas del aire y del agua presentan grandes diferencias entre sí, tal como se describe en el Capítulo 2.1.2.4. Esto hace que la presencia de agua en los poros del suelo de lugar a la variación de su constante dieléctrica o permitividad relativa. Ante este fenómeno, la tecnología basada en el dominio de la frecuencia hace uso de componentes capacitivos que utilizan el suelo como dieléctrico, de manera que su capacidad se ve afectada por el contenido de humedad. Este capítulo trata de justificar de manera empírica el uso de la medida dieléctrica como indicativo del contenido de humedad del suelo.

Los sensores FDR, a través de un condensador formado entre sus sondas y el suelo como dieléctrico, realizan un barrido de frecuencia y detectan la frecuencia de resonancia. En función del contenido de agua en el suelo, esta frecuencia de resonancia cambia. De esta manera, identificando el cambio en la frecuencia de resonancia se determina el contenido hídrico del suelo.

Por su parte, los sensores capacitivos miden los tiempos de carga y descarga del condensador. Estos tiempos están relacionados con la capacidad del condensador, y por consiguiente, con la permitividad relativa del suelo.

De forma simplificada, si se tiene un circuito serie RC alimentado por una tensión V_o , como el mostrado en la Figura 3-7, la carga del condensador viene dada por la siguiente expresión:

$$q(t) = C \cdot V_o \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}}\right) \quad (3-10)$$

² Según la RAE: Planta joven, al poco tiempo de brotar de la semilla.

donde, $R \cdot C = \tau$ es la constante de tiempo. El condensador sólo alcanza la carga total para un tiempo infinito, aunque se considera que la carga es completa ($\approx 99,3\%$) para un tiempo $t = 5\tau$. El tiempo de carga depende, por tanto, de la capacidad.

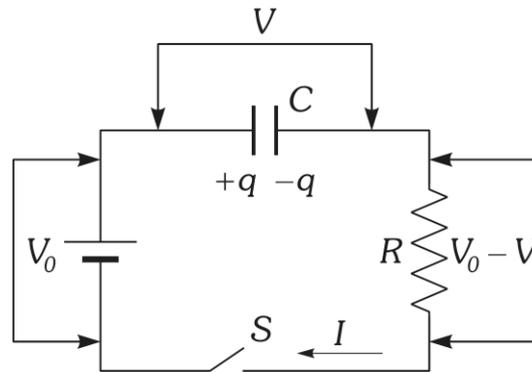


Figura 3-7. Circuito serie RC (Burbano et al. 2003)

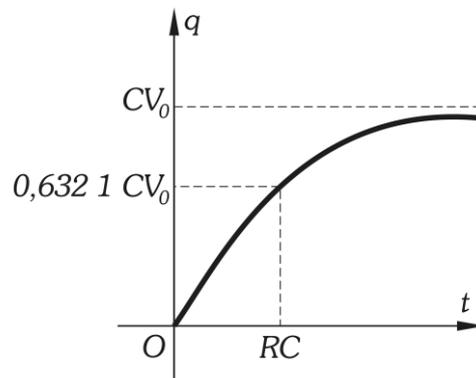


Figura 3-8. Curva de carga de un condensador en un circuito serie RC (Burbano et al. 2003).

Para ilustrar los principios de funcionamiento de los sensores FDR y capacitivos se hace uso de una potente herramienta, como es el analizador de impedancias. Un analizador de impedancias es un equipo que permite conocer parámetros primarios y secundarios de impedancia para caracterizar componentes eléctricos pasivos y materiales. Estos equipos permiten trabajar a diferentes frecuencias e incluso realizar barridos automáticos. Entre los parámetros que son capaces de determinar se encuentran: módulo de la impedancia ($|Z|$), módulo de la admitancia ($|Y|$), ángulo de fase (θ), resistencia (R), reactancia (X), conductancia (G), susceptancia (B), inductancia (L), capacitancia (C), factor de disipación (D) y factor de calidad (Q).

En este estudio se ha hecho uso del analizador *Agilent 4395A*. Este equipo ofrece tres herramientas en uno: analizador de redes, analizador de espectro y analizador de impedancias. En este caso sólo se ha hecho uso de ésta última.

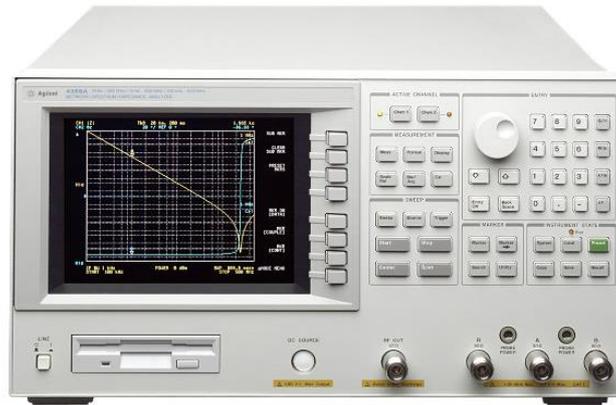


Figura 3-9. Vista frontal del Agilent 4395A.

Para mostrar el principio de funcionamiento de los sensores FD se conectan los electrodos del sensor experimental desarrollado mediante un cable coaxial al analizador de impedancias. Los electrodos del sensor, descritos con mayor profundidad más adelante, consisten básicamente en un condensador. A partir de aquí se llevan a cabo dos caracterizaciones diferentes. Por un lado, se realiza un barrido de frecuencia y se obtienen los valores del módulo de la impedancia, lo que aporta información acerca del principio de funcionamiento de los sensores FDR. Y por otro lado se mide la capacidad serie del condensador para analizar el funcionamiento de los sensores capacitivos. Se debe tener en cuenta que el modelo eléctrico real del conjunto cable coaxial más condensador, no sólo presentará capacidad, sino también resistencia e inductancia.

En la primera de las caracterizaciones citadas se establece un barrido de frecuencia para todo el rango ofrecido por el equipo, es decir, de 100 kHz a 500 MHz, y se representa el módulo de la impedancia para cada valor de frecuencia. La Figura 3-10 muestra los resultados obtenidos cuando el dieléctrico del condensador es aire y cuando es agua. Se observa que al pasar de dieléctrico aire a dieléctrico agua la curva se desplaza hacia la izquierda, dando lugar a un cambio en las frecuencias de resonancia, y además su amplitud se atenúa ligeramente. Queda patente, por tanto, que el contenido de agua en el suelo altera el valor de la frecuencia de resonancia, por lo que se demuestra, de esta forma, el principio de funcionamiento de los sensores FDR.

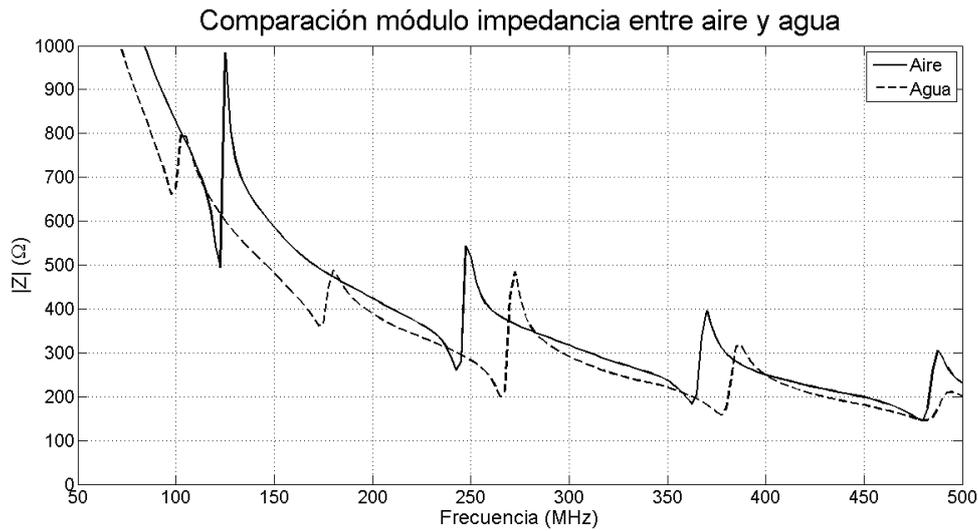


Figura 3-10. Representación gráfica de la comparación del módulo de la impedancia entre aire y agua como dieléctricos obtenida con el analizador de impedancias.

En la segunda caracterización se aplica de nuevo un barrido de frecuencia en todo el rango disponible, pero en este caso se mide la capacidad serie. En esta ocasión, resulta más evidente el hecho de que el cambio de medio dieléctrico producirá una variación en la capacidad del condensador. Así lo muestra la Figura 3-13, donde se comparan los valores obtenidos con aire y con agua como dieléctricos, siendo la capacidad con aire bastante inferior a la alcanzada con agua.

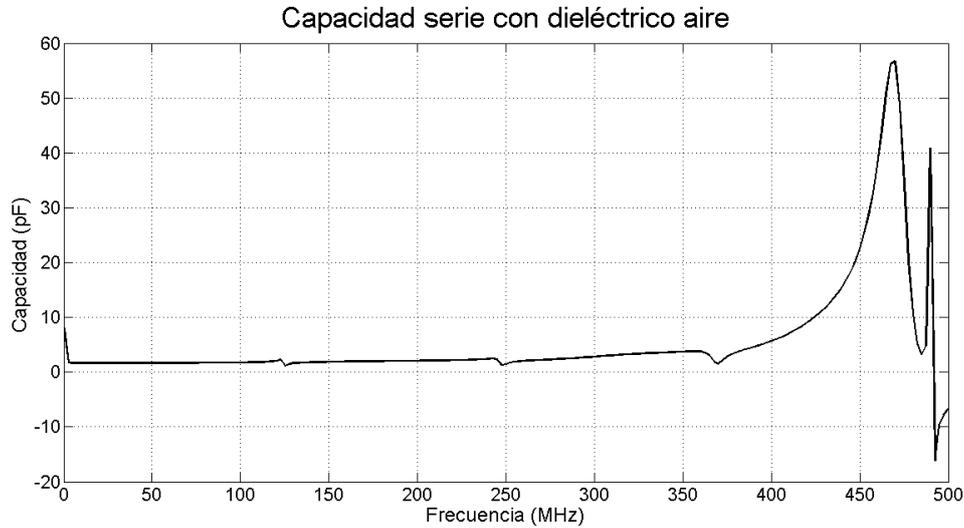


Figura 3-11. Representación gráfica de la capacidad serie con aire como dieléctrico obtenida con el analizador de impedancias.

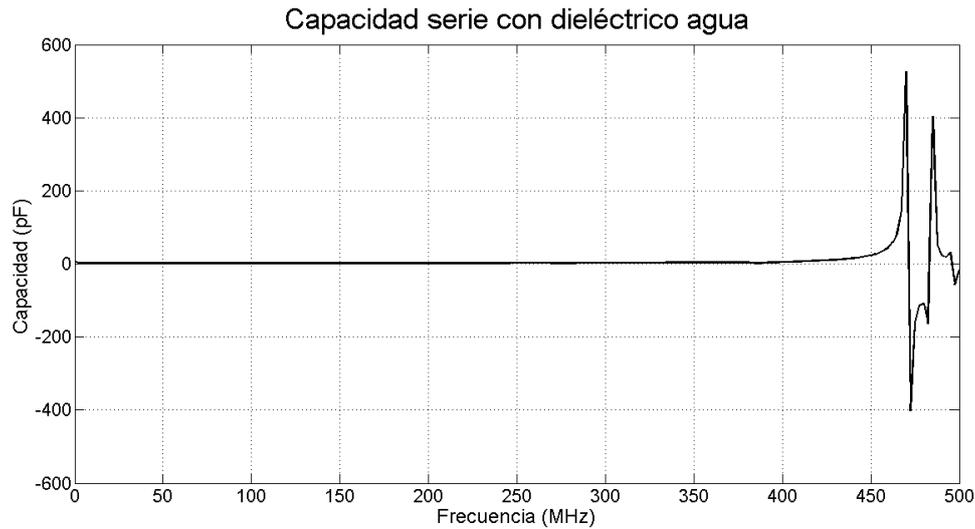


Figura 3-12. Representación gráfica de la capacidad serie con agua como dieléctrico obtenida con el analizador de impedancias.

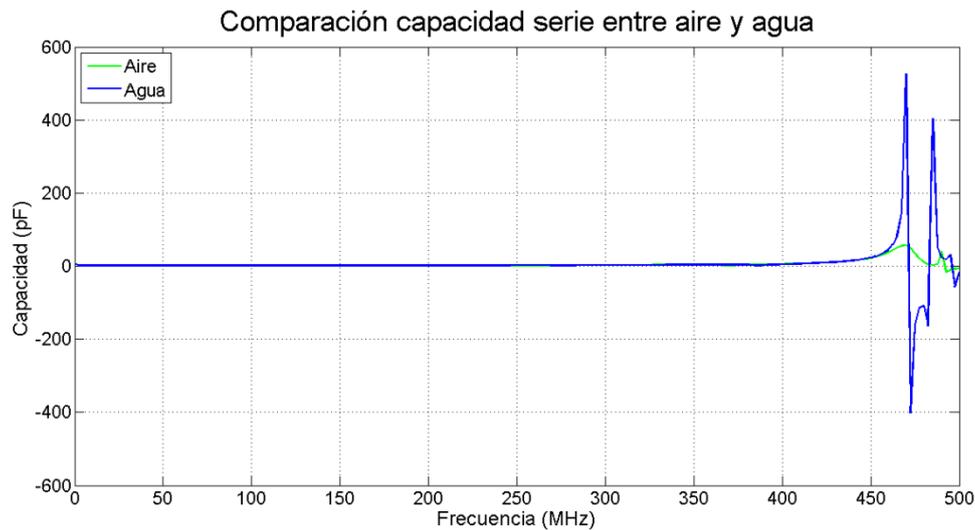


Figura 3-13. Representación gráfica de la comparación de la capacidad serie entre aire (verde) y agua (azul) como dieléctricos obtenida con el analizador de impedancias.

Ha de tenerse en cuenta que el análisis realizado en ambas caracterizaciones es únicamente cualitativo, puesto que la medida se realiza sobre un modelo (cable coaxial + electrodos del sensor experimental) que difiere del que realmente se tendrá en el sensor, ya que incluye el cable coaxial.

De esta forma, queda justificado el uso de la medida dieléctrica como indicador del contenido hídrico del suelo.

En el presente estudio se desarrolla un sensor capacitivo. En base a lo expuesto en este capítulo, existen circuitos temporizadores que generan una señal rectangular, cuya frecuencia depende de una serie de parámetros seleccionables. Uno de estos circuitos es el LMC555, el cual se caracteriza por su versatilidad y por su muy bajo coste (< 1€). Este circuito genera una señal rectangular que depende del valor de dos

resistencias y de la capacidad de un condensador. Surge, entonces, la idea de combinar el LMC555 con un condensador variable, cuya capacidad dependa del contenido de humedad del suelo. De esta forma, las variaciones de humedad dan lugar a variaciones en la capacidad del condensador, produciendo a su vez la modificación de la frecuencia de la señal generada por el LM555. Así, se obtiene una variable eléctrica medible y registrable por muchos dataloggers, como es la frecuencia, pudiendo transformarse en otras variables fácilmente medibles como son la tensión o la intensidad. Este razonamiento supone la base del diseño del sensor desarrollado.

3.3 Método de calibración

Tal como se expone en el Capítulo 2.1.2.5, los sensores capacitivos y FDR necesitan ser calibrados para cada tipo de suelo. En la bibliografía son muchos los trabajos dedicados a la calibración de sensores de contenido de agua en el suelo (Fernández et al. 2016; Bellingham 2007; Mittelbach et al. 2012; Geesing et al. 2004; Ojo et al. 2015; Veldkamp & O'Brien 2000; Chen et al. 2013). Todos ellos siguen un procedimiento similar, presentando ligeros cambios en ciertos aspectos. En este caso, dado que se pretende comparar el comportamiento del sensor desarrollado con el modelo comercial Decagon 10HS, se ha optado por seguir, en líneas generales, el protocolo de calibración propuesto por Decagon para este modelo (Cobos & Chambers 2010), el cual está basado a su vez en el procedimiento esbozado por (Starr & Paltineanu 2002). Este método consiste en relacionar las medidas del sensor con el contenido de humedad del suelo obtenido por el método gravimétrico.

Se describe a continuación el método propuesto por Decagon.

3.3.1 Material necesario

- Un recipiente para cada tipo de suelo y una pala, necesarios para la adquisición del suelo.
- Un recipiente de calibración para cada tipo de suelo. El recipiente de calibración permite compactar el suelo al nivel de la densidad en campo y proporciona una profundidad suficiente para la instalación de los sensores (incluyendo el circuito electrónico hasta unos pocos centímetros del cable).
- Los sensores a calibrar y un sistema de adquisición de datos (ProCheck, Em50, Em5b, Campbell Scientific datalogger, etc.)
- Un tubo de muestreo volumétrico de suelo, el cual permite obtener muestras de volumen conocido y, por tanto, determinar el contenido volumétrico de agua en el suelo. Éste puede ser un modelo comercial, como el ESS Core N'One, o un artilugio casero. En este último caso se recomienda cortar una sección de 3 – 5 cm de conducto metálico o una tubería de plástico rígido y pared delgada con un diámetro pequeño (1,5 – 2,5 cm), con los bordes afilados para facilitar su

inserción en el suelo. En cualquier caso, el único requisito es poder obtener una muestra de suelo de volumen conocido sin alterar su densidad aparente.

- Recipientes para secado de suelo (5 – 7 por tipo de suelo). El recipiente de secado puede ser cualquier recipiente susceptible de ser introducido en un horno y que posea tapadera.
- Báscula con una resolución de, al menos, 0,01 g.
- Horno de secado capaz de mantener una temperatura constante entre 105 y 110°C.

3.3.2 Obtención de muestras de suelo

1. Obtener, al menos, 4 litros de cada tipo de suelo.
2. Es posible que se desee medir la densidad aparente del suelo en campo. Para tal fin:
 - 2.1. Obtener algunas muestras de suelo con el tubo de muestreo volumétrico. Se obtiene el volumen de la muestra, V_T .
 - 2.2. Secar en el horno las muestras para obtener la masa de las mismas, m_s .
 - 2.3. Se utiliza la *Ecuación (3-4)* para calcular la densidad aparente del suelo.

3.3.3 Preparación del suelo

1. Dejar secar el suelo al aire. El secado es más rápido si el suelo se esparce en una capa fina y el aire se desplaza sobre el mismo, ya que queda una mayor superficie de suelo en contacto con el aire.
2. Eliminar elementos y partículas de gran tamaño del suelo. Se sugiere romper los terrones y hacer pasar el suelo a través de un tamiz o criba de 2 – 5 mm.
3. En algunos materiales, como por ejemplo compost o abono, no será posible eliminar grandes partículas sin alterar la naturaleza del material.

3.3.4 Calibración

1. Compactar el suelo a la densidad aparente de campo.
2. Insertar el sensor en el suelo.
 - 2.6. Insertar el sensor lo más profundo posible.
 - 2.7. Para algunos suelos no es posible insertar el sensor en su totalidad.
 - 2.7.1. Utilizar un elemento con mayor facilidad de inserción que sirva de guía o que marque un agujero piloto.
 - 2.7.2. Insertar el sensor tan profundo como sea posible y compactar el suelo en torno a la zona expuesta tratando de no dejar huecos de aire.
 - 2.8. Asegurar que la parte donde se aloja la circuitería del sensor queda también cubierta por el suelo. Si no es posible cubrirla totalmente, insertar el sensor

lo más profundo posible y utilizar una porción de suelo adicional para cubrirla, incluyendo unos pocos centímetros del cable.

3. El sensor debe quedar rodeado de suelo de forma continua en un radio de, al menos, 10 cm (10 HS) ó 5 cm (EC-5), en dirección perpendicular a la superficie plana de la sonda.
4. Obtener una medida del sensor. Se recomienda repetir los pasos 2 – 4 una o dos veces para asegurar que se tiene repetitividad en el proceso de inserción³. Esto dará lugar a una pequeña variabilidad entre las medidas, de manera que se tomará el valor medio de las mismas.
5. Obtener una muestra volumétrica de suelo.
 - 5.1. Introducir el tubo de muestreo volumétrico cerca de la zona de inserción del sensor.
 - 5.2. Extraer el tubo de muestreo asegurando que el suelo en su interior se mantiene intacto. Rasurar los bordes con una espátula o herramienta similar para retirar el exceso de suelo y rellenar los pequeños huecos que puedan generarse.
 - 5.3. Depositar la muestra de suelo en un recipiente de secado, previa medida del peso del recipiente, y cerrar con la tapadera. Así se evita la pérdida de agua desde el momento del muestreo hasta la pesada.
 - 5.4. Repetir los pasos 5.1 – 5.3 al menos una vez. Esto ayuda a reducir el efecto de la variabilidad espacial del suelo.
 - 5.5. Medir la masa de la muestra de suelo húmedo más el recipiente de secado sin tapadera.
6. Humedecer el suelo.
 - 6.1. Añadir aproximadamente 1 mL de agua por cada 10 mL de volumen de suelo. Esto incrementa el contenido volumétrico (VWC) en un 10%. Añadir el agua de la forma más equitativa posible.
 - 6.2. Mezclar el suelo con las manos o con una pala hasta que la mezcla quede homogénea.
7. Repetir los pasos 1 – 6 hasta que el suelo alcance la saturación. Esto generará aproximadamente 4 – 6 puntos de calibración.
8. Secar las muestras de suelo.
 - 8.1. Introducir las muestras de suelo previamente pesadas con los recipientes de secado dentro de un horno y dejar secar durante 24 h a 105°C. Los suelos que contienen materia orgánica pueden ver modificada su naturaleza a esa temperatura y perder parte de su contenido, derivando en un error en la

³ Aunque no se especifica en el protocolo de calibración de Decagon, cuando el suelo posee una cierta humedad, si se repite el proceso de inserción del sensor en el mismo lugar de donde se ha extraído, la holgura que se genera entre la pared del sensor y el suelo da lugar a huecos de aire que impiden necesariamente la obtención de una medida igual a la anterior, es decir, se parte de unas condiciones iniciales previamente alteradas. Por este motivo y como aporte del autor del presente trabajo, se recomienda que las diferentes medidas se realicen mediante la inserción del sensor en otros puntos cercanos no alterados. De esta forma se tiene en cuenta, además, la posible heterogeneidad del terreno.

medida. Se recomienda, en estos casos, secar a una temperatura de 60 – 70°C durante, al menos, 48 h.

9. Pesar el suelo seco.

9.1. Extraer los recipientes de secado del horno y dejar enfriar.

9.2. Medir la masa del suelo seco más el recipiente de secado.

3.3.5 Cálculos

El contenido volumétrico de agua en el suelo viene definido en la *Ecuación (3-9)* del capítulo anterior.

$$VWC = V_W/V_T \quad (3-11)$$

donde VWC es el contenido volumétrico de agua en el suelo, V_W es el volumen de agua y V_T es el volumen total. El volumen total se conoce, ya que es el volumen del tubo de muestreo volumétrico. Para obtener V_W se calcula el volumen de agua que se pierde durante el proceso de secado, es decir, la diferencia entre el peso de la muestra antes y después del secado. Como la densidad del agua es de 1 g/cm³, por cada gramo de agua perdida se tendrá 1 cm³.

Otro de los parámetros a calcular es la densidad aparente de cada muestra, la cual viene definida por la *Ecuación (3-4)*, también presentada en el capítulo anterior.

$$\rho_a = \frac{m_S}{V_S + V_P} = \frac{m_S}{V_T} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (3-12)$$

3.3.6 Obtención de la función de calibración

Se trata de realizar una representación gráfica de las medidas obtenidos por el sensor (Eje X) frente a los cálculos de VWC (Eje Y) y aplicar una línea de tendencia o una curva de ajuste que proporcione un modelo matemático de la relación entre ambas variables. Esta relación suele ser lineal, tal como se muestra en la Figura 3-14, aunque también puede obtenerse una función cuadrática, especialmente en suelos con contenido orgánico.

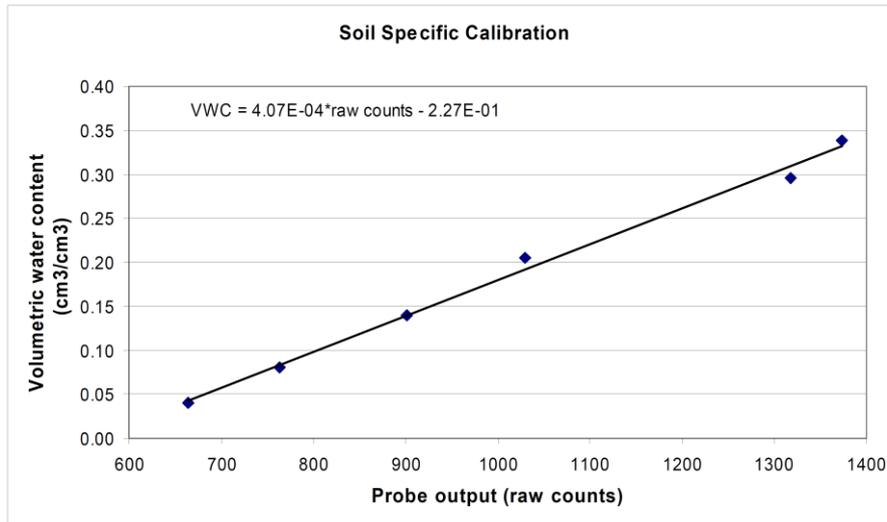


Figura 3-14. Gráfico de un ejemplo de datos de calibración (Cobos & Chambers 2010).

4 DESARROLLO DEL EQUIPO

Tras analizar el estado del arte se observa que la tecnología basada en el dominio de la frecuencia es una de las más interesantes dada su instantaneidad, precisión, fácil automatización y reducido coste. En este último aspecto, destaca sobre otras tecnologías, como la reflectometría en el dominio del tiempo, cuyos equipos poseen un coste mucho más elevado. Aun así, se ha comprobado que los sensores FDR y capacitivos comerciales presentan, cuanto menos, precios que superan la centena de euros. A nivel de grandes explotaciones, se trata de un coste asumible; sin embargo, para el pequeño y medio agricultor puede resultar prohibitivo el disponer de una colección de estos sensores que le permita abarcar medianamente su superficie de cultivo. En este sentido, queda patente la necesidad de generar un producto que cubra estas necesidades con un coste mínimo.

El desarrollo del equipo consta básicamente de una fase de diseño y de una fase de montaje, consistiendo ésta última en el soldado de los diferentes componentes electrónicos a la placa habilitada y el cableado del sensor.

En cuanto al diseño, tal como se introduce en el Capítulo 3.2, se propone un sensor capacitivo, cuyo elemento central es un temporizador LMC555, capaz de generar una onda rectangular, cuya frecuencia depende de la capacidad de un condensador variable.

En la Figura 4-1 se muestra el esquemático del sensor, dividido en sus tres bloques principales, descritos a continuación. Una vista de mayor tamaño del esquemático se presenta en el Anexo.

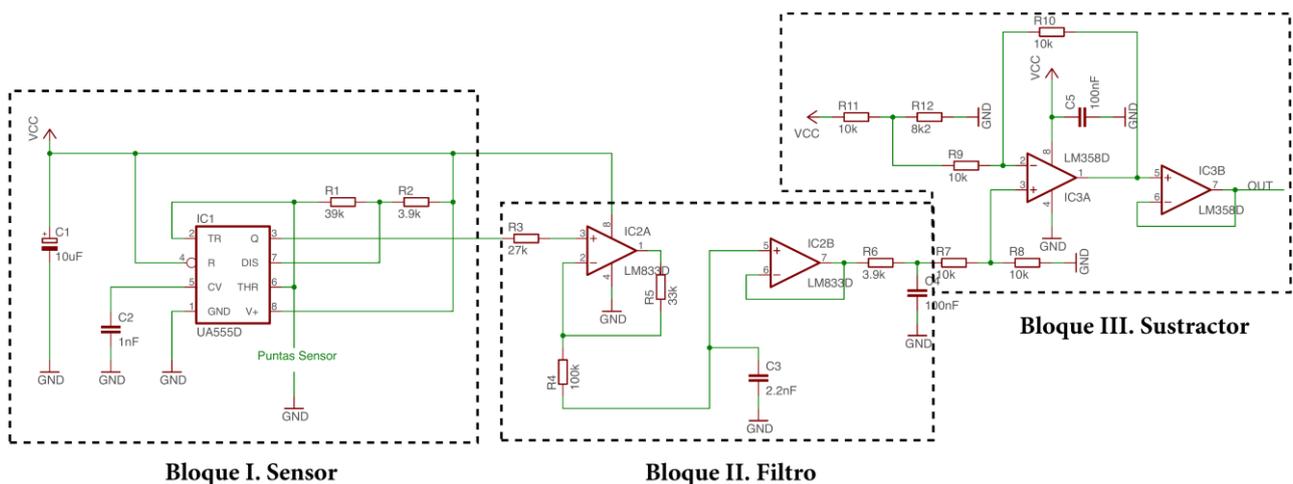


Figura 4-1. Esquemático del sensor experimental dividido en bloques.

4.1 Diseño del circuito

4.1.1 Bloque I. Sensor

El Bloque I consiste básicamente en el temporizador LMC555 y sus componentes adheridos, entre los que se encuentra el condensador de capacidad variable (Puntas Sensor en la Figura 4-1). Este bloque tiene la misión de generar a su salida una onda rectangular cuya frecuencia varíe en función del contenido de humedad del suelo.

El circuito integrado LMC555 posee un amplio abanico de funciones. Así, se puede utilizar como temporizador de precisión, generador de pulsos, temporizador secuencial, generador de retrasos, modulador de ancho de pulso, modulador de posición de pulso o generador de rampas lineales. En este caso se utiliza como generador de pulsos.

El LMC555 posee 8 pines, cuyos nombres y funciones se reflejan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Pines del LMC555.

PIN		I/O	Descripción
Nº	Nombre		
1	GND	O	Voltaje de referencia a masa.
2	$\overline{\text{Trigger}}$	I	Responsable de la transición del flip-flop del set al reset. La salida del temporizador depende de la amplitud del impulso de disparo externo aplicado a este pin.
3	Output	O	Onda de salida.
4	$\overline{\text{Reset}}$	I	Se aplica un impulso negativo a este pin para desactivar o restablecer el temporizador. Cuando no se utiliza para fines de reinicio, debe estar conectado a V_{cc} para evitar un disparo erróneo.
5	Control Voltage	I	El voltaje de control controla los niveles umbral y disparador. Determina la anchura del pulso de la onda de salida. Una tensión externa aplicada a este pin también puede ser usada para modular la forma de onda de salida.
6	Threshold	I	Compara la tensión aplicada al terminal con una tensión de referencia de $2/3 V_{cc}$. La amplitud del voltaje aplicado a este terminal es responsable del estado de ajuste del flip-flop.
7	Discharge	I	Salida de colector abierto que descarga un condensador entre intervalos (en fase con salida). Alterna la salida de alto a bajo cuando el voltaje alcanza $2/3$ de la tensión de alimentación.
8	V^+	I	Tensión de alimentación con respecto a masa.

El temporizador se configura en modo de operación astable, es decir, tal como muestra la Figura 4-2. En este modo de operación, el condensador C carga a través de $R_A + R_B$ y se descarga a través de R_B . Así, el ciclo de trabajo de la señal generada puede establecerse de forma precisa en función del ratio entre dichas resistencias. Además, la carga y descarga se produce entre $1/3$ y $2/3$ de la tensión de alimentación ($V_s = V_{cc}$). Los tiempos de carga y descarga y, por tanto, la frecuencia son independientes de V_{cc} . En el diseño propuesto, la resistencia R_A recibe el nombre de R_2 y la resistencia R_B el de

R_1 , tal como aparece en el esquemático de la Figura 4-1, mientras que C es la capacidad del condensador variable.

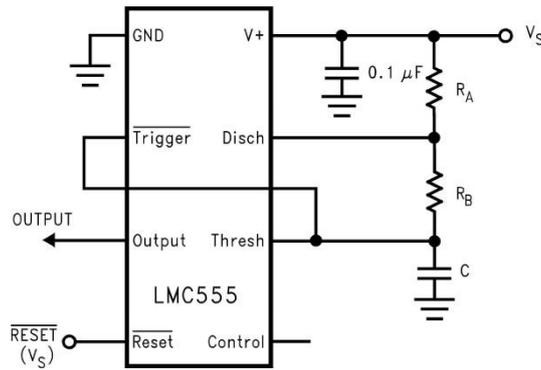


Figura 4-2. Esquema del LMC555 en configuración astable.

La relación entre la onda generada y los ciclos de carga y descarga del condensador se muestran en la Figura 4-3.

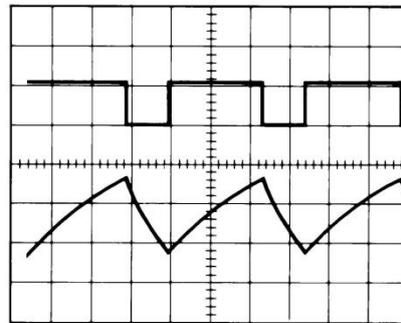


Figura 4-3. Onda generada por el LMC555 en modo de operación astable.

El tiempo de carga (salida alta) viene dado por:

$$t_1 = 0,693 \cdot (R_A + R_B) \cdot C \tag{4-1}$$

Y el tiempo de descarga (salida baja) por:

$$t_2 = 0,693 \cdot R_B \cdot C \tag{4-2}$$

Así, el periodo total es:

$$T = t_1 + t_2 = 0,693 \cdot (R_A + 2R_B) \cdot C \tag{4-3}$$

Y la frecuencia de oscilación:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1,44}{(R_A + 2R_B) \cdot C} \tag{4-4}$$

Por su parte, el ciclo de trabajo, definido como la fracción del periodo total donde la salida es baja, es:

$$D = \frac{R_B}{R_A + 2R_B} \quad (4-5)$$

A la hora de seleccionar el valor de las resistencias R_A y R_B ($\approx R_1$ y R_2) se tiene en cuenta que la frecuencia máxima que es capaz de generar el LMC555 es de 3MHz. La *Ecuación (4-4)* relaciona la frecuencia con los valores de las resistencias y la capacidad del condensador. En el Capítulo 3.2 se obtenían ciertos valores de capacidad para el condensador variable del sensor, usando tanto el aire como el agua como dieléctricos. A pesar de no ser valores totalmente realistas y fidedignos al modelo real del sensor, se presentan como una basta estimación de los extremos del rango de capacidad que se puede obtener. Se registraba una capacidad de aproximadamente 55 pF en aire y de 500 pF en agua. Estos valores son relativamente parecidos a los de la sonda desarrollada por (Vázquez de León et al. 2015) que, con unas dimensiones similares a las del sensor experimental aquí propuesto, ofrece una capacidad de, en torno a 30 pF en aire y entre 200 y 400 pF en agua. En base a estos valores se proponen unas resistencias $R_A = 3,9 \text{ k}\Omega$ y $R_B = 39 \text{ k}\Omega$, de manera que los extremos del rango de frecuencia, utilizando la Ecuación (4-4) serían:

$$f_{\text{aire}} = \frac{1,44}{(3900 + 2 \cdot 39000) \cdot 55 \cdot 10^{-12}} = 319680 \text{ Hz} \approx 320 \text{ kHz}$$

$$f_{\text{agua}} = \frac{1,44}{(3900 + 2 \cdot 39000) \cdot 500 \cdot 10^{-12}} = 35164 \text{ Hz} \approx 35 \text{ kHz}$$

Estos valores de frecuencia se encuentran dentro del rango generable por el temporizador (0 – 3 MHz), aunque los valores obtenidos en la realidad serán un tanto diferentes.

Por su parte, el LMC555 requiere una tensión de alimentación de entre 1,5 y 15 V. En este caso, dado que la mayoría de sensores utilizados en el ámbito agrícola se alimentan a 12 V, debido a las características de las fuentes y dataloggers utilizados, se adquiere este valor como tensión nominal de alimentación del sensor. Además, la elección de esta tensión de alimentación es un paso previo a la implementación, en trabajos futuros, de un protocolo de comunicación SDI-12. Para proteger el circuito, se coloca en paralelo un condensador electrolítico (C_1) de 10 μF , que funciona como un bypass de alimentación.

4.1.2 Bloque II. Filtro

El bloque II tiene por objetivo el filtrado de la onda generada por el LMC555 para obtener una señal continua a un determinado nivel de tensión. El valor de dicha tensión dependerá de la frecuencia de la señal a la entrada del bloque. Para tal fin, se disponen dos amplificadores operacionales LM833D en serie con un filtro paso bajo a la salida de cada uno de ellos.

4.1.3 Bloque III. Sustractor

El objetivo del bloque III es restar tensión a la conseguida a la salida del bloque II, con el fin de obtener un rango de 0 a 3 V a la salida del sensor. De esta forma, la señal generada por el sensor a su salida puede ser utilizada por un microcontrolador. En este bloque se utilizan, como elementos principales, dos amplificadores operacionales LM358D en serie.

A continuación se muestra la lista de todos los componentes electrónicos incluidos en el circuito diseñado, especificando el fabricante seleccionado y el precio de cada uno de ellos. En el Anexo se ofrece una lista con detalles ampliados. Todas las resistencias utilizadas son de precisión.

Tabla 4-2. Lista de componentes electrónicos del sensor experimental.

No.	Valor	Cantidad	Referencia PCB	Descripción	Fabricante	Precio unitario	Precio Total
1	39k	1	R1	Resistencia SMD de Tipo Chip	MULTICOMP	0,01 €	0,01 €
2	3k9	2	R2, R6	Resistencia, RC02H 1206 3K9	MULTICOMP	0,02 €	0,05 €
3	27k	1	R3	Resistencia SMD de Tipo Chip	MULTICOMP	0,01 €	0,01 €
4	100k	1	R4	Resistencia SMD de Tipo Chip	MULTICOMP	0,01 €	0,01 €
5	33k	1	R5	Resistencia SMD de Tipo Chip	MULTICOMP	0,02 €	0,02 €
6	10k	6	R7, R8, R9, R10, R11, R12	Resistencia Cerámica, 10K, 0,25W, 1%	MULTICOMP	0,04 €	0,24 €
7	10µF/16v	1	C1	Condensador de Tantalio SMD, 10 µF, 16 V	KEMET	0,16 €	0,16 €
8	1nF	1	C2	Condensador Cerámico Multicapa	MULTICOMP	0,04 €	0,04 €
9	2,2nF	1	C3	Condensador Cerámico Multicapa	MULTICOMP	0,04 €	0,04 €
10	100nF	2	C4, C5	Condensador Cerámico, 0,1µF, 16V, X7R, 1206	MULTICOMP	0,04 €	0,08 €
11	LMC555	1	IC1	LMC555CMX/NOPB Timer	TEXAS INSTRUMENTS	0,86 €	0,86 €
12	LM833	1	IC2	Amplificador de Potencia de Audio	ON SEMICONDUCTOR	0,38 €	0,38 €
13	LM358	1	IC3	Amplificador Operacional, Doble	ON SEMICONDUCTOR	0,17 €	0,17 €
							2,06 €

4.2 Diseño de la placa

Todos los componentes electrónicos presentados en el capítulo anterior se albergan en una placa de circuito impreso que constituye el cuerpo del sensor. El circuito impreso se diseña con el software Eagle, específico para el desarrollo de PCBs, tratando de minimizar la superficie ocupada.

En la Figura 4-4 se muestra el aspecto del PCB diseñado. Como se puede observar, la placa se divide en dos partes diferenciadas: a la izquierda de la imagen, en una porción cuadrada, se disponen todos los componentes electrónicos que forman el circuito, así como los terminales de alimentación y salida del sensor; a la derecha, la placa adquiere el aspecto de dos electrodos alargados en forma de dientes, que constituyen las armaduras del condensador variable, cuya capacidad variará en función del contenido de humedad del suelo.

Por su parte, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** queda presentado el layout del diseño, incluyendo las pistas que conectan los diferentes componentes. En el caso de los electrodos del condensador variable, éstos se encuentran constituidos por pistas dobles de cobre que quedan en el interior del material aislante del que se compone la placa (baquelita).



Figura 4-4. Layout del PCB del sensor experimental con distribución de los componentes electrónicos.

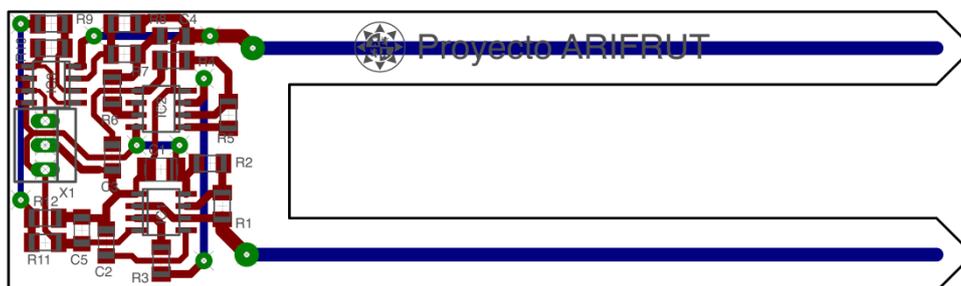


Figura 4-5. Layout del PCB del sensor experimental con distribución de los componentes electrónicos y pistas de conexión.

En la Figura 4-6 se muestra el aspecto real del sensor con los componentes electrónicos ya soldados. Las dimensiones exactas del sensor se pueden consultar en los planos incluidos en el Anexo.



Figura 4-6. Aspecto del sensor Arifrut.

5 EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se ha dividido en dos fases diferenciadas. En una primera fase se ha tratado de comprobar el correcto funcionamiento del sensor, es decir, que presenta sensibilidad a los cambios de humedad en el suelo y que las medidas registradas son consecuentes y útiles. La segunda fase consiste en la calibración en sí del sensor, obteniendo un modelo matemático que relaciona la variable de salida del mismo con el contenido de humedad del suelo, siguiendo el ya descrito protocolo sugerido por Decagon.

En todo el proceso de experimentación se hace uso de un datalogger Campbell Scientific CR1000 para la adquisición de datos. Este equipo cuenta con múltiples puertos para la medición de variables como tensión y número de pulsos/frecuencia, entre otros, así como salidas a 5 y 12 V para la alimentación de los diferentes sensores y periféricos, tal como muestra la Figura 5-1. Los sensores utilizados se conectan al datalogger, y con el software LoggerNet, a través de la herramienta CRBasic, se configura su medida, seleccionando con qué frecuencia se realizan las medidas, y pudiendo consultar el valor ofrecido por cada sensor en tiempo real.

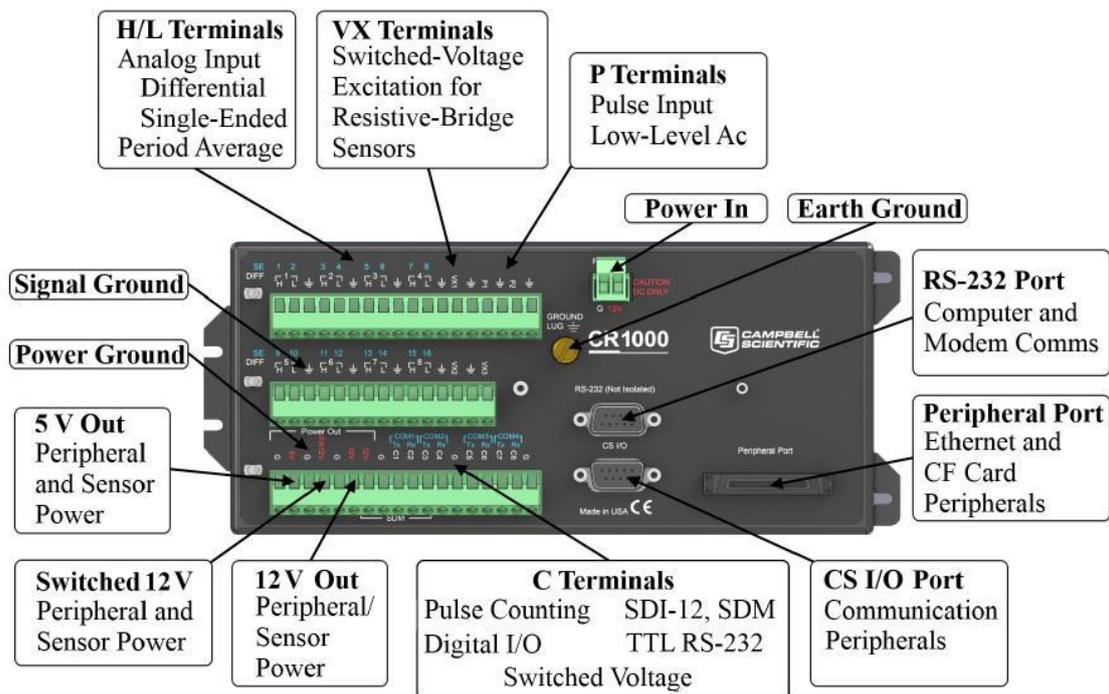


Figura 5-1. Esquema de los puertos de entrada y salida del CR1000 (Campbell Scientific 2016).

5.1 Fase I. Pruebas preliminares

Las pruebas iniciales llevadas a cabo sobre el sensor tratan de comprobar que su respuesta ante la presencia de agua en el suelo es adecuada y que su comportamiento se

asemeja al del sensor 10HS de Decagon, tomado como modelo de referencia por su semejanza en cuanto al aspecto físico y al principio de funcionamiento.

La primera versión del sensor experimental ofrece una salida en tensión, cuyo valor debe variar en función de la capacidad del condensador y, por tanto, en función de la permitividad relativa del medio en el que se encuentre. Al introducir el sensor en agua, la permitividad relativa del medio dieléctrico cambia notablemente, pasando de un valor de ≈ 1 del aire a un valor de ≈ 80 del agua. El sensor detecta este cambio, pasando de un nivel alto de tensión (2,8 V) a un nivel bajo (1,4 V) cuando se introduce en agua, y también cuando la sonda se cubre con las manos.

Una vez comprobado que el sensor es capaz de detectar la presencia de un medio con una permitividad relativa diferente a la del aire, se considera oportuno realizar un nuevo experimento. Éste consiste en introducir el sensor en una muestra de suelo con drenaje, de manera que el contenido de humedad del mismo vaya disminuyendo y así poder analizar la trazabilidad de la medida del sensor. Para tal fin, se depositó una muestra de 1 L de suelo en un vaso de plástico perforado en su base, el cual se introdujo a su vez en otro vaso similar. El vaso contenedor de la muestra de suelo queda soportado por una estructura, de manera que se habilita un espacio entre ambos vasos permitiendo la acumulación del agua drenada, tal como muestra la Figura 5-2.



Figura 5-2. Prueba de trazabilidad. Sistema de drenaje.

El suelo utilizado era de tipo arcilloso, obtenido de la Finca Tomás Ferro. Se introdujeron el sensor experimental y el sensor 10HS en la muestra y se añadió un volumen de agua de aproximadamente la mitad del volumen del suelo. Se registraron las medidas de ambos sensores cada minuto, obteniendo el valor medio cada 15

minutos, durante 12 días. Se observó que durante estos 12 días el contenido de agua del suelo iba disminuyendo, ya fuera por el drenaje o por la propia evaporación. El sensor 10HS recogió esta evolución, pero el sensor experimental ofreció una salida prácticamente constante. Se barajó la posibilidad de que el hecho de permanecer ambos sensores midiendo al mismo tiempo y a una distancia reducida el uno del otro supusiera una influencia del campo eléctrico generado por el 10HS sobre el generado por el sensor experimental. Esta hipótesis se descartó como causa de la constancia del sensor experimental tras comprobar que éste proporcionaba el mismo valor de salida en ausencia del sensor 10HS. Al introducir el sensor experimental en muestras de suelo con diferentes contenidos de humedad se observó que, aproximadamente, por encima del 10% VWC la salida del sensor alcanzaba el fondo de escala y, por tanto, el sensor no presentaba sensibilidad para valores superiores al 10% VWC.

Tratando de subsanar este defecto, se modificó el valor de las resistencias R_1 y R_2 , con el fin de variar el ciclo de trabajo de la señal generada por el LMC555. Sin embargo, este cambio no resultó efectivo. No obstante, se observó que la frecuencia de la señal generada por el LMC555 sí presentaba sensibilidad ante la variación del contenido de humedad del suelo para todo su rango, por lo que se consideró que la falta de sensibilidad de la salida en tensión podía deberse a los bloques de filtrado y sustracción del sensor. En este sentido, se decidió prescindir de esta parte del diseño y asumir, por el momento, un sensor con salida en frecuencia.

5.2 Fase II. Calibración del sensor

La calibración se desarrolla tal y como se describe en el Capítulo 3.3, introduciendo alguna aportación y alguna pequeña variación con el objetivo de adaptar el protocolo propuesto por Decagon a las necesidades propias.

Se ha procedido a la calibración de dos sensores experimentales con el diseño propuesto en este estudio y de un sensor Decagon 10HS. El trabajo con dos sensores experimentales ha permitido determinar su reproducibilidad, mientras que el uso del sensor 10HS ha servido para realizar la comparación con un modelo ya validado y estudiado por numerosos autores. No obstante, la experimentación con el sensor 10HS también ha proporcionado datos para evaluar la validez de las expresiones que proporciona el fabricante.

Los sensores experimentales, identificados como Arifrut1 y Arifrut2, se han construido de forma similar, utilizando los mismos modelos de componentes electrónicos. Las únicas diferencias posibles entre ellos pueden deberse a la tolerancia en las dimensiones de la sonda, a la variabilidad del proceso de soldadura de los componentes o a la tolerancia de los propios componentes electrónicos.

Para proteger el circuito eléctrico de los sensores experimentales de la humedad durante los ensayos, y evitar posibles cortocircuitos, se ha aplicado una capa aislante de

vinilo líquido en spray, quedando únicamente sin cubrir los dientes de la sonda. Se trata de una medida temporal de aislamiento que permite la fácil restauración y modificación del sensor en esta versión prototipo. En trabajos futuros se abordará con mayor profundidad el aislamiento de la circuitería del sensor.

La calibración de estos tres sensores se ha llevado a cabo para tres tipos de suelo diferentes, dada su influencia en la respuesta de los sensores capacitivos. Estos tres suelos presentan las siguientes características básicas:

- Suelo 1
 - Identificador: AR-BM
 - Textura: Franco-Arcillosa
 - Color: Claro
 - Procedencia: Zona montañosa de Baños y Mendigo (Región de Murcia)
- Suelo 2
 - Identificador: AR-LP
 - Textura: Franco-Arcillosa
 - Color: Oscuro
 - Procedencia: Finca Tomás Ferro, La Palma (zona de cultivo de almendros)
- Suelo 3
 - Identificador: ARE-LS
 - Textura: Arenosa
 - Color: Amarillento
 - Procedencia: Jardín de La Seda, Murcia

La temperatura durante los ensayos se ha mantenido constante a un valor aproximado de 25°C.

5.2.1 Materiales

- Recipiente de calibración

Se utiliza un recipiente de calibración para cada tipo de suelo. Teniendo en cuenta que el sensor 10HS presenta unas dimensiones superiores a las del sensor experimental, el volumen de suelo abarcado por su medida será mayor. Por tanto, el volumen de suelo libre necesario para llevar a cabo la medida de forma adecuada quedará determinado por el sensor de Decagon.

Según se establece en el protocolo, el sensor 10HS debe quedar rodeado de suelo de forma continua en un radio de, al menos, 10 cm en dirección perpendicular a la superficie plana de la sonda. Considerando que el sensor se instale en el centro del recipiente, éste deberá tener un diámetro mínimo de 20 cm. En cuanto a la profundidad del recipiente, debe ser suficiente como para que

el sensor pueda quedar totalmente enterrado. El sensor de mayor longitud es de nuevo el 10HS, con 14,5 cm. Por lo tanto, el recipiente utilizado debe tener unas medidas mínimas de 14,5 cm de profundidad y 20 cm de diámetro. Se utiliza finalmente, para cada suelo, un cubo cilíndrico de polipropileno con un diámetro de 27,5 cm y una profundidad de 30 cm.

- Tubo de muestreo volumétrico

Para tomar las muestras de suelo se utiliza un cilindro de PVC que se introduce en el suelo y se extrae, de forma que queda una porción de suelo en su interior, conociendo así el volumen del mismo. En la bibliografía aparecen diversos criterios acerca del tamaño y número de muestras. En el método de Decagon (Cobos & Chambers 2010) se recomienda que este tubo tenga un diámetro de 1,5 – 2,5 cm, aunque no se especifica el volumen ni la masa total de la muestra. En (Soil Science Society of America 2002) se recomienda una muestra de 50-100 g. Por su parte, (Tan 2005) establece que la precisión será mayor cuanto mayor sea el número de muestras y menor sea el volumen de las mismas. Además, proporciona, a partir de (Pansu et al. 2001), un rango del ratio entre el diámetro y la altura del tubo de muestreo, dentro del cual se minimizan los efectos de variación de la compresibilidad del suelo al tomar la muestra. Este rango es: $0,5 < H/D < 2$, siendo H la altura y D el diámetro del tubo de muestreo. Se ha de tener en cuenta que la compresibilidad del terreno influirá en la densidad del mismo, de ahí estas limitaciones.

Finalmente, ante la ambigüedad de criterios y tratando de quedar cerca de todas estas premisas, que no son sino recomendaciones, se decide utilizar un tubo de muestreo de diámetro interior $D = 3,6$ cm y altura $H = 6$ cm, lo que supone un volumen de $61,07256$ cm³.



Figura 5-3. Tubo de muestreo volumétrico.

- Recipientes para secado de suelo

Los recipientes para el secado de las muestras de suelo deben ser capaces de albergar una muestra del tamaño del tubo de muestreo y de estar preparados para soportar una temperatura de 105°C durante 24 h en un horno. Tras barajar varias posibilidades se decide utilizar bandejas de aluminio rectangulares

desechables para horneado de alimentos. Su bajo coste, unido a la incorporación de una tapa de cartón para evitar la pérdida de partículas durante su transporte, las hace idóneas para este propósito. Sus dimensiones son: 20,4 x 11,4 x 5,5 cm.

- **Báscula**

Para el pesado de las muestras se utiliza una báscula Inateck DS1001, con una resolución de 0,1 g y un rango de 0 – 3000 g.



Figura 5-4. Báscula Inateck DS1001.

- **Horno de secado**

Para secar las muestras se utiliza un horno con ventilación por convección capaz de mantener una temperatura entre 105 y 110°C de manera constante.

A todos estos materiales hay que sumar los sensores a calibrar y el datalogger ya descrito anteriormente.

5.2.2 Procedimiento

1. Se obtuvieron aproximadamente 15 litros de cada tipo de suelo.
2. Cada uno de los suelos se extendió en una superficie plana, tal como muestra la Figura 5-5, y se dejó secar al aire libre durante más de 24 horas.



Figura 5-5. Proceso de secado al aire libre de los tres tipos de suelo ensayados. De izquierda a derecha: ARE-LS, AR-LP y AR-BM.

- Una vez secados, los suelos se cribaron con un garbillo o tamiz de 2,5 mm para retirar las partículas de gran tamaño, que generarían una heterogeneidad indeseada en el terreno durante la medida del sensor. El suelo cribado se va depositando en los recipientes de calibración, tal como muestra la Figura 5-6.



Figura 5-6. Proceso de cribado del suelo seco.

A partir de este punto se procede de igual forma con todos los suelos.

- El suelo cribado, depositado en el recipiente de calibración, se compacta ligeramente por capas. El terreno de cultivo no se suele compactar a propósito, sino que la compactación que presenta es debida al paso natural de maquinaria y personas. Los suelos utilizados en este estudio se han obtenido en superficie en su lugar de origen, por lo que la medida del nivel de compactación en campo que se pudiera realizar no sería fiel a la presentada a determinadas profundidades. A esto se suma la dificultad de conseguir una compactación homogénea a un valor concreto de densidad aparente. De esta forma, se decidió trabajar a un nivel de compactación medio en cada suelo y ofrecer una calibración para un rango de densidad aparente.

5. Una vez llenado el recipiente de calibración, se introducían los sensores Arifrut1, Arifrut2 y 10HS en el suelo, de manera consecutiva e independiente, es decir, no coincidían dos sensores midiendo a la vez en el recipiente de calibración. Se tomaban tres medidas consecutivas con cada uno de ellos en puntos diferentes del suelo y permaneciendo el sensor enterrado hasta la estabilización de su medida. Esto se realiza para analizar la repetitividad del sensor y tener en cuenta la heterogeneidad del suelo.



Figura 5-7. Vista general del sensor enterrado en el recipiente de calibración.

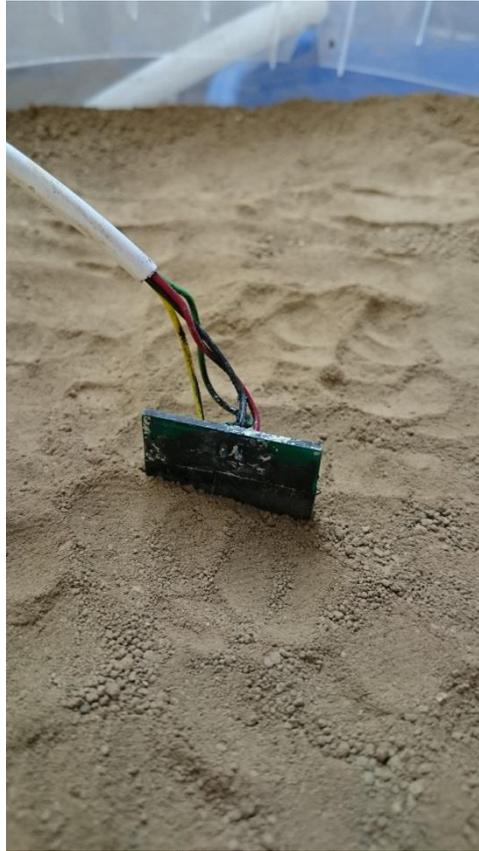


Figura 5-8. Vista detallada del sensor enterrado en el recipiente de calibración.

6. Tras registrar las medidas con los tres sensores se procedía a obtener dos muestras de suelo mediante el tubo de muestreo volumétrico. Para tal fin, se introducía el tubo en una zona de suelo no perturbada por la penetración de los sensores y se extraía con ayuda de una pala. Para determinados niveles de humedad se requería de la ayuda de una herramienta de impacto que permitiera la inserción del tubo en el suelo, utilizando siempre un medio de protección intermedio que impidiese la deformación del tubo. Tras extraer el tubo de muestreo se rasuraban sus bases para retirar el exceso de suelo y que éstas quedasen planas, tal como muestra la Figura 5-9.



Figura 5-9. Muestra de suelo obtenida con el tubo de muestreo volumétrico.

7. La muestra de suelo se extraía del tubo cuidadosamente para no perder ninguna partícula y se depositaba en un recipiente de secado previamente pesado.
8. El recipiente de pesado junto con la muestra de suelo se pesaban y se registraba la medida, quedando ésta anotada en el propio recipiente. El recipiente de pesado se cerraba con la tapadera correspondiente y se almacenaba hasta el proceso de secado.



Figura 5-10. Proceso de pesado de la muestra de suelo húmeda.

9. El suelo restante en el recipiente de calibración se vertía en un barreño, donde, con un pulverizador, se añadía agua para aumentar su contenido de humedad y se mezclaba manualmente para lograr un reparto uniforme. El volumen de agua añadido en cada ensayo dependía del tipo de suelo en cuestión. Los pasos 4 – 8 se repetían hasta que el suelo alcanzase la saturación. El objetivo era obtener 5 ó 6 puntos de calibración en cada suelo, tal como se recomienda en el protocolo de Decagon; excepto en el suelo AR-LP, donde se decidió obtener el doble de puntos por tratarse de un suelo más característico para el cultivo. Para conocer el

volumen de agua a añadir en cada iteración, de manera que se obtuviese un número determinado de puntos de calibración antes de llegar a la saturación, se recurrió a los valores de porosidad estimados para cada tipo de suelo en (Pérez Valcárcel n.d.). La porosidad coincide con el contenido volumétrico de agua en el suelo saturado.

10. Una vez obtenido un número suficiente de muestras de suelo húmedo, se trasladaban al horno de secado, donde se depositaban y se dejaban secar a 105 – 110°C durante 24 horas.



Figura 5-11. Muestras de suelo secando en el horno.

11. Tras el proceso de secado, las muestras se extraían del horno y se volvían a pesar junto con el recipiente de secado.

Este procedimiento de calibración ha permitido obtener una serie de puntos que relacionan la respuesta de los sensores con el contenido volumétrico de humedad del suelo obtenido por el método termo-gravimétrico. En el siguiente capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos.

6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se exponen los resultados obtenidos respecto a la calibración de los sensores. Se presentan las medidas realizadas y se trata de obtener un modelo matemático que relacione la magnitud ofrecida por el sensor (frecuencia) y la magnitud a medir (VWC). Se analizan, a su vez, propiedades como la repetitividad o la reproducibilidad del sensor. Asimismo, se compara el comportamiento del sensor experimental con el del sensor comercial 10HS, cuya ecuación de calibración aportada por el fabricante es evaluada.

6.1 Análisis preliminares

El objetivo principal es obtener una ecuación que relacione la frecuencia medida por el sensor con el contenido volumétrico de agua en el suelo. Esta expresión permitirá obtener el valor de VWC correspondiente a partir de un valor de frecuencia medido con el sensor experimental. De esta manera, se define la frecuencia como la variable independiente y el VWC como la variable dependiente.

En este primer apartado se presentan las medidas obtenidas por el sensor Arifrut1 para cada uno de los tres tipos de suelo ensayados y se realiza una primera aproximación al modelo matemático estudiando diferentes curvas de ajuste.

A continuación se presentan las nubes de puntos obtenidas con el sensor Arifrut1 en cada suelo.

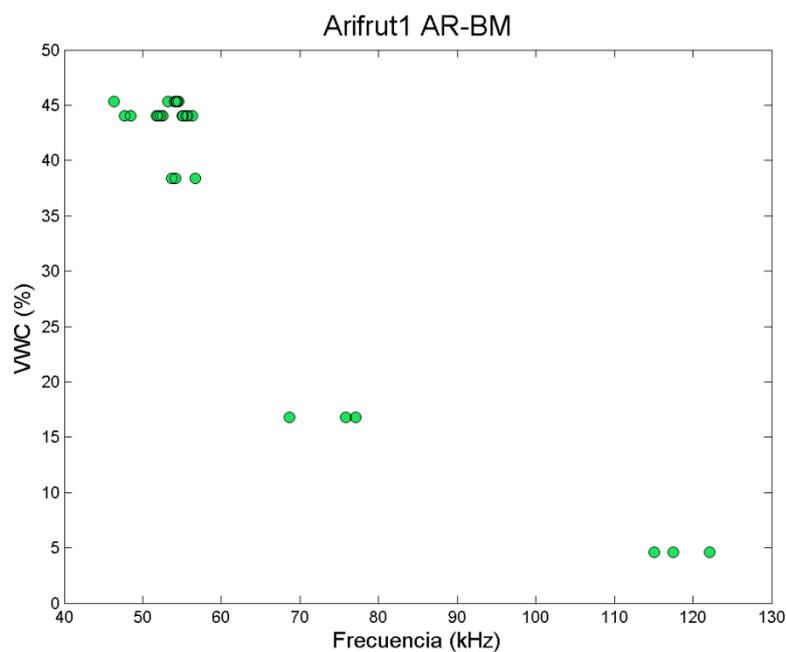


Figura 6-1. Nube de puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en el suelo AR-BM.

Los datos obtenidos en el suelo AR-BM son, quizás, los de menor calidad, en comparación con los otros dos suelos. El hecho de ser el suelo del que menos puntos se han recogido (5 niveles de humedad) y que los dos últimos experimentos presenten un nivel de humedad muy cercano ($\approx 45\%$) resta representatividad al ajuste obtenido. Durante la experimentación se observa que este suelo es difícil de trabajar a partir de un cierto nivel de humedad, dificultando su compactación y la inserción de los sensores. Además, esto provoca la formación de grandes huecos, al agruparse sus partículas en grandes terrones. Aun así, y tal como se verá más adelante, la modelización de los sensores en este suelo es bastante coherente con respecto al otro suelo arcilloso ensayado.

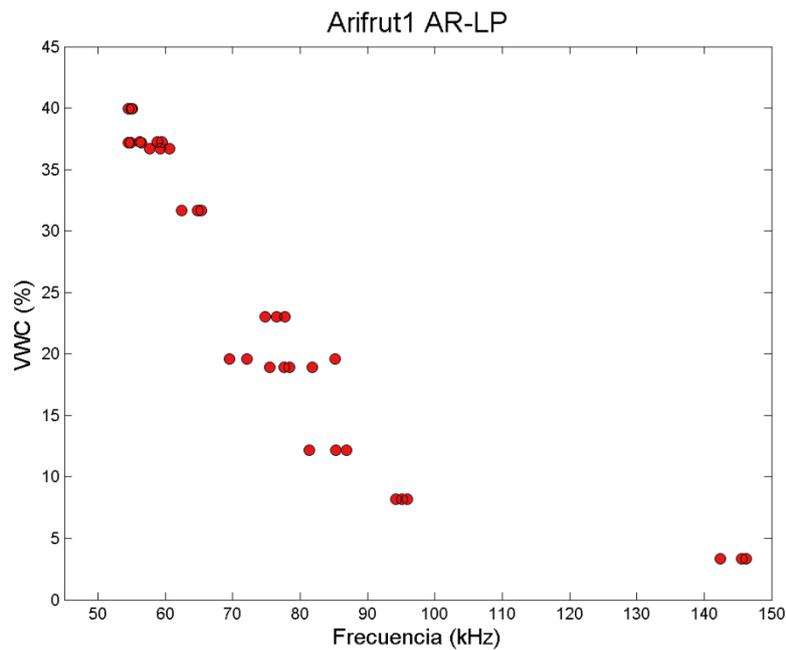


Figura 6-2. Nube de puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en el suelo AR-LP.

El AR-LP es el suelo del que más medidas se tienen. Será el suelo de referencia a la hora del estudio preliminar de los ajustes. Según la nube de puntos presentada, el comportamiento del sensor Arifrut1 en este suelo se asemeja al observado en el suelo AR-BM.

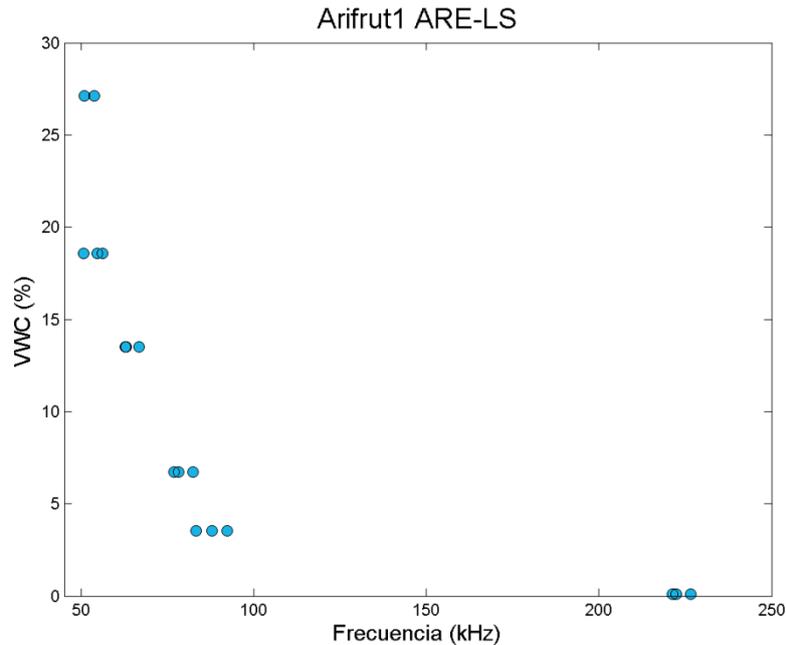


Figura 6-3. Nube de puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en el suelo AR-LS.

El comportamiento del sensor Arifrut1 en el suelo arenoso ARE-LS parece más definido que en los otros dos casos. Sin embargo, en los tres suelos se aprecia que, para valores de humedad bajos, un ligero incremento de ésta se corresponde con un gran incremento de la frecuencia del sensor. Esto significa que en dicho rango de humedad el sensor presenta dificultades para representar una variación de la misma, o lo que es lo mismo, presenta poca sensibilidad. Esto queda más patente, quizás, en este último caso con suelo arenoso.

En este sentido, una visualización interesante sería la mostrada en la Figura 6-4, donde se presentan de manera conjunta los anteriores gráficos. Sin necesidad de haber profundizado apenas en el modelado del sensor, se observan ciertos comportamientos, cuanto menos, relevantes. Por un lado, se aprecia claramente que los puntos correspondientes a suelos arcillosos (AR-BM y AR-LP) describen una nube diferenciada de la del suelo arenoso (ARE-LS). Esto indica, a priori, que el instrumento desarrollado es sensible a la textura del suelo. Por otro lado, los ensayos en los tres suelos se han llevado a cabo desde el estado de secado al aire libre hasta el estado de saturación. La Figura 6-4 muestra que los dos suelos arcillosos parten de un valor seco de VWC ($\approx 4\%$) superior al del suelo arenoso ($\approx 0\%$), habiéndose desarrollado el proceso de secado en las mismas condiciones. Esta ligera apreciación refleja la mayor capacidad de almacenamiento de agua que presentan los suelos arcillosos. Finalmente, otro dato relevante que se deduce de este gráfico es la diferencia en las humedades de saturación de los tres suelos. Al igual que sucede en la humedad de estado seco, existen notables diferencias entre los suelos arcillosos, cuya saturación se alcanza para $VWC_{sat} \approx 40 - 45\%$ y el suelo arenoso ($VWC_{sat} \approx 27\%$).

Como primera aproximación al modelo de ajuste, se observa también que para valores de humedad superiores al 5%, la respuesta del sensor es prácticamente lineal.

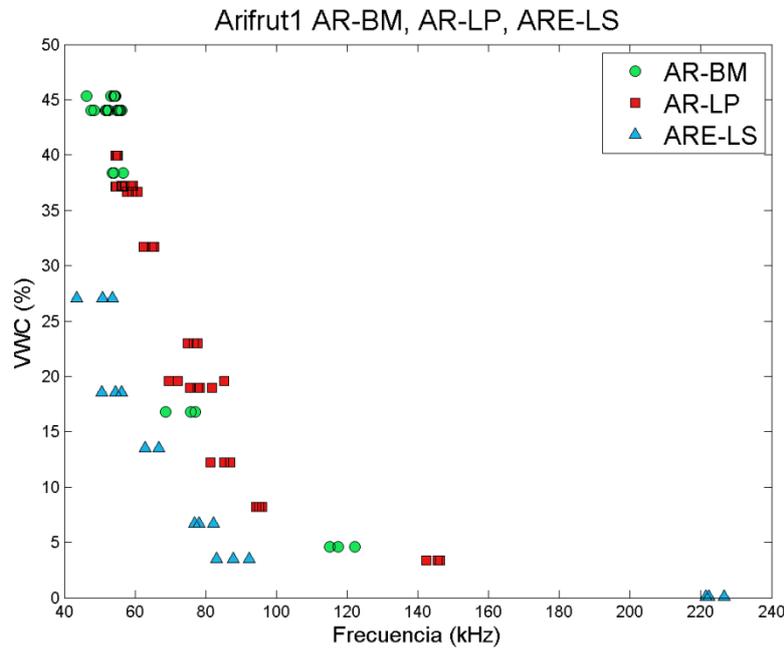


Figura 6-4. Comparación de los puntos obtenidos por el sensor Arifrut1 en los tres suelos.

6.2 Estudio de la variabilidad

Uno de los parámetros que va a caracterizar el comportamiento del sensor y que va a limitar sus prestaciones es la variabilidad de las medidas. En un proceso de medida existen diferentes fuentes de variación, como el operario, las condiciones de operación y medida, el momento, el lugar, etc. En este caso se trata de determinar los parámetros de repetitividad y reproducibilidad del sensor.

La repetitividad se refiere a la capacidad del sensor de ofrecer medidas idénticas en intervalos de tiempo muy reducidos cuando las condiciones de medida, el laboratorio y el operario se mantienen constantes.

La reproducibilidad, por su parte, hace referencia a la similitud de las medidas efectuadas bajo condiciones diferentes.

Para analizar la repetitividad del sensor se llevan a cabo diferentes medidas para cada nivel de humedad en cada suelo. Por otro lado, se mide con los dos sensores experimentales (Arifut1 y Arifrut2) en las mismas condiciones, con el objetivo de determinar la reproducibilidad del sensor; en este caso, basada en una variación del instrumento de medida. Sin embargo, el procedimiento de medida llevado a cabo presenta un inconveniente ya citado en el Capítulo 3.3.4. Resulta que la inserción del sensor en el mismo lugar de donde se ha extraído tras la medida previa asegura, según la experiencia, una importante falta de repetitividad. Se podría decir que cada medida

supone un ensayo destructivo. Por este motivo, las sucesivas medidas realizadas con un mismo sensor para un mismo nivel de humedad se llevan a cabo en diferentes puntos del suelo, aunque muy próximos. Lo mismo sucede cuando se mide con el otro sensor. De esta manera, no se tienen dos medidas con el mismo sensor o con sensores diferentes en el mismo punto exacto. Esta limitación del método es intrínseca de la naturaleza del sensor y de su entorno.

En este sentido, se debe tener en cuenta que en el estudio, tanto de la repetitividad como de la reproducibilidad del sensor, se realiza una sobreestimación de las mismas, que realmente corresponde a la variabilidad inducida por la heterogeneidad del suelo. De este modo, a la hora de estudiar estos parámetros se ha considerado que el suelo es homogéneo en todos sus aspectos (humedad, composición, compactación...).

De esta forma, se ha llevado a cabo un estudio R&R (Repetitividad y Reproducibilidad). Existen diferentes modalidades: Rango, Promedio y Rango, y ANOVA (análisis de la varianza). Éste último ha sido el método seguido.

En primer lugar se comparan las medidas de los dos sensores experimentales en cada tipo de suelo.

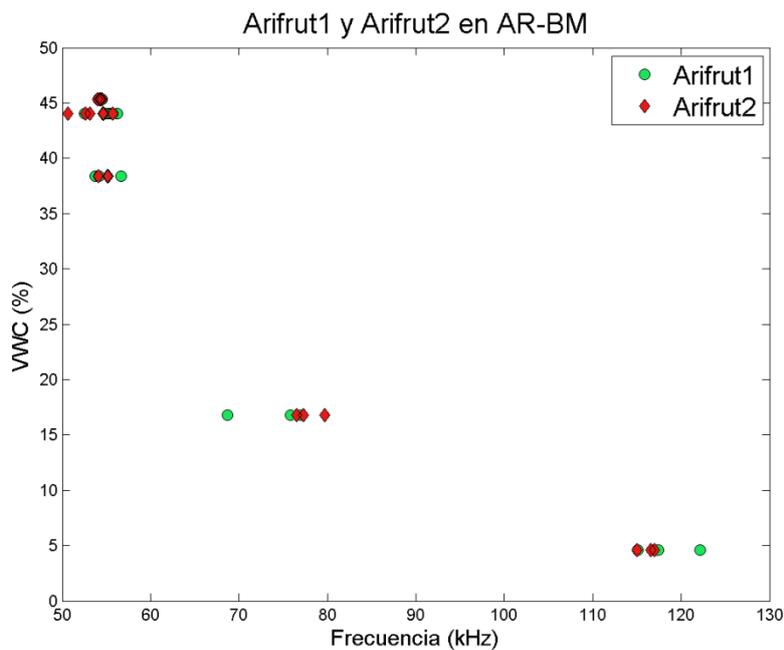


Figura 6-5. Comparación sensores Arifrut 1 y Arifrut 2 en el suelo AR-BM.

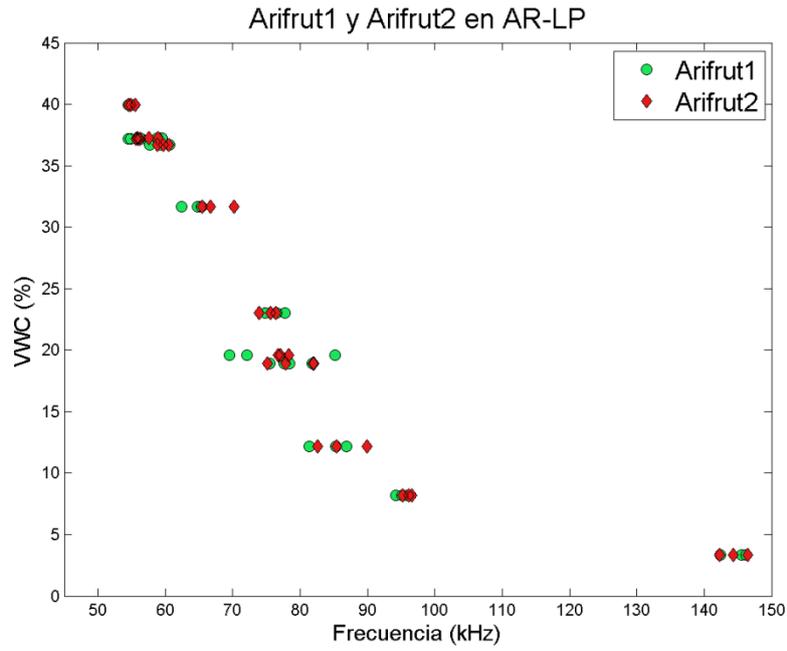


Figura 6-6. Comparación sensores Arifrut 1 y Arifrut 2 en el suelo AR-LP.

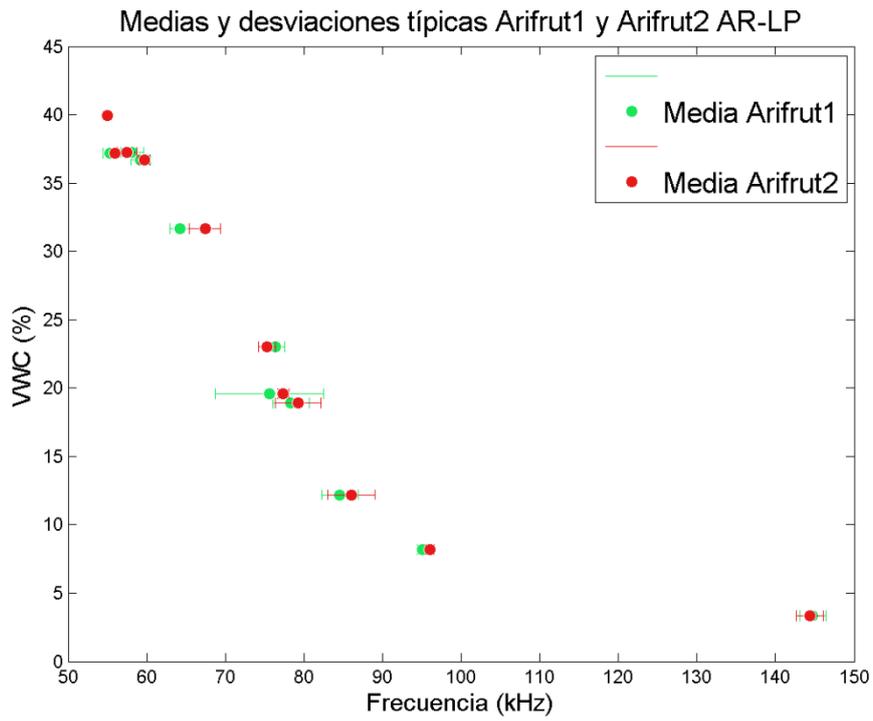


Figura 6-7. Representación de medias y desviaciones típicas de los sensores Arifrut1 y Arifrut2 en el suelo AR-LP.

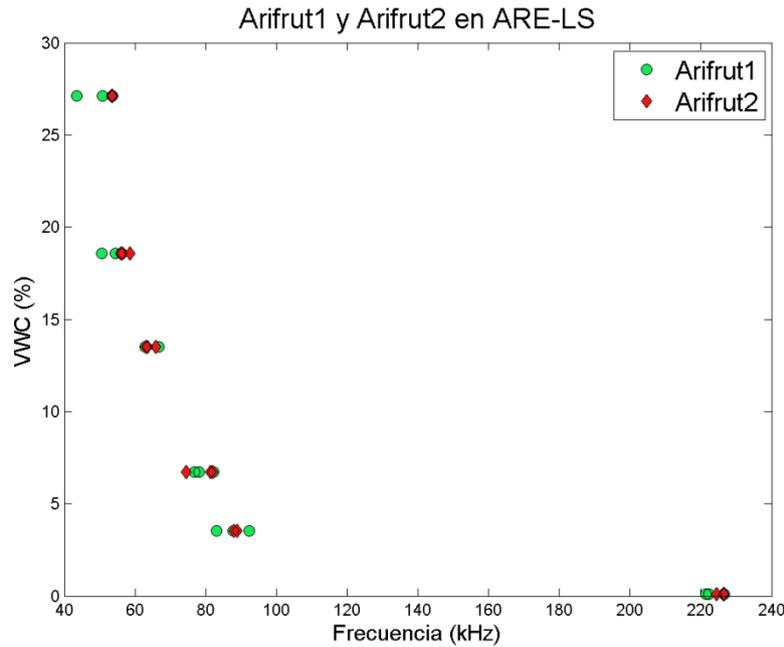


Figura 6-8. Comparación sensores Arifrut 1 y Arifrut 2 en el suelo ARE-LS.

En los tres suelos se observa que ambos sensores se comportan de manera similar. Para ciertos niveles de humedad se produce un ligero desplazamiento en frecuencia de los puntos registrados por un sensor respecto a los del otro. En la mayoría de ocasiones que se produce este desplazamiento, es el sensor Arifrut1 el que para un mismo nivel de humedad registra una menor frecuencia, aunque no siempre es así. Además, se observa que los puntos del sensor Arifrut2 se encuentran más concentrados y presentan una menor variabilidad. En este aspecto, la mayor dispersión de los puntos del sensor Arifrut1 puede ser la causa del pequeño desplazamiento percibido con respecto al sensor Arifrut2.

Por su parte, en la Figura 6-7 se representan los valores medios de cada sensor acompañados de un rango simétrico cuyo valor es el doble de la desviación típica. Es decir, desde el centro, que coincide con la media, hasta el extremo del rango se tiene una distancia igual a la desviación típica. Este gráfico permite ver que, a pesar de la pequeña, a veces inexistente, variabilidad de cada sensor en cada nivel de humedad, los valores medios conseguidos por ambos sensores se encuentran muy próximos.

Respecto a la ligera falta de reproducibilidad entre sensores, según el desplazamiento en frecuencia observado, en la bibliografía se recomienda llevar a cabo la normalización de la frecuencia para corregir este desplazamiento (Chen et al. 2013; IAEA 2008; Starr & Paltineanu 2002). Se propone sustituir los valores de frecuencia por la frecuencia normalizada, calculada según la siguiente expresión:

$$SF = \frac{F_{air} - F_s}{F_{air} - F_w} \tag{6-1}$$

donde,

F_{air} es la frecuencia de cada sensor midiendo en aire.

F_w es la frecuencia de cada sensor midiendo en agua.

F_s es la frecuencia del sensor midiendo en el suelo; aquella que se normaliza.

De esta manera, se pretende que con dos mediciones rápidas en aire y en agua, un los sensores de una misma familia eliminen el offset entre sí. En el caso de los sensores Arifrut1 y Arifrut2, sus frecuencias midiendo en aire coinciden y su valor es de 250 kHz aproximadamente, ya que puede variar en un rango de ± 3 kHz en condiciones normales, según se ha observado durante la experimentación. También se ha observado que el sensor presenta cierta histéresis, ya que tras un periodo de medida en suelo o en agua, su frecuencia en aire puede ascender hasta 260 kHz, estabilizándose a un valor en torno a los 250 kHz pasados unos minutos. Por su parte, los valores de ambos sensores midiendo en agua sí que difieren. El sensor Arifrut1 consigue llegar hasta, aproximadamente, 46 kHz, mientras que el Arifrut2 no baja de 48,9 kHz. Esto hace que la *Ecuación (6-1)* se pueda expresar como:

$$SF_{Arifrut1} = \frac{250 - F_s \text{ (kHz)}}{250 - 46} \quad (6-2)$$

$$SF_{Arifrut2} = \frac{250 - F_s \text{ (kHz)}}{250 - 48,9} \quad (6-3)$$

Los valores de frecuencia normalizados para el suelo AR-BM se presentan en la Figura 6-9. La distribución de los puntos cambia de orientación y ahora la variable independiente, SF, presenta un valor entre 0 y 1. Sin embargo, lejos de mejorar la reproducibilidad de los sensores, se produce un alejamiento de las medias.

Tras realizar un test ANOVA en los supuestos de frecuencias normalizadas y no normalizadas se obtiene el error total para cada caso. Este error total es la suma del error debido a la variabilidad entre sensores y del debido a la variabilidad entre las medidas de cada sensor, conseguidos entre todos los niveles de humedad. Con frecuencias normalizadas, el error producido (0,0052) es superior al obtenido con frecuencias no normalizadas (0,0034) en el suelo AR-BM. En el resto de suelos sucede de manera similar. La baja repetitividad del sensor en agua, unido a su histéresis, puede ser el motivo de una mala estimación de los valores de frecuencia en agua y, por tanto, de la ineficiencia de la normalización de frecuencias en este caso. No obstante, antes de llevar a cabo la normalización, la reproducibilidad de los sensores era altamente notable; es decir, el offset entre ellos es prácticamente despreciable en la mayoría de los casos, por lo que se decide trabajar finalmente con los valores de frecuencia sin normalizar.

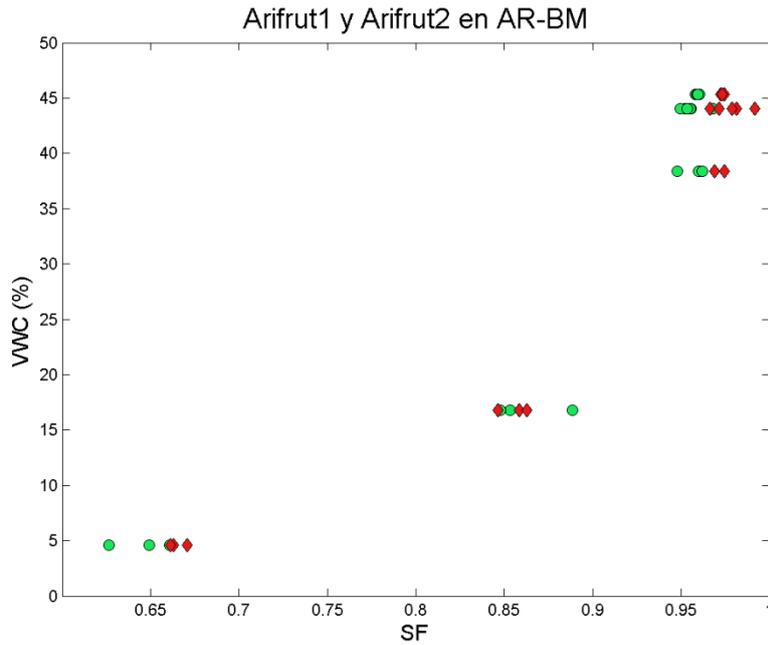


Figura 6-9. Medidas normalizadas de los sensores Arifrut1 y Arifrut2 en el suelo AR-BM.

El estudio R&R se lleva a cabo mediante la realización de test ANOVA de un factor. Como se argumenta anteriormente, las diferentes medidas de un mismo sensor para un mismo nivel de humedad en un mismo suelo se consideran realizadas en condiciones homogéneas. Esto significa que no se considera la diferente localización de la medida en la muestra de suelo como un factor. El único factor que se presenta es el del uso de dos sensores diferentes (Arifrut1 y Arifrut2). Por tanto, el estudio aportará información acerca de la repetitividad y reproducibilidad de los mismos.

Los test ANOVA se han llevado a cabo en los tres tipos de suelo y se ha realizado un test para cada nivel de humedad en cada caso. De esta forma se comparan las medidas consecutivas del sensor Arifrut1 y del sensor Arifrut2 para un nivel de humedad dado. En todos los ensayos realizados se ha obtenido un mínimo de tres medidas con cada sensor.

El test ANOVA plantea un contraste de hipótesis:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1: \exists \mu_j \neq \mu \quad j = 1, 2, \dots, k$$

La hipótesis nula (H_0) establece que las medias de todos los grupos analizados son iguales, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) sostiene que existe algún grupo j cuya media difiere del resto.

El test ANOVA proporciona un *p-valor*. Para un nivel de significación dado, en este caso, $\alpha = 0,05$, el *p-valor* se compara con α , de manera que si $p\text{-valor} < \alpha$ se rechaza la hipótesis nula. En el caso estudiado, el objetivo es que la hipótesis nula no se rechace, implicando esto que no se pueda afirmar que las medias sean diferentes.

Para llevar a cabo el test ANOVA se deben cumplir una serie de premisas:

- Las poblaciones siguen una distribución normal
- Las muestras son independientes
- Las poblaciones tienen igual varianza (Hipótesis de homocedasticidad)

La hipótesis de homocedasticidad, que se puede analizar a grandes rasgos en la Figura 6-7 para el suelo AR-LP, por ejemplo, se cumple, salvo en algunos casos aislados.

A partir del test ANOVA se genera la Tabla ANOVA, que incluye el *p-valor*, la suma de cuadrados (SS) para cada fuente, los grados de libertad (df) asociados a cada fuente, los cuadrados medios (SM = SS/df) y el estadístico F. El valor de cada uno de estos parámetros se especifica para una serie de fuentes: variabilidad entre grupos (*Columns*), variabilidad dentro de los grupos (*Error*) y un total que se corresponde con la suma de ambos.

La variabilidad entre grupos hace referencia, en este caso, a la diferencia entre las medidas de los dos sensores ensayados, por lo que está asociada a la reproducibilidad. La variabilidad dentro de los grupos se refiere a diferencia entre las medidas de un mismo sensor, y está relacionada con la repetitividad.

A continuación se presentan los resultados de los test ANOVA realizados para cada nivel de humedad en cada suelo.

6.2.1 Resultados Test ANOVA

Resultados Test ANOVA suelo AR-BM

Tabla 6-1. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 1 en el suelo AR-BM.

Suelo AR-BM. Nivel de humedad 1 (4,58%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	6,3099015	1	6,3099015	0,91754616	0,39236419
Error	27,5077233	4	6,87693083		
Total	33,8176248	5			

Tabla 6-2. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 2 en el suelo AR-BM.

Suelo AR-BM. Nivel de humedad 2 (16,78%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	23,67312067	1	23,67312067	2,041179397	0,226290837
Error	46,39106333	4	11,59776583		
Total	70,064184	5			

Tabla 6-3. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 3 en el suelo AR-BM.

Suelo AR-BM. Nivel de humedad 3 (38,396%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,004648167	1	0,004648167	0,00320051	0,95759848
Error	5,809282667	4	1,452320667		
Total	5,813930833	5			

Tabla 6-4. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 4 en el suelo AR-BM.

Suelo AR-BM. Nivel de humedad 4 (44,045%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	6,463604083	1	6,463604083	2,568439914	0,14009739
Error	25,16548683	10	2,516548683		
Total	31,62909092	11			

Tabla 6-5. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 5 en el suelo AR-BM.

Suelo AR-BM. Nivel de humedad 5 (45,35%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,001596125	1	0,001596125	0,046827154	0,835848951
Error	0,20451275	6	0,034085458		
Total	0,206108875	7			

En todos los niveles de humedad se obtiene un *p-valor* (Prob > F) muy superior a 0,05. Esto quiere decir que no se puede rechazar la hipótesis nula y, por tanto, no se puede afirmar que las medias entre ambos sensores sean diferentes y que el sensor utilizado sea influyente en la medida. El hecho de no poder afirmar estos enunciados no implica necesariamente que sean negables. Este resultado es positivo desde el punto de vista de la reproducibilidad, ante la semejanza en las medias de ambos sensores.

Por otro lado, los valores de la suma de cuadrados son consecuentes con la Figura 6-5 y su valor es mayor en los puntos a baja humedad. Además, se aprecia que la suma de cuadrados es mayor en el interior de los grupos, es decir, entre las medidas de un mismo sensor, por lo que, aparentemente, predomina la falta de repetitividad frente a la falta de reproducibilidad.

Resultados Test ANOVA suelo AR-LP

Tabla 6-6. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 1 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 1 (3,35%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,169680167	1	0,169680167	0,04020569	0,850861327
Error	16,88120933	4	4,220302333		
Total	17,0508895	5			

Tabla 6-7. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 2 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 2 (8,18%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	1,224920167	1	1,224920167	2,111741386	0,21983402
Error	2,320208667	4	0,580052167		
Total	3,545128833	5			

Tabla 6-8. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 3 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 3 (12,198%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	3,2989335	1	3,2989335	0,308246988	0,608341803
Error	42,80896333	4	10,70224083		
Total	46,10789683	5			

Tabla 6-9. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 4 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 4 (18,939%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	1,5488	1	1,5488	0,17105232	0,693554165
Error	54,3272375	6	9,054539583		
Total	55,8760375	7			

Tabla 6-10. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 5 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 5 (19,56%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	4,750820167	1	4,750820167	0,133654493	0,733185253
Error	142,1821313	4	35,54553283		
Total	146,9329515	5			

Tabla 6-11. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 6 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 6 (23,005%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	1,680104167	1	1,680104167	0,908580561	0,394468609
Error	7,396610667	4	1,849152667		
Total	9,076714833	5			

Tabla 6-12. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 7 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 7 (31,68%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	15,76260417	1	15,76260417	3,711406144	0,126322819
Error	16,98828267	4	4,247070667		
Total	32,75088683	5			

Tabla 6-13. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 8 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 8 (36,677%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,323408167	1	0,323408167	0,227187834	0,658487046
Error	5,694110667	4	1,423527667		
Total	6,017518833	5			

Tabla 6-14. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 9 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 9 (37,25%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,689526	1	0,689526	0,260133375	0,636882792
Error	10,60265333	4	2,650663333		
Total	11,29217933	5			

Tabla 6-15. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 10 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 10 (37,169%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,6534	1	0,6534	1,206845812	0,333639802
Error	2,165645333	4	0,541411333		
Total	2,819045333	5			

Tabla 6-16. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 11 en el suelo AR-LP.

Suelo AR-LP. Nivel de humedad 11 (39,95%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,009760667	1	0,009760667	0,061505953	0,816342584
Error	0,634778667	4	0,158694667		
Total	0,644539333	5			

Para este tipo de suelo, los resultados del test son muy similares a los obtenidos en el suelo AR-BM. En todos los casos se rechaza la hipótesis nula y predomina la variabilidad dentro un sensor sobre la variabilidad entre sensores. Ésta última disminuye sobre todo a niveles altos de humedad.

Resultados Test ANOVA suelo ARE-LS

Tabla 6-17. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 1 en el suelo ARE-LS.

Suelo ARE-LS. Nivel de humedad 1 (0,082%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	8,257920167	1	8,257920167	1,823101549	0,248285631
Error	18,11839867	4	4,529599667		
Total	26,37631883	5			

Tabla 6-18. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 2 en el suelo ARE-LS.

Suelo ARE-LS. Nivel de humedad 2 (3,52%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	1,003686	1	1,003686	0,095421126	0,772815794
Error	42,07395333	4	10,51848833		
Total	43,07763933	5			

Tabla 6-19. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 3 en el suelo ARE-LS.

Suelo ARE-LS. Nivel de humedad 3 (6,71%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,031974	1	0,031974	0,002548637	0,962157071
Error	50,18212	4	12,54553		
Total	50,214094	5			

Tabla 6-20. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 4 en el suelo ARE-LS.

Suelo ARE-LS. Nivel de humedad 4 (13,51%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	0,000266667	1	0,000266667	7,5507E-05	0,993482995
Error	14,12672333	4	3,531680833		
Total	14,12699	5			

Tabla 6-21. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 5 en el suelo ARE-LS.

Suelo ARE-LS. Nivel de humedad 5 (18,58%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	16,335	1	16,335	3,223113867	0,147039926
Error	20,27232133	4	5,068080333		
Total	36,60732133	5			

Tabla 6-22. Tabla ANOVA para el nivel de humedad 6 en el suelo ARE-LS.

Suelo ARE-LS. Nivel de humedad 6 (27,099%)					
Source	SS	df	MS	F	Prob>F
Columns	26,03750017	1	26,03750017	1,881466141	0,242073982
Error	55,35576667	4	13,83894167		
Total	81,39326683	5			

En el suelo ARE-LS, los resultados son similares a los conseguidos en los otros dos suelos, alcanzando en algunos casos un *p-valor* de prácticamente la unidad.

6.2.2 Indicadores de repetitividad y reproducibilidad

A partir de la tabla ANOVA se pueden obtener estimadores de variabilidad asociados a la repetitividad y a la reproducibilidad, así como del valor de precisión intermedia del sensor (Quaglino et al. 2010).

El estimador de la variabilidad de la repetitividad se define, siguiendo la nomenclatura de la tabla ANOVA, como:

$$\sigma_{repetitividad} = \sqrt{MS_{Error}} \quad (6-4)$$

El estimador de la variabilidad de la reproducibilidad:

$$\sigma_{reproducibilidad} = \sqrt{\frac{|MS_{Columns} - MS_{Error}|}{n}} \quad (6-5)$$

siendo n el número de observaciones.

El estimador de la precisión intermedia del sensor o variabilidad del sistema:

$$\sigma_{sensor} = \sqrt{\sigma_{repetitividad}^2 + \sigma_{reproducibilidad}^2} \quad (6-6)$$

Por su parte, se expresan los porcentajes de las variabilidades de repetitividad y reproducibilidad con respecto a la variabilidad total como:

$$\% \text{ Repetitividad} = \frac{\sigma_{repetitividad}^2}{\sigma_{sensor}^2} \cdot 100 \quad (6-7)$$

$$\% \text{ Reproducibilidad} = \frac{\sigma_{reproducibilidad}^2}{\sigma_{sensor}^2} \cdot 100 \quad (6-8)$$

En base a ello, se presentan los resultados obtenidos para cada suelo y en cada nivel de humedad nuevamente:

Tabla 6-23. Estimadores de repetitividad y reproducibilidad en el suelo AR-BM.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
$\sigma_{repetitividad}$ (kHz)	2,62239029	3,40554927	1,20512268	1,58636335	0,18462248
$\sigma_{reproducibilidad}$ (kHz)	0,43475255	2,00626974	0,69466359	0,81107495	0,09012399
σ_{sensor} (kHz)	2,65818371	3,95257943	1,39099898	1,78168214	0,20544535
% Repetitividad	97,3250585	74,2357541	75,0600576	79,2765757	80,7563177
% Reproducibilidad	2,6749415	25,7642459	24,9399424	20,7234243	19,2436823

Tabla 6-24. Estimadores de repetitividad y reproducibilidad en el suelo AR-LP.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	
$\sigma_{repetitividad}$ (kHz)	2,054337444	0,761611559	3,27142795	3,009076201	5,96200745	
$\sigma_{reproducibilidad}$ (kHz)	1,161984246	0,463633476	1,570913464	1,369830243	3,203888922	
σ_{sensor} (kHz)	2,36019273	0,891632305	3,629050832	3,306202426	6,76834079	
% Repetitividad	75,76151095	72,96178718	81,26220769	82,83378212	77,59265163	
% Reproducibilidad	24,23848905	27,03821282	18,73779231	17,16621788	22,40734837	
	Nivel 6	Nivel 7	Nivel 8	Nivel 9	Nivel 10	Nivel 11
$\sigma_{repetitividad}$ (kHz)	1,359835529	2,060842223	1,193116787	1,628085788	0,735806587	0,398364992
$\sigma_{reproducibilidad}$ (kHz)	0,237380496	1,959211874	0,605562961	0,808524857	0,19320858	0,222810832
σ_{sensor} (kHz)	1,380399278	2,843515752	1,337996325	1,817794207	0,760750215	0,456442037
% Repetitividad	97,04280053	52,52646939	79,51628302	80,21676442	93,54986726	76,17124627
% Reproducibilidad	2,957199471	47,47353061	20,48371698	19,78323558	6,45013274	23,82875373

Tabla 6-25. Estimadores de repetitividad y reproducibilidad en el suelo ARE-LS.

	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6
$\sigma_{repetitividad}$ (kHz)	2,128285617	3,243221906	3,541966968	1,879276678	2,251239733	3,720072804
$\sigma_{reproducibilidad}$ (kHz)	1,114797515	1,780898868	2,042347995	1,084959933	1,937947339	2,016478655
σ_{sensor} (kHz)	2,40257636	3,700012042	4,088607995	2,169981311	2,970474747	4,231445124
% Repetitividad	78,4703195	76,83286973	75,04781741	75,00141578	57,43700169	77,29038181
% Reproducibilidad	21,5296805	23,16713027	24,95218259	24,99858422	42,56299831	22,70961819

Tal como se avanza en el análisis del capítulo anterior, los estimadores muestran que la repetitividad presenta un mayor peso que la reproducibilidad sobre la variabilidad total. Casi en la totalidad de los casos, la variabilidad respectiva a la repetitividad supone, al menos, un 75% de la variabilidad total.

En cuanto al análisis individual de cada suelo, la variabilidad máxima respectiva a la repetitividad es de 3,4 kHz en el suelo AR-BM, 5,96 kHz en el suelo AR-LP y 3,72 en el suelo ARE-LS. El valor máximo de 5,96 kHz en AR-LP es atípico, encontrándose el máximo para el resto de niveles entre 3 y 4 kHz, tal como sucede en los otros suelos.

Por su parte, los valores máximos de variabilidad referente a la reproducibilidad son de 2 kHz en AR-BM, 3,2 kHz en AR-LP y 2,04 kHz en ARE-LS. De nuevo, el

valor máximo en AR-LP es atípico y se produce para el mismo nivel de humedad que el de repetitividad. En cualquier caso, queda un valor máximo de aproximadamente 2 kHz si no se tiene en cuenta dicho dato atípico.

Como se observa, las variabilidades adquieren valores similares en los tres suelos, por lo que el comportamiento de la medida es uniforme en este aspecto.

Según los resultados obtenidos en el análisis R&R, la reproducibilidad del sensor es aceptable, presentando mayores dificultades en la repetitividad. No obstante, la repetición de la medida lleva finalmente a un valor medio que se asemeja entre sensores. Por lo tanto, el error de repetitividad es corregible mediante la adquisición de múltiples medidas. Cuanto mayor sea el número de medidas para un mismo nivel de humedad, mayor representatividad ofrecerá el valor medio de las mismas.

6.3 Obtención de la curva de ajuste del sensor

Una vez analizada la variabilidad de la respuesta del sensor y del proceso de medición, se trata de obtener la curva de calibración que relacione la salida del sensor con el nivel de humedad del suelo. El objetivo es obtener una expresión válida para todos los sensores de la misma familia en cada suelo.

Tras el análisis de la varianza se ha concluido que ambos sensores son semejantes en cuanto a los valores medios que ofrecen. Con el fin de obtener una expresión promedio de ambos y, dado que sus medias son similares, se opta por agrupar las medidas de ambos como si de un solo sensor se tratase.

De este modo, se ha procedido al ajuste de los valores obtenidos por ambos sensores. Para tal fin, se han evaluado diferentes tipos de expresiones tratando de encontrar aquella que mejor se ajustase a los valores medidos. A continuación se presentan los casos estudiados más relevantes.

Se inicia el estudio con el suelo AR-LP, por ser el más representativo en cuanto a número de puntos disponibles.

En primer lugar, se tantea el ajuste con curvas polinómicas.

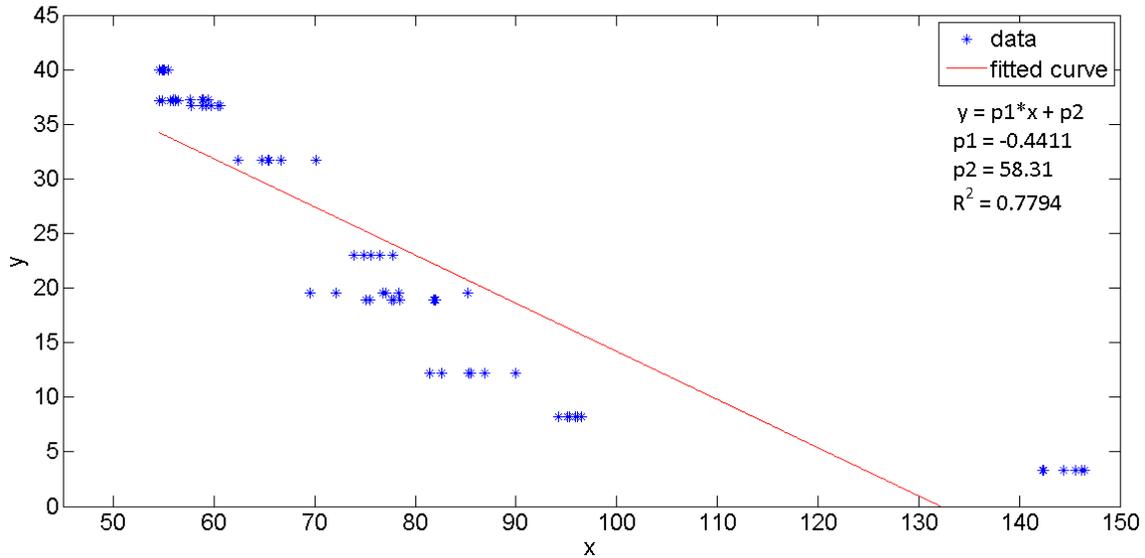


Figura 6-10. Ajuste polinómico grado 1 en suelo AR-LP.

La curva polinómica de grado 1, es decir la representada por una línea recta, no consigue un buen ajuste, ya que el comportamiento del sensor es asintótico cuando se acerca a los niveles bajos de humedad. No obstante, se podría analizar el comportamiento lineal del sensor para un rango de humedad determinado, ya que a partir del 10% VWC y hasta la saturación, se aprecia una tendencia lineal de las medidas.

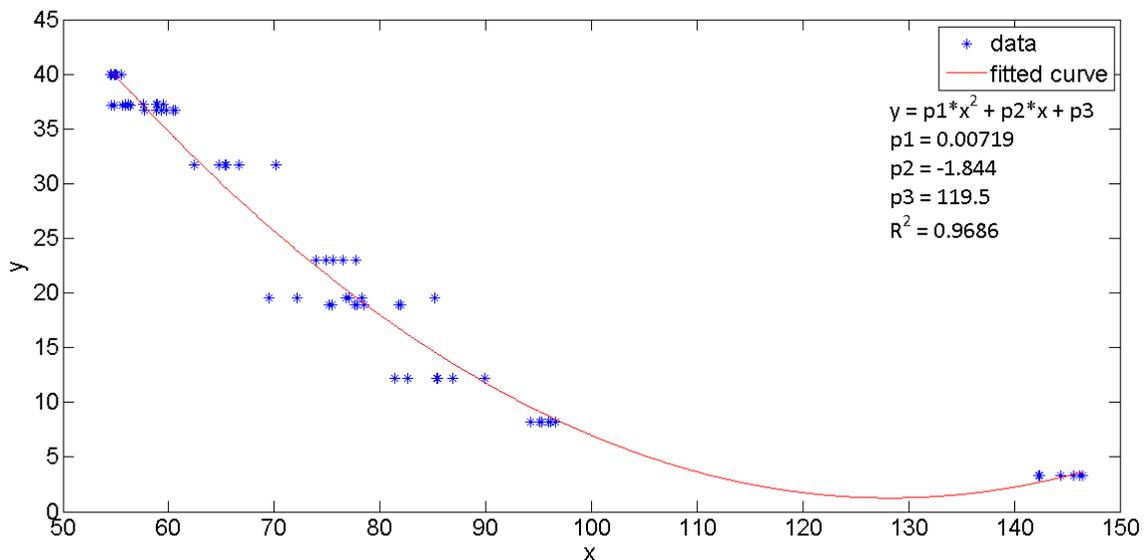


Figura 6-11. Ajuste polinómico grado 2 en suelo AR-LP.

Al aumentar el grado del polinomio, el ajuste conseguido es mucho mejor, tal como se observa en la Figura 6-11, donde se ha implementado un ajuste polinómico de segundo grado. En este caso se consigue un R^2 bastante elevado (0,9686). A medida que aumenta el grado del polinomio su ajuste a los datos medidos se optimiza. Sin embargo, la curva adquiere formas poco realistas en aquellos espacios del gráfico donde no se

tienen medidas. Esto mismo se puede observar en la Figura 6-11, donde para el rango de frecuencia (eje X) entre 110 y 140 kHz, la curva presenta un mínimo y seguidamente crece hasta llegar a la frecuencia de $\approx 245\text{kHz}$.

Cambiando de familia de curvas, la prueba con una expresión exponencial da un resultado bastante satisfactorio. El comportamiento de la curva es asintótico, tal como se demanda, y presenta un buen ajuste a los datos obtenidos. El valor del indicador de ajuste es, en este caso, $R^2 = 0,9593$.

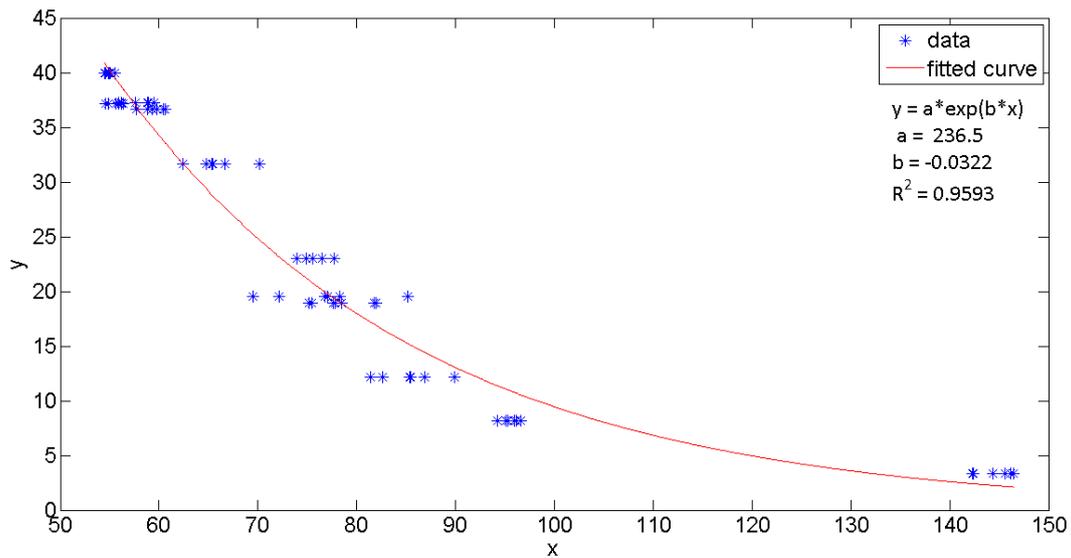


Figura 6-12. Ajuste exponencial en suelo AR-LP.

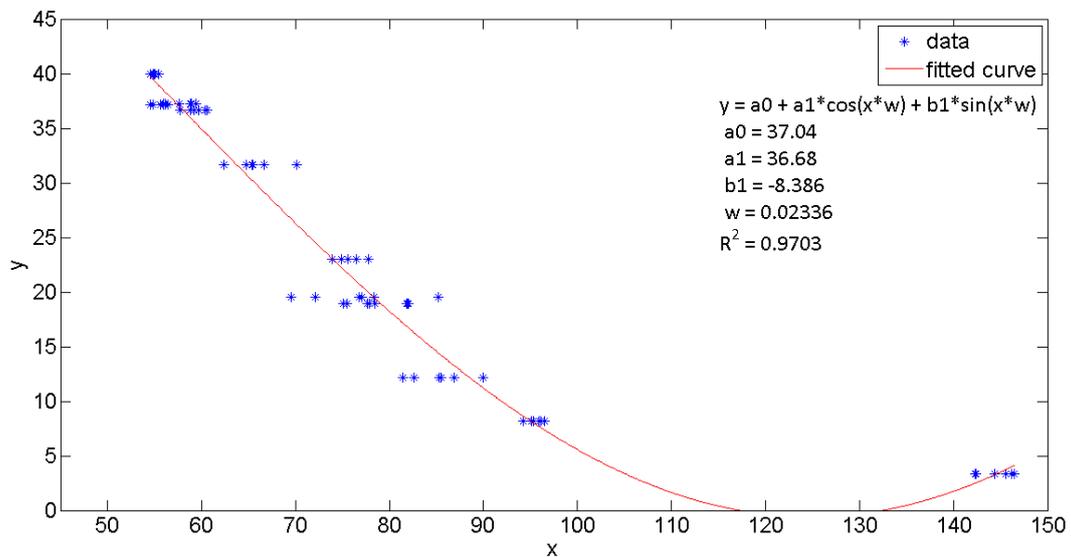


Figura 6-13. Ajuste Fourier en suelo AR-LP.

Por su parte, la aproximación de Fourier ofrece un resultado similar al conseguido con el polinomio de segundo grado, aunque con una mayor deformación entre los 110 y los 140 kHz y un mejor ajuste por encima del 10% VWC. Como

consecuencia, el valor de R^2 (0,9703) es superior al conseguido con el polinomio de segundo grado. Sin embargo, este ajuste sigue presentando el inconveniente ya citado si se quisiera obtener una expresión válida para todo el rango de medida del sensor.

Otro de los ajustes estudiados es el ajuste racional, mostrado en la Figura 6-14. El resultado obtenido es muy parecido al logrado con el ajuste exponencial, aunque con un R^2 ligeramente inferior. Además, se obtiene una mayor pendiente a niveles bajos de humedad, lo que lleva a aumentar la sensibilidad, pero a restar exactitud en estos niveles.

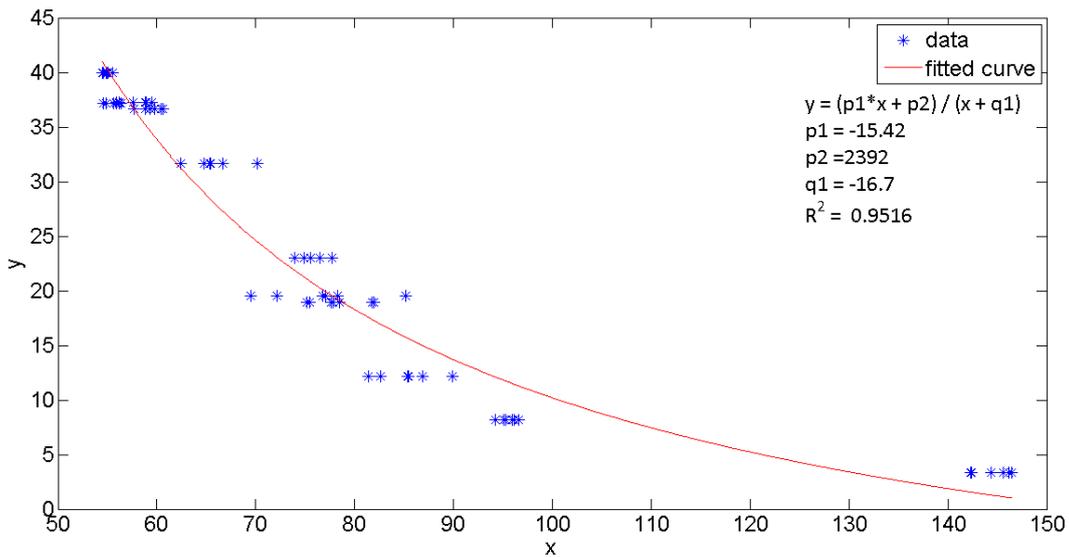


Figura 6-14. Ajuste racional en suelo AR-LP.

La última de las curvas analizadas es la curva potencial. Su comportamiento se asemeja al obtenido con la exponencial y con la racional, pero la bondad del ajuste no es suficiente como para considerarla una opción frente a las otras dos.

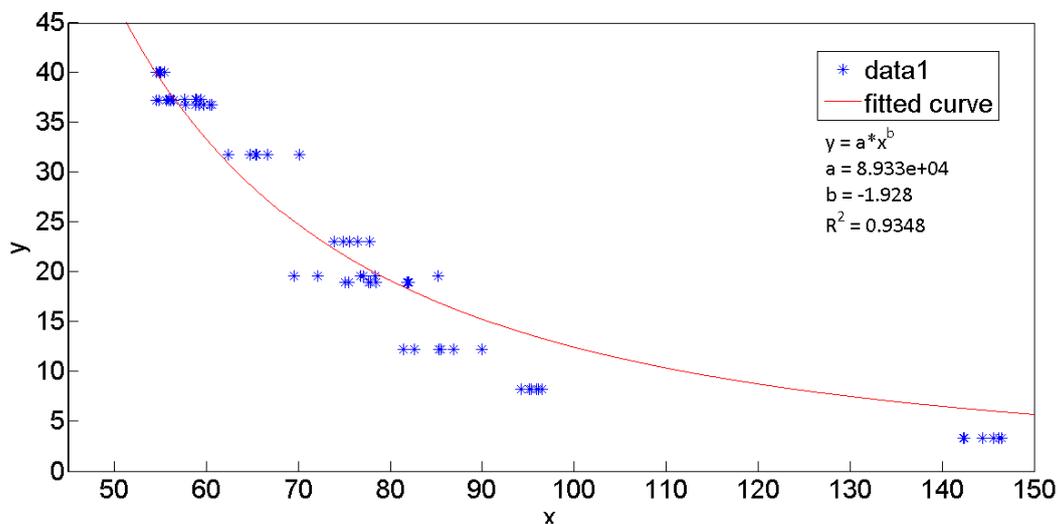


Figura 6-15. Ajuste potencial en suelo AR-LP.

La última de las curvas analizadas es la curva potencial. Su comportamiento se asemeja al obtenido con la exponencial y con la racional, pero la bondad del ajuste no es suficiente como para considerarla una opción frente a las otras dos.

Finalmente, se decide adoptar la curva exponencial como curva de ajuste del sensor para el suelo AR-LP, ya que presenta una forma adecuada al comportamiento del dispositivo y, en dichas condiciones, es la que se ajusta mejor a los datos obtenidos en los ensayos, con un $R^2 = 0,9593$.

En la Figura 6-16 se presenta el ajuste exponencial, acompañado de dos curvas que representan los límites de predicción para un intervalo de confianza del 95%, quedando únicamente dos datos fuera de estos límites.

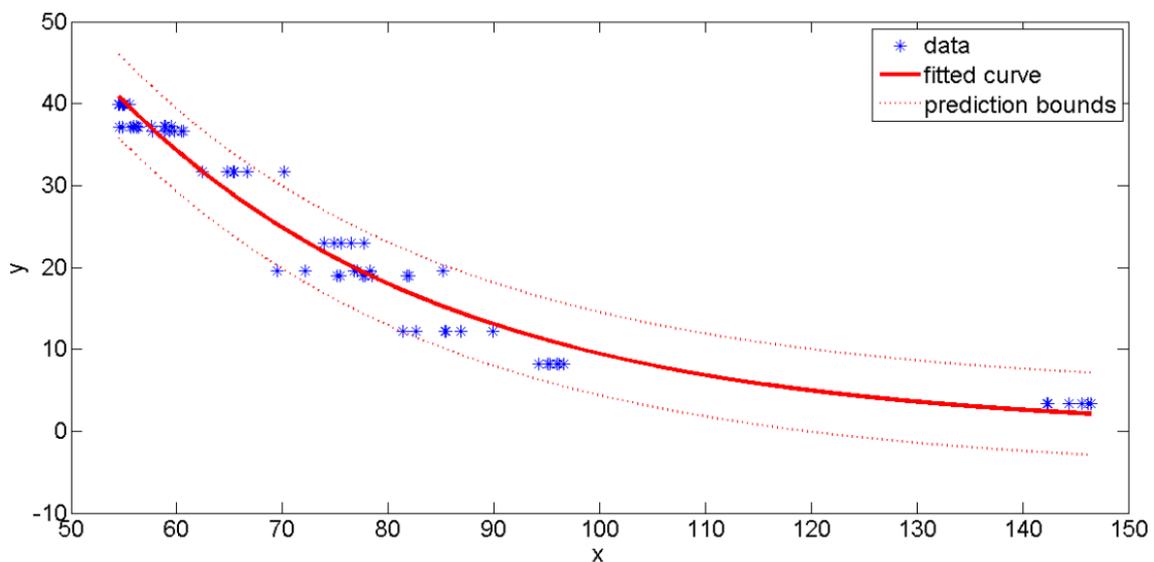


Figura 6-16. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo AR-LP.

La expresión para la curva de ajuste es:

$$y_{fit} = 236,5 \cdot e^{-0,0322 \cdot x} \tag{6-9}$$

Los estadísticos que cuantifican la bondad del ajuste son:

Tabla 6-26. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo AR-LP.

SSE	R^2	dfe	$R^2_{ajustado}$	RMSE
413,6101	0,9593	66	0,9587	2,5034

- SSE es la suma de cuadrados debido al error.
- R^2 es el coeficiente de determinación.
- dfe son los grados de libertad del error.
- $R^2_{ajustado}$ es el coeficiente de determinación ajustado.

- RMSE es la raíz cuadrada del error cuadrático medio.

Tras analizar la distancia entre los límites de predicción, se obtiene un valor máximo entre límites de 10,2638 en el eje y, es decir, una distancia de 10,2638% VWC. Por tanto, se puede adoptar la mitad de esta diferencia como la falta de exactitud máxima que se va a tener en la medida. De esta manera, la exactitud de la medida será de $\pm 5,1319\%$ VWC.

En cuanto a los otros dos suelos, el mejor ajuste se consigue también con la curva exponencial, presentándose, a continuación, sus respectivas ecuaciones de calibración y parámetros de bondad de ajuste.

Modelo de calibración para el suelo AR-BM

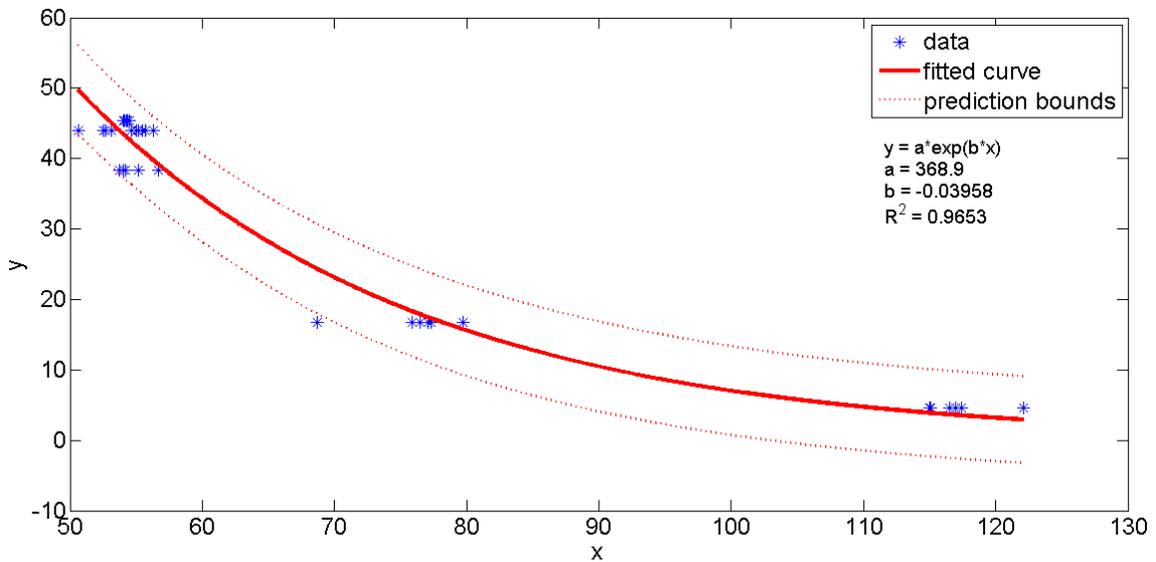


Figura 6-17. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo AR-BM.

$$VWC (\%) = 368,9 \cdot e^{-0,03958 \cdot x (kHz)} \tag{6-10}$$

$$Exactitud = \pm 6,43 \% VWC$$

Rango de densidad aparente del suelo: 1,3 – 1,6 g/cm³.

Bondad del ajuste:

Tabla 6-27. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo AR-BM.

SSE	R ²	dfe	R ² _{ajustado}	RMSE
321,9063	0,9653	36	0,9644	2,9903

Modelo de calibración para el suelo AR-LP

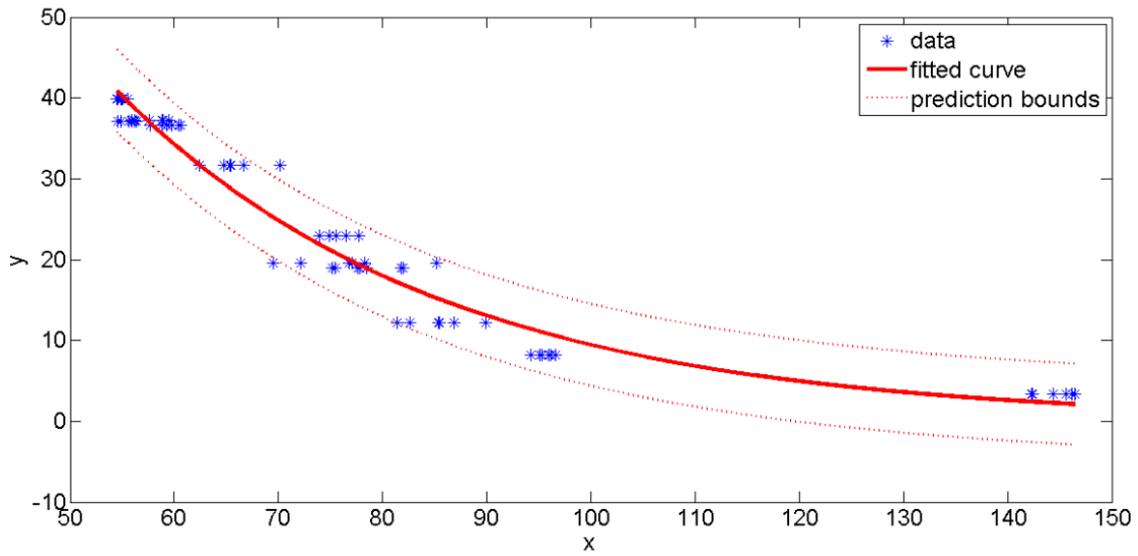


Figura 6-18. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo AR-LP.

$$\text{VWC (\%)} = 236,5 \cdot e^{-0,0322 \cdot x \text{ (kHz)}} \tag{6-11}$$

$$\text{Exactitud} = \pm 5,13 \% \text{ VWC}$$

Rango de densidad aparente del suelo: 1,2 – 1,6 g/cm³.

Bondad del ajuste:

Tabla 6-28. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo AR-LP.

SSE	R ²	dfe	R ² _{ajustado}	RMSE
413,6101	0,9593	66	0,9587	2,5034

Modelo de calibración para el suelo ARE-LS

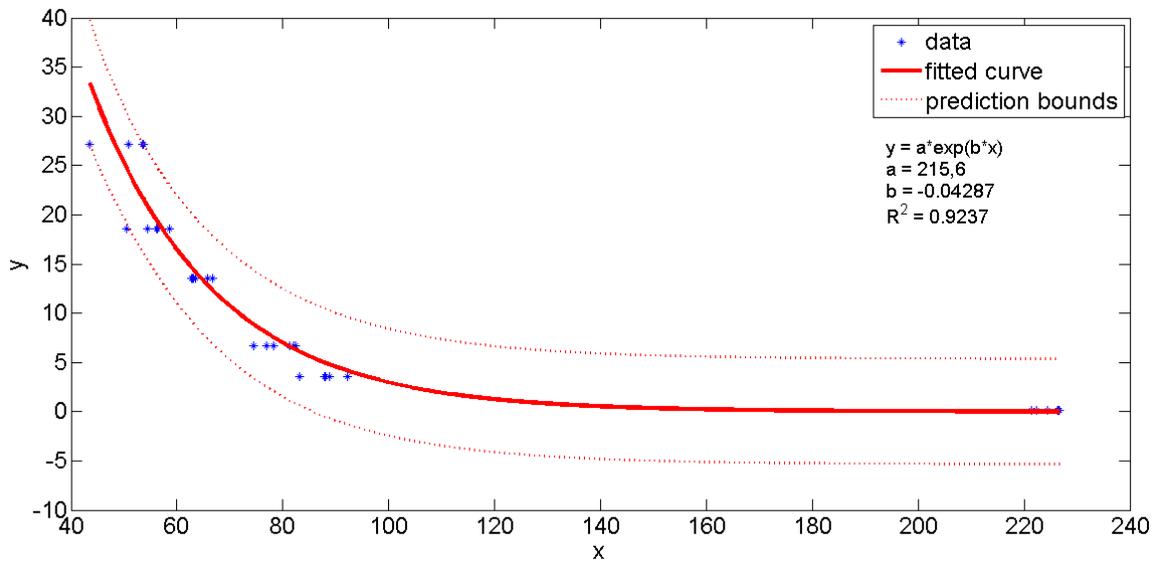


Figura 6-19. Ajuste exponencial con límites de predicción en suelo ARE-LS.

$$VWC (\%) = 215,6 \cdot e^{-0,04287 \cdot x \text{ (kHz)}} \tag{6-12}$$

$$Exactitud = \pm 5,62 \% VWC$$

Rango de densidad aparente del suelo: 1,5 – 1,7 g/cm³.

Bondad del ajuste:

Tabla 6-29. Estadísticos de la bondad del ajuste de la curva exponencial en el suelo ARE-LS.

SSE	R ²	dfe	R ² _{ajustado}	RMSE
235,4825	0,9237	34	0,9215	2,6317

De esta forma, quedan definidos las ecuaciones de calibración y los valores de exactitud para los sensores experimentales Arifrut en tres tipos de suelo diferentes. Los sensores presentan una falta de exactitud notable, presentando la medida realizada con los mismos una variabilidad de, al menos, ±5% VWC. Se ha comprobado que si se realiza el ajuste con los valores medios obtenidos para cada nivel de humedad, su exactitud aumenta, aunque solo ligeramente.

6.4 Caracterización del sensor comercial 10HS

El sensor 10HS se ha ensayado a la vez que los sensores Arifrut1 y Arifrut2 con el objetivo de comparar el comportamiento entre ellos. Esto ha servido, además, para disponer de una colección de medidas con las que evaluar la ecuación de calibración aportada por el fabricante del sensor comercial.

6.4.1 Comparación entre el sensor 10HS y el sensor Arifrut

En primer lugar, debe tenerse en cuenta que el sensor 10HS presenta una salida en tensión, mientras que el sensor Arifrut lo hace en frecuencia. Esto implica que las escalas de salida sean diferentes. Además, la monotonía de salida de ambos es inversa debido a su diseño, es decir, el sensor Arifrut obtiene valores de frecuencia más bajos a medida que aumenta el contenido de humedad del suelo, mientras que el sensor 10HS obtiene valores de tensión más altos a medida que aumenta la humedad. De esta forma, antes de realizar la comparación entre sus medidas es necesario normalizarlas.

La normalización de la medida del sensor Arifrut para quedar a la escala del 10HS se realiza en base a la siguiente expresión:

$$f_{norm} = \frac{1}{f_j} \cdot \frac{|V_{sat} - V_{seco}|}{\frac{1}{|f_{sat} - f_{seco}|}} \quad (6-13)$$

donde,

f_{norm} es la frecuencia normalizada del sensor Arifrut.

f_j es la frecuencia medida por el sensor Arifrut en el ensayo j.

V_{sat} es la tensión medida por el sensor 10HS en suelo saturado.

V_{seco} es la tensión medida por el sensor 10HS en suelo seco.

f_{sat} es la frecuencia medida por el sensor Arifrut en suelo saturado.

f_{seco} es la frecuencia medida por el sensor Arifrut en suelo seco.

Tras llevar a cabo la normalización de las frecuencias convirtiéndolas en valores equivalentes de tensión, se representa los valores medios obtenidos por los sensores Arifrut1 y 10HS en los tres suelos ensayados.

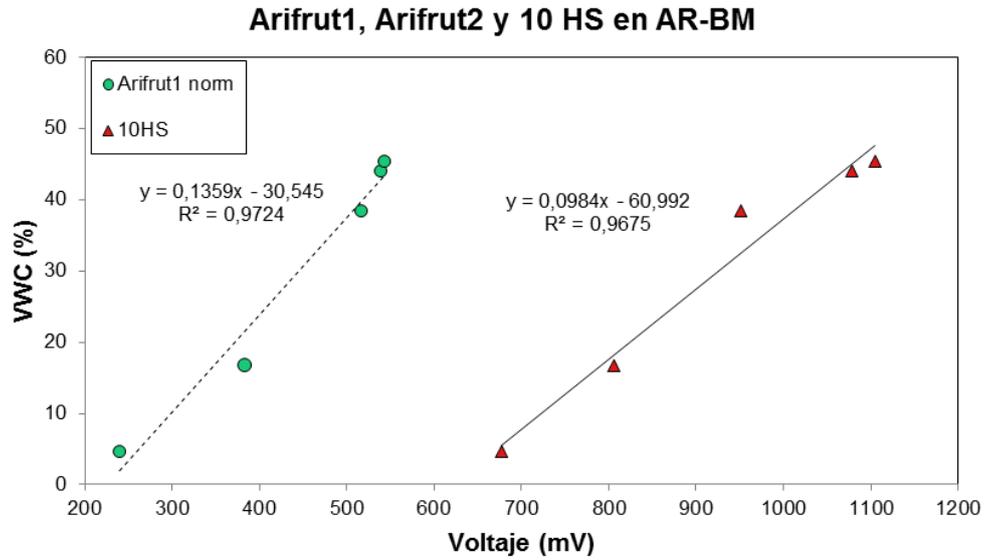


Figura 6-20. Comparación de valores medios entre los sensores Arifrut1 y 10HS en el suelo AR-BM.

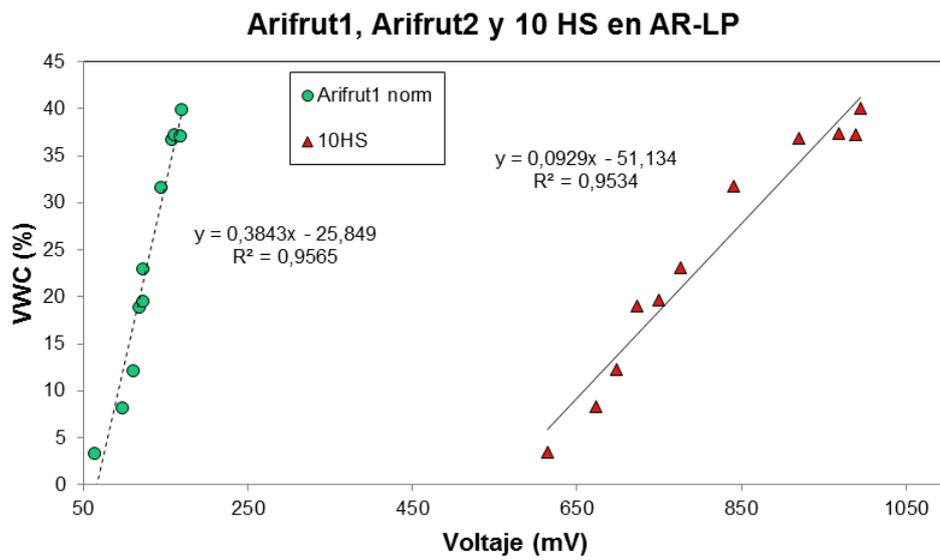


Figura 6-21. Comparación de valores medios entre los sensores Arifrut1 y 10HS en el suelo AR-LP.

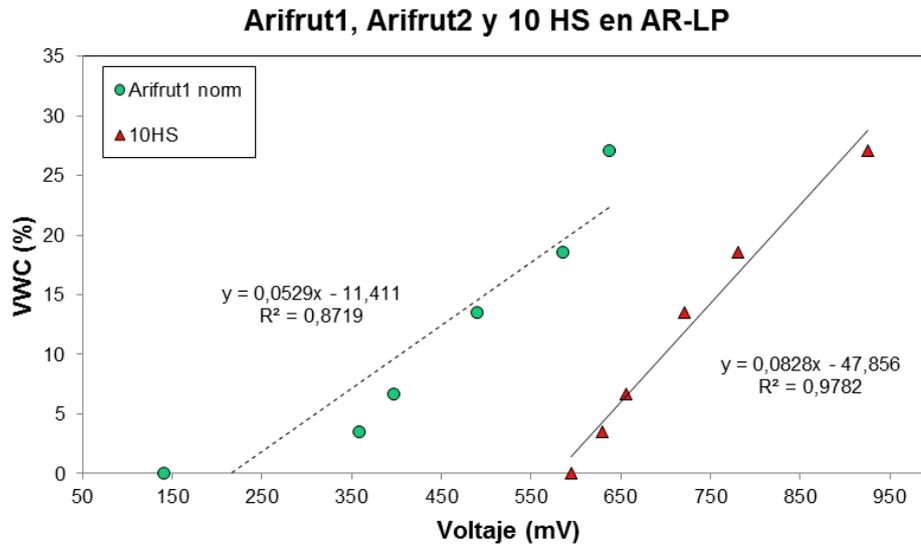


Figura 6-22. Comparación de valores medios entre los sensores Arifrut1 y 10HS en el suelo ARE-LS.

Tal como se observa en las figuras, la normalización de la frecuencia del sensor Arifrut lleva a poder aproximar su comportamiento a una expresión lineal en los suelos arcillosos, y no tanto en el suelo arenoso. Esto ha permitido comparar su comportamiento con respecto al 10HS. Las tendencias de ambos son diferentes en cada caso y presentan rangos de trabajo de tensión, en el caso del 10HS, y de tensión equivalente en el caso del Arifrut1, bastante separados por un offset. Lo importante de este análisis es comprobar que el sensor experimental desarrollado evoluciona de manera similar a como lo hace un sensor comercial.

6.4.2 Evaluación de la ecuación de calibración del fabricante

En el manual del sensor 10HS se ofrece una ecuación de calibración estándar para suelos minerales en general. Con esta ecuación, el fabricante asegura una exactitud en la medida de, al menos, $\pm 3\%$ WWC. El objetivo de este apartado es verificar dicha afirmación en base a los datos registrados en los ensayos.

La expresión estándar que relaciona el contenido volumétrico de agua en el suelo y la tensión de salida del sensor, según el fabricante, es:

$$WVC (\%) = 100 \cdot (2,97 \cdot 10^{-9} \cdot mV^3 - 7,37 \cdot 10^{-6} \cdot mV^2 + 6,69 \cdot 10^{-3} \cdot mV - 1,92) \tag{6-14}$$

Si se representan los puntos obtenidos teóricamente, es decir, con la ecuación proporcionada por el fabricante, y los obtenidos de forma empírica, se tiene:

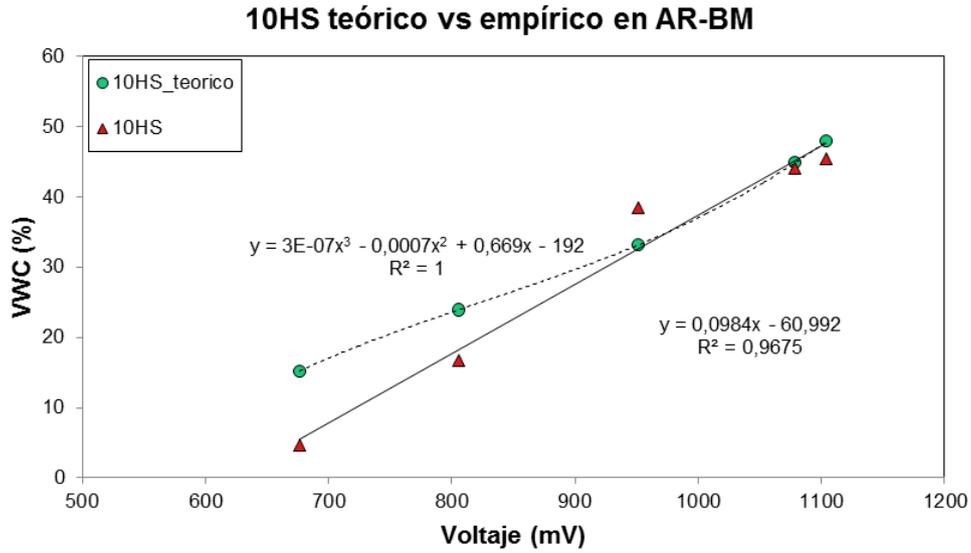


Figura 6-23. Comparación medidas teóricas y empíricas de VWC con el sensor 10HS en el suelo AR-BM.

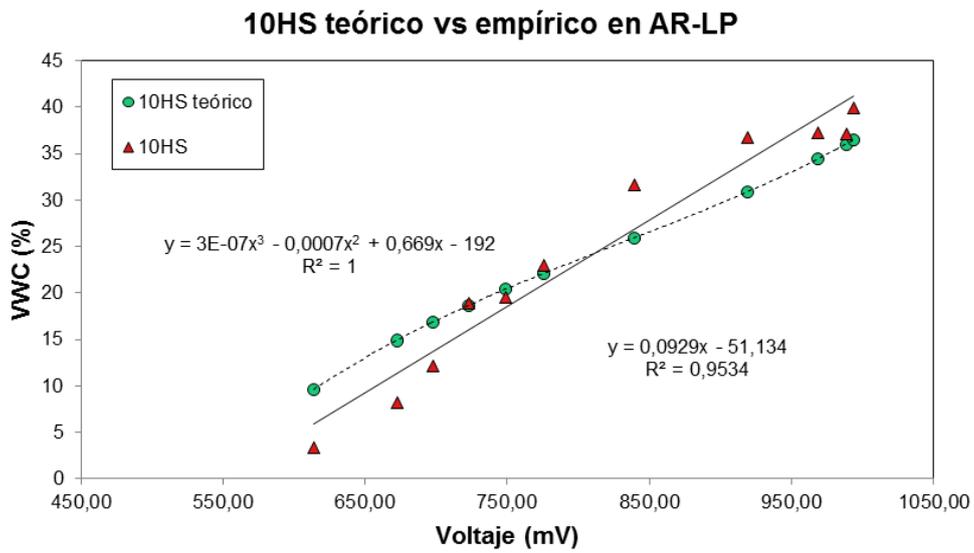


Figura 6-24. Comparación medidas teóricas y empíricas de VWC con el sensor 10HS en el suelo AR-LP.

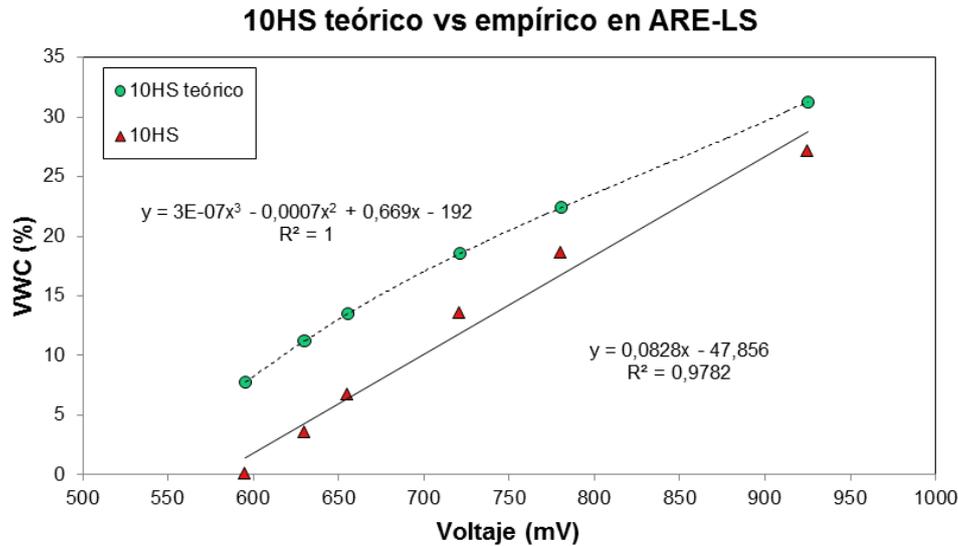


Figura 6-25. Comparación medidas teóricas y empíricas de VWC con el sensor 10HS en el suelo ARE-LS.

En los tres suelos se presenta una notable desviación entre el contenido de humedad obtenido mediante el método gravimétrico y el calculado a partir de la ecuación proporcionada por el fabricante. En el suelo AR-BM la diferencia queda marcada a niveles de humedad bajos. En el caso del suelo AR-LP, la distribución de las diferencias entre los dos métodos es máxima en los extremos del rango medido. Por su parte, en el suelo ARE-LS se presenta un alejamiento permanente entre ambos métodos.

Analizando los valores de las diferencias entre la humedad medida con el método gravimétrico y la obtenida a partir de la ecuación del 10HS, en la mayoría de los casos se supera la variabilidad límite marcada por el valor de exactitud proporcionado por el fabricante ($\pm 3\%$ VWC).

Por otro lado, el fabricante recomienda realizar una calibración específica del sensor para mejorar la exactitud conseguida. Con ello, se asegura en el manual del dispositivo que dicha exactitud debería resultar del ± 1 al $\pm 2\%$ VWC.

La calibración específica es la conseguida a partir de los datos empíricos de VWC obtenidos mediante el método termo-gravimétrico. En las figuras Figura 6-23, 6-24 y Figura 6-25, las medias de los datos empíricos del 10HS se ajustan a una ecuación lineal o polinómica de primer grado, únicamente con el objetivo de ilustrar la diferencia entre ambos métodos de medida comparados. Se realiza ahora un ajuste más fino para el sensor 10HS, teniendo en cuenta todos los datos medidos y no solo sus valores promedio. La curva de ajuste seleccionada es una polinómica de tercer grado, al igual que la curva estándar proporcionada por el fabricante.

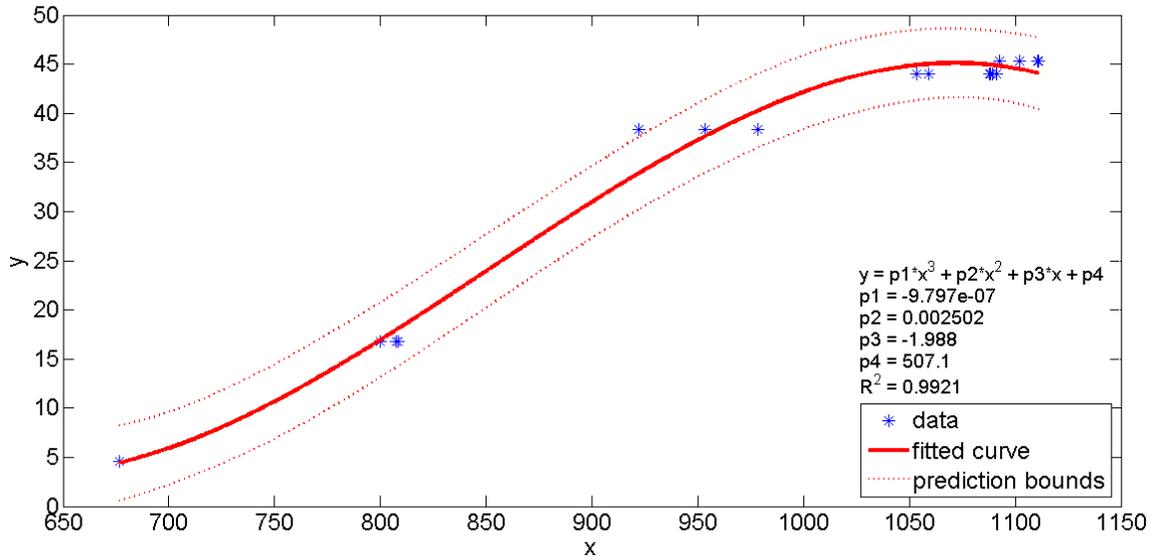


Figura 6-26. Ajuste polinómico grado 3 del sensor 10HS con límites de predicción en suelo AR-BM.

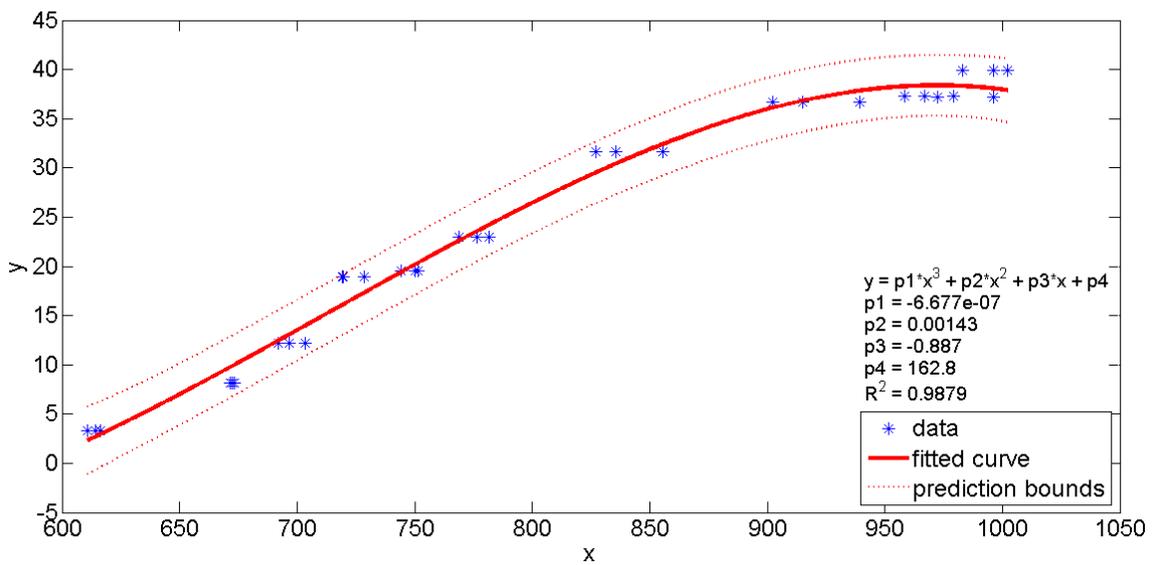


Figura 6-27. Ajuste polinómico grado 3 del sensor 10HS con límites de predicción en suelo AR-LP.

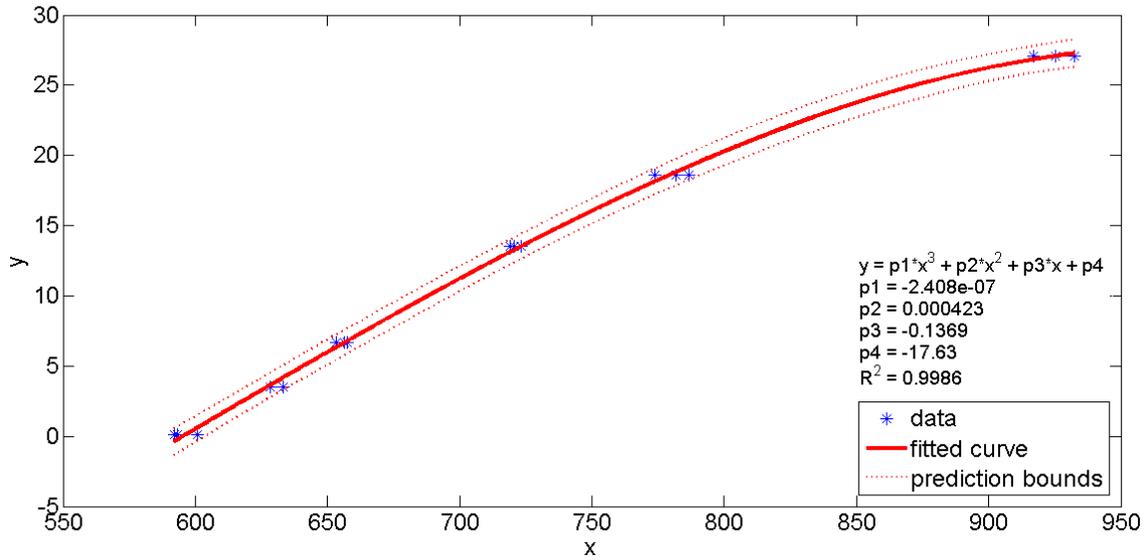


Figura 6-28. Ajuste polinómico grado 3 del sensor 10HS con límites de predicción en suelo ARE-LS.

En los tres suelos ensayados se logra un buen ajuste, excelente en el caso del suelo ARE-LS con un R^2 de casi la unidad.

Se muestra a continuación el resumen de los resultados del ajuste de calibración del sensor 10HS.

Modelo de calibración para el suelo AR-BM

$$VWC (\%) = -9,797 \cdot 10^{-7} \cdot mV^3 + 0,002502 \cdot mV^2 - 1,988 \cdot mV + 507,1 \quad (6-15)$$

$$Exactitud = \pm 3,84 \% VWC$$

Rango de densidad aparente del suelo: 1,3 – 1,6 g/cm³.

Bondad del ajuste:

Tabla 6-30. Estadísticos de la bondad del ajuste del sensor 10HS en el suelo AR-BM.

SSE	R ²	dfe	R ² _{ajustado}	RMSE
36,6323	0,9921	15	0,9905	1,5627

Modelo de calibración para el suelo AR-LP

$$VWC (\%) = -6,677 \cdot 10^{-7} \cdot mV^3 + 0,00143 \cdot mV^2 - 0,887 \cdot mV + 162,8 \quad (6-16)$$

$$Exactitud = \pm 3,42 \% VWC$$

Rango de densidad aparente del suelo: 1,2 – 1,6 g/cm³.

Bondad del ajuste:

Tabla 6-31. Estadísticos de la bondad del ajuste del sensor 10HS en el suelo AR-LP.

SSE	R ²	dfc	R ² _{ajustado}	RMSE
61,0341	0,9879	29	0,9867	1,4507

Modelo de calibración para el suelo ARE-LS

$$VWC (\%) = -2,408 \cdot 10^{-7} \cdot mV^3 + 0,000423 \cdot mV^2 - 0,1369 \cdot mV - 17,63 \quad (6-17)$$

$$Exactitud = \pm 0,99 \% VWC$$

Rango de densidad aparente del suelo: 1,5 – 1,7 g/cm³.

Bondad del ajuste:

Tabla 6-32. Estadísticos de la bondad del ajuste del sensor 10HS en el suelo ARE-LS.

SSE	R ²	dfc	R ² _{ajustado}	RMSE
2,1152	0,9986	14	0,9983	0,3887

De esta forma, quedan definidos las ecuaciones de calibración y los valores de exactitud para el sensor 10HS en tres tipos de suelo diferentes. La exactitud del sensor únicamente cumple la especificación del fabricante en el suelo arenoso. En los suelos arcillosos, según los datos obtenidos, la variabilidad de las medidas predichas es superior a ±3% VWC.

7 CONCLUSIONES

Los objetivos principales del trabajo eran: proporcionar un diseño alternativo de un sensor capacitivo de bajo coste para la medida del contenido volumétrico de agua en el suelo y llevar a cabo la calibración del mismo. Como objetivos secundarios se establecían la extensión de la calibración a diferentes tipos de suelo y la identificación de aspectos mejorables en el diseño del sensor y la experimentación.

En este sentido, el diseño de un nuevo sensor de medida del contenido de humedad en el suelo ha sido desarrollado. Su coste, sumando el de todos los componentes electrónicos que lo forman, es inferior a 3€. El diseño del sensor consta inicialmente de tres bloques diferenciados: bloque sensor, bloque de filtrado y bloque sustractor. Tras el desarrollo de la primera etapa de experimentación, se considera que los bloques de filtrado y sustractor afectan a la operatividad del sensor, anulando prácticamente su sensibilidad al cambio de humedad en el suelo. Dado que el bloque sensor genera por sí mismo una salida medible, se decide prescindir de los bloques de filtrado y sustractor, cuyo rediseño se abordará en trabajos futuros. De esta manera se cumple con el primer objetivo principal planteado.

Por otra parte, el sensor diseñado se ha sometido a un proceso de calibración, donde su respuesta se ha relacionado con su correspondiente valor de contenido de humedad en el suelo, cumpliendo con el segundo objetivo principal del trabajo. La calibración se ha llevado a cabo para tres suelos diferentes: dos de ellos franco-arcillosos y el restante arenoso. Se ha obtenido una curva de calibración para cada suelo, variando la exactitud de la medida entre ellos. Tras analizar diferentes tipos de curva de ajuste, se opta finalmente por un modelo exponencial, que responde de forma realista a al comportamiento del sensor, logrando un buen ajuste de los datos medidos. Los valores de R^2 conseguidos en el ajuste para cada suelo se encuentran por encima de 0,9, siendo 0,92 el valor más bajo, el cual se da para el suelo arenoso.

Las diferentes medidas llevadas a cabo han permitido analizar la repetitividad y la reproducibilidad del sensor desarrollado. Mediante el test ANOVA de un factor se ha demostrado la semejanza entre los valores medios medidos por dos sensores similares, quedando patente la reproducibilidad del dispositivo. Por su parte, la repetitividad conseguida no es tan buena, presentando uno de los sensores experimentales mayor variabilidad entre medidas consecutivas que el otro. La variabilidad con respecto a la repetitividad del sensor se ha cifrado en un valor de entre 3 y 4 kHz.

Asimismo, se ha cuantificado la exactitud del sensor en cada suelo, situándose ésta, en general, entre el ± 5 y el $\pm 6\%$ VWC, dependiendo del tipo de suelo. La exactitud del sensor es, por tanto, inferior a la proporcionada por los sensores comerciales analizados en el estado del arte, siendo ésta, en el peor, de los casos de $\pm 3\%$ VWC, según las hojas de características. En este sentido, se deduce que el sensor desarrollado no es suficientemente competitivo en comparación con los modelos encontrados en el

mercado si sólo se tienen en cuenta las prestaciones técnicas. Sin embargo, su ínfimo coste equilibra esta diferencia de prestaciones, dependiendo de las necesidades.

En la línea de lo descrito en el final del párrafo anterior, tras caracterizar el comportamiento de un sensor comercial de referencia, como es el Decagon ECH₂O 10HS, y comprobar que su trazabilidad se puede asemejar a la del sensor desarrollado, se observa que el dispositivo comercial ensayado no cumple totalmente con las prestaciones de exactitud proporcionadas por el fabricante. Por un lado, la ecuación general de calibración estándar para suelos minerales varía con respecto a la obtenida por el método gravimétrico, en cantidades superiores al $\pm 3\%$ VWC asegurado por el fabricante. Y por otro lado, la expresión de calibración obtenida de manera específica para cada suelo presenta, en dos de los suelos estudiados, una exactitud fuera del límite especificado en la hoja de características del sensor. No obstante, se debe tener en cuenta que las medidas se han realizado en unos determinados rangos de compactación del suelo, es decir, no se ha mantenido un valor totalmente constante entre los ensayos. Por este motivo, no se puede afirmar con total seguridad la falta de veracidad de las especificaciones aportadas por el fabricante.

De esta forma, se llega a la consecución de todos los objetivos propuestos.

7.1 Trabajos futuros

A raíz de las conclusiones obtenidas, se plantean algunas líneas de actuación y recomendaciones para trabajos futuros.

Por un lado, debe mejorarse el protocolo de calibración seguido, en el sentido de tratar de obtener una compactación del suelo lo más uniforme posible entre ensayos. Por su parte, en caso de darse la aplicación del sensor para valores de humedad superiores al 5%, en general, sería interesante analizar el comportamiento lineal de su respuesta en este rango, cabiendo la posibilidad de obtener un mejor ajuste que el conseguido con la curva exponencial en todo su rango de medida. A su vez, queda pendiente el rediseño de los bloques de filtrado y sustractor, así como la implementación de un protocolo de comunicación SDI-12 y la definición del sistema de aislamiento definitivo de la circuitería del sensor. Por otro lado, durante los ensayos se ha observado una cierta histéresis en la respuesta del sensor, la cual puede estar influenciada por la temperatura del suelo. Resultaría provechoso llevar a cabo un estudio que determinase la influencia de la temperatura del suelo en el comportamiento del sensor.

Una de las líneas más interesantes a desarrollar, sin embargo, es el estudio de la influencia de las características geométricas del sensor. El trabajo con el analizador de impedancias ha llevado a observar ciertas diferencias de comportamiento en la medida dieléctrica, en función del material, longitud, sección o separación de los

electrodos. El estudio bibliográfico no refleja, apenas, aportes en este aspecto. Por ello, se considera un campo sustancioso a la hora de dirigir las siguientes investigaciones.

Por último, tras haber obtenido el modelo de ajuste del sensor desarrollado, se pretende llevar a cabo su validación en campo, generando un gran número de medidas y teniendo como referencia sensores de gran exactitud.

BIBLIOGRAFÍA

- Agüera Vega, J. & Pérez Ruiz, M., 2013. Agricultura de precisión: hacia la integración de datos espaciales en la producción agraria. *Ambienta: La revista del Ministerio de Medio Ambiente*, 105, pp.12–27.
- Al-Asadi, R.A. & Mouazen, A.M., 2014. Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density. *Soil and Tillage Research*, 135, pp.60–70.
- Alessi, R.S. & Prunty, L., 1986. Soil-water Determination Using Fiber Optics. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), pp.860–863.
- Alwis, L., Sun, T. & Grattan, K.T.V., 2013. Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress. *Measurement*, 46(10), pp.4052–4074.
- ASTM, 1998. ASTM D2216-98, Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *ASTM Standard Guide*.
- ASTM, 2000. ASTM D4643-00, Standard Test Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Microwave oven heating.
- ASTM, 2011. ASTM D4944-11, Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester. *ASTM International*.
- Bellingham, K., 2007. The Stevens Hydra Probe Inorganic Soil Calibrations.
- Bittelli, M., 2011. Measuring soil water content: A review. *HortTechnology*, 21(3), pp.293–300.
- Blonquist, J.M., Jones, S.B. & Robinson, D.A., 2005. A time domain transmission sensor with TDR performance characteristics. *Journal of Hydrology*, 314(1–4), pp.235–245.
- Briggs, L.J., 1897. *The mechanics of soil moisture*, Washington DC: Gov Print Office, Washington DC.
- Burbano, S., Burbano, E. & Gracia, C., 2003. *Física General* 32nd ed. S. L. Editorial Tébar, ed., Madrid.
- Calamita, G. et al., 2015. Field test of a multi-frequency electromagnetic induction sensor for soil moisture monitoring in southern Italy test sites. *Journal of Hydrology*, 529(P1).
- Campbell, G.S., 1974. A Simple Method For Determining Unsaturated Conductivity From Moisture Retention Data. *Soil Science*, 117(6), pp.311–314.
- Campbell, J.E., 1990. Dielectric Properties and Influence of Conductivity in Soils at One to Fifty Megahertz. *Soil Science Society of America Journal*, 54(2), pp.332–341.
- Campbell Scientific, 2016. CR1000 Datalogger Operator's Manual.
- Carlos, S. & Capraro, F., 2008. Control automático de riego agrícola con sensores capacitivos de humedad de suelo. Aplicaciones en vid y olivo. In *Actas de XVIII Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático (ACCA)*. Santiago, Chile.
- Chavanne, X. & Jean-Pierre, F., 2014. Presentation of a complex permittivity-meter with applications for sensing the moisture and salinity of a porous media. *Sensors (Switzerland)*, 14(9).

- Chen, H.B., Ye, L.M. & Shi, L.K., 2013. An Analysis of the Effects on Calibration Parameters of FDR for Moisture Sensor Caused by Different Kinds of Soils. *Applied Mechanics and Materials*, 401–403, pp.968–973.
- Cobos, D.R. & Chambers, C., 2010. Calibrating ECH 2 O Soil Moisture Sensors.
- Decagon Devices, 2016. 10 HS Manual.
- Dey, S., Kalansuriya, P. & Karmakar, N.C., 2015. A novel time domain reflectometry based chipless RFID soil moisture sensor. In *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, IMS 2015*.
- Dobriyal, P. et al., 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458–459, pp.110–117.
- EIP-AGRI Focus Group, 2015. *EIP-AGRI Focus Group Precision Farming - FINAL REPORT*,
- Elder, A.N. & Rasmussen, T.C., 1994. Neutron Probe Calibration in Unsaturated Tuff. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), pp.1301–1307.
- Eller, H. & Denoth, A., 1996. A capacitive soil moisture sensor. *Journal of Hydrology*, 185(1–4), pp.137–146.
- Evelt, S., 2000. Some aspects of time domain reflectometry (TDR), neutron scattering, and capacitance methods of soil water content measurement. In *International Atomic Energy Agency Symposium*. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, pp. 5–49.
- FAO, Portal de Suelos de la FAO. Available at: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/propiedades-del-suelo/propiedades-fisicas/es/> [Accessed August 21, 2017].
- FAO, 1998. *World reference base for soil resources.*, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernández, A. et al., 2016. Calibración de sensores FDR de bajo coste para la gestión del riego. Análisis y comparativa de la gestión del riego con sensores FDR comerciales. In *II Simposio Nacional de Ingeniería Hortícola*. Almería.
- Fernando, A. et al., 2007. Utilización del secado con horno microondas para la caracterización de suelos finos en Bogotá – Colombia. *Revista Épsilon N°*, 9(9), pp.129–140.
- García Martínez, D., 2016. Diseño de Sensores de Humedad de Suelo Basados en Técnicas de Reflectometría de la Frecuencia (FDR).
- Geesing, D., Bachmaier, M. & Schmidhalter, U., 2004. Field calibration of a capacitance soil water probe in heterogeneous fields. *Australian Journal of Soil Research*, 42(3), pp.289–299.
- Graciela, 2010. Locos por la Geología » Introducción a la Pedología. El suelo y la Geología. Available at: <http://www.locosporlageologia.com.ar/introduccion-a-la-pedologia-el-suelo-y-la-geologia/> [Accessed August 19, 2017].
- Hanson, B., 2009. Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation and Sensor Technology. *Vadose Zone Journal*, 8(3), p.628.
- IAEA, 2008. Field estimation of soil water content: A practical guide to methods, instrumentation and sensor technology. *Training Course Series*, 30.
- ISSS, 1929. Minutes of the first commission meetings. In Washington, D.C.: International

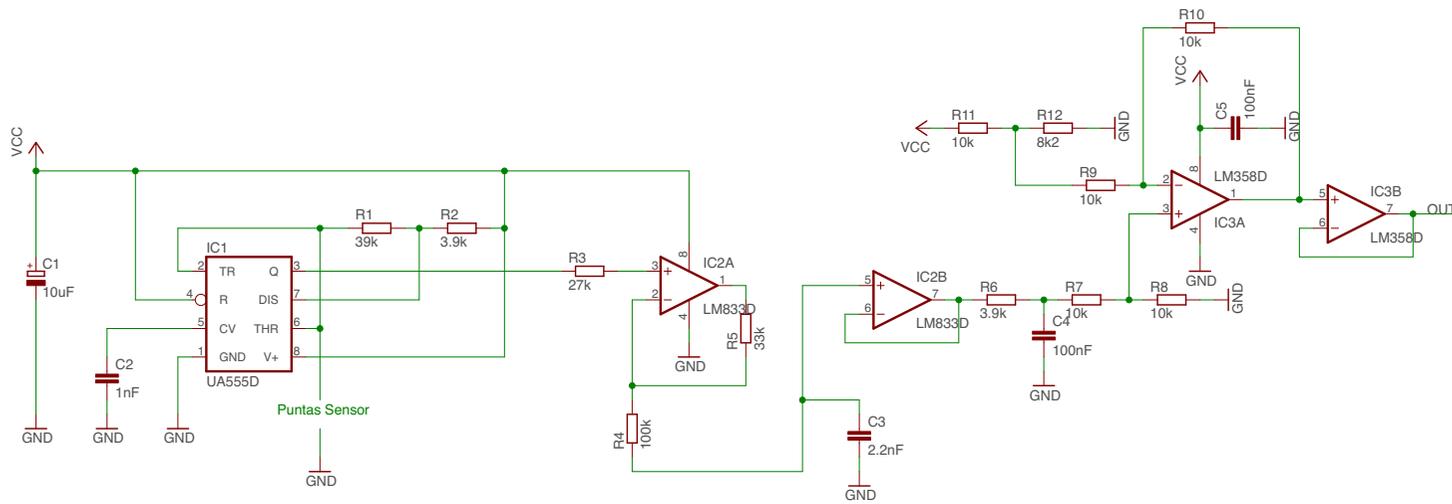
- Society of Soil Science, pp. 215–220.
- Jackson, T. et al., 2008. Measuring soil temperature and moisture using wireless MEMS sensors. *Measurement*, 41(4), pp.381–390.
- Jarvis, N.J. & Leeds-Harrison, P.B., 1987. Some problems associated with the use of the neutron probe in swelling/shrinkling clay soils. *Journal of Soil Science*, 38(1), pp.149–156.
- Jenny, H., 1994. *Factors of soil formation : a system of quantitative pedology*, Dover.
- Jordán López, A., 2005. *MANUAL DE EDAFOLOGÍA*, Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Kaleita, A.L., Tian, L.F. & Hirschi, M.C., 2005. Relationship between soil moisture content and soil surface reflectance. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 48(5), pp.1979–1986.
- Kargas, G. & Soulis, K.X., 2011. Performance analysis and calibration of a new low-cost capacitance soil moisture sensor. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(7), pp.632–641.
- Kodikara, J. et al., 2014. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(3), pp.332–345.
- Kojima, Y. et al., 2016. Low-Cost Soil Moisture Profile Probe Using Thin-Film Capacitors and a Capacitive Touch Sensor. *Sensors*, 16(8), p.1292.
- Letey, J., 1958. Relationship between Soil Physical Properties and Crop Production. In *Advances in Soil Science, vol 1*. New York: Springer, New York, NY, pp. 277–294.
- Li, J., Smith, D.W. & Fityus, S.G., 2003. The effect of a gap between the access tube and the soil during neutron probe measurements. *Australian Journal of Soil Research*, 41(1), pp.151–164.
- Liu, J. et al., 2008. Polymer-based microsensor for soil moisture measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 129(2), pp.599–604.
- Mahan, J.R. et al., 2010. Field performance in agricultural settings of a wireless temperature monitoring system based on a low-cost infrared sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(2), pp.176–181.
- Mander, G. & Arora, M., 2014. Design of capacitive sensor for monitoring moisture content of soil and analysis of analog voltage with variability in moisture. In *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*. Chandigarh, India: IEEE, pp. 1–5.
- Manuel Gisbert Blanquer, J., Ibáñez, S. & Moreno-Ramón, H., 2010. La textura del suelo.
- Martin, E.C., 2014. *Methods of Measuring for Irrigation Scheduling - WHEN*, Arizona: College of Agriculture and Life Sciences, University of Arizona (Tucson, AZ).
- Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España, 2016. *Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015-2021: Anejo 03. Usos y demandas*, España.
- Mitchell, J.K. & Arulanandan, K., 1968. Electrical Dispersion in Relation to Soil Structure. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 94(2), pp.447–472.
- Mittelbach, H., Lehner, I. & Seneviratne, S.I., 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 430–431, pp.39–49.

- Muñoz-Carpena, R., Shukla, S. & Morgan, K., 2004. Field devices for monitoring soil water content. *University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS*.
- Muzás Labad, F., 2007. *Mecánica del suelo y cimentaciones*, Fundación Escuela de la Edificación.
- Oates, M. et al., 2016. Temperature compensation in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. *Agricultural Water Management*.
- Ojo, E.R. et al., 2015. Calibration and Evaluation of a Frequency Domain Reflectometry Sensor for Real-Time Soil Moisture Monitoring. *Vadose Zone Journal*, 14(3).
- Pansu, M., Gautheyrou, J. & Loyer, J.Y., 2001. *Soil analysis: sampling, instrumentation and quality control*. J. Y. Pansu, M.; Gautheyrou, J.; Loyer, ed., Rotterdam: A.A. Balkema.
- Pérez Valcárcel, J., Conceptos Generales de la Mecánica del Suelo. *Inspección y Recalce de las Cimentaciones. Máster en Rehabilitación Arquitectónica*.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerin, M. & Roquero de Laburu, C., 2003. *Edafología: para la agricultura y el medio ambiente (3a.ed.)* 3a ed. Mundi-Prensa, ed.,
- Quaglino, M. et al., 2010. Estudio de sistemas de medida con ensayos destructivos. Una aplicación sobre tiempos de producción. *SaberEs*, 2, pp.59–72.
- Ramann, E., 1911. *Bodenkunde*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ramann, E., 1928. *The Evolution and Classification of Soils* W. Heffer, ed.,
- Rhoades, J.D., 1993. Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity. In D. L. Sparks, ed. *Advances in Agronomy*. Riverside, California: USDA, pp. 201–251.
- Rickman, R., Letey, J. & Stolzy, L., 1966. Plant responses to oxygen supply and physical resistance in the root environment. *Soil Science Society of America Journal*, 30(3), pp.304–307.
- Rickman, R., Letey, J. & Stolzy, L., 1965. Soil compaction effects on oxygen diffusion rates and plant growth. *California Agriculture*, 19(3), pp.4–6.
- Ridley, A.M. & Burland, J.B., 1993. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. *Géotechnique*, 43(2), pp.321–324.
- Scott, C.A., Bastiaanssen, W.G.M. & Ahmad, M.-D., 2003. Mapping Root Zone Soil Moisture Using Remotely Sensed Optical Imagery. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(5), pp.326–335.
- Scudiero, E. et al., 2012. Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe. *Sensors (Switzerland)*, 12(12), pp.17588–17607.
- Selig, E. & Mansukhani, S., 1975. Relationship of soil moisture to the dielectric property. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental*, 101(GT8), pp.755–770.
- Shukla, A. et al., 2014. Soil moisture estimation using gravimetric technique and FDR probe technique: a comparative analysis. *Am Int J Res Formal, Appl Nat Sci*, 8, pp.89–92.
- Singh, D.N. & Kuriyan, S.J., 2002. Estimation of hydraulic conductivity of unsaturated soils using a geotechnical centrifuge. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), pp.684–694.
- Skierucha, W. & Wilczek, A., 2010. A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric

- Permittivity in the 10–500 MHz Frequency Range. *Sensors*, 10(4), pp.3314–3329.
- Soil Science Society of America, 2002. Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. In *Methods of Soil Analysis. Part 4 Physical Methods. SSSA Book Ser. 5.4*. Soil Science Society of America, pp. 417–545.
- Sreedeeep, S., Reshma, A. & Singh, D., 2004. Measuring soil electrical resistivity using a resistivity box and a resistivity probe. *Geotechnical Testing Journal*, 27(4), pp.411–415.
- Starr, J.L. & Paltineanu, I.C., 2002. Methods for Measurement of Soil Water Content: Capacitance Devices. In *Methods of Soil Analysis. Part 4 Physical Methods. SSSA Book Ser. 5.4*. Soil Science Society of America, pp. 463–474.
- Susha Lekshmi, S.U., Singh, D.N. & Baghini, M.S., 2014. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, 54, pp.92–105.
- T. Selig, E. & Mansukhani, S., 1975. Relationship of soil moisture to the dielectric property. , 101, pp.755–770.
- Tan, K.H. (Kim H., 2005. *Soil sampling, preparation, and analysis*, Taylor & Francis.
- Tarara, J.M. & Ham, J.M., 1997. Measuring Soil Water Content in the Laboratory and Field with Dual-Probe Heat-Capacity Sensors. *Agronomy Journal*, 89(4), pp.535–542.
- Terhoeven-Urselmans, T. et al., 2008. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(5), pp.1178–1188.
- Thompson, R.B. et al., 2007. EFECTO DE LA SALINIDAD EN LA MEDICIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO CON UN SENSOR DE CAPACITANCIA.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), pp.574–582.
- Topp, G.C., Zegelin, S. & White, I., 2000. Impacts of the Real and Imaginary Components of Relative Permittivity on Time Domain Reflectometry Measurements in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), pp.1244–1252.
- USDA, 1998. Estimating Soil Moisture by Feel and Appearance. *Program Aid Number 1619*.
- USDA, 2017. *Soil Survey Manual, USDA Handbook No. 18* and H. C. M. C. Ditzler, K. Scheffe, ed., Washington, D.C.: Government Printing Office.
- USDA, 1999. *Soil Taxonomy, A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys* 2nd ed.,
- Vázquez de León, A. et al., 2015. Compromiso entre coste y frecuencia de trabajo en sensores FDR de bajo coste para la gestión del riego. In Universidad Miguel Hernández de Elche, ed. *VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería: “Retos de la nueva agricultura mediterránea.”* pp. 833–844.
- Vázquez de León, A. et al., 2016. S01 - Compromiso entre coste y frecuencia de trabajo en sensores FDR de bajo coste para la gestión del riego. In *VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería: “Retos de la nueva agricultura mediterránea.”* Universidad Miguel Hernández, pp. 833–844.
- Veldkamp, E. & O’Brien, J.J., 2000. Calibration of a Frequency Domain Reflectometry Sensor

- for Humid Tropical Soils of Volcanic Origin. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), pp.1549–1553.
- Visconti, F. et al., 2014. Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils. *Agricultural Water Management*, 132.
- de Vries, D.A., 1963. Thermal properties of soil. In *W. R. van Wijk (ed.) Physics of Soil Environment*. New York: John Wiley & Sons, pp. 210–234.
- Wang, T.Y. & Nguang, S.K., 2007. Low cost sensor for volume and surface area computation of axi-symmetric agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 79(3), pp.870–877.
- Wenner, F., 1915. A Method of Measuring Earth Resistivity. *National Bureau of Standards*, 12(4), pp.478–496.
- Whalley, W.R., Dean, T.J. & Izzard, P., 1992. Evaluation of the capacitance technique as a method for dynamically measuring soil water content. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 52, pp.147–155.
- Widtsoe, J.A. & McLaughlin, W.W., 1912. The movement of water in irrigated soils.
- Wilczek, A. et al., 2012. Determination of soil pore water salinity using an FDR sensor working at various frequencies up to 500 MHz. *Sensors (Switzerland)*, 12(8), pp.10890–10905.
- Will, B. & Rolfes, I., 2014. A miniaturized soil moisture sensor based on time domain transmissometry. *2014 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp.233–236.
- Wobschall, D., 1978. A Frequency Shift Dielectric Soil Moisture Sensor. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 16(2), pp.112–118.
- Wobschall, D., 1977. A Theory of the Complex Dielectric Permittivity of Soil Containing Water: The Semidisperse Model. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 15(1), pp.49–58.
- Xiang, H. & Tian, L., 2011. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems Engineering*, 108(2), pp.174–190.
- Yao, Y.-S. et al., 2016. Field Measurements and Numerical Simulations of Temperature and Moisture in Highway Engineering Using a Frequency Domain Reflectometry Sensor. *Sensors*, 16(6).
- Young, M.H., Campbell, G.S. & Yin, J., 2008. Correcting Dual-Probe Heat-Pulse Readings for Changes in Ambient Temperature. *Vadose Zone Journal*, 7(1), pp.22–30.
- Zazueta, F.S. & Xin, J., 1994. Soil Moisture Sensors. *Florida Cooperative Extension Service, Bulletin 292*.
- Zhou, Y. et al., 2009. A Wireless Design of Low-Cost Irrigation System Using ZigBee Technology. In *2009 International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing*. IEEE, pp. 572–575.
- Zhu, J.J., Kang, H.Z. & Gonda, Y., 2007. Application of Wenner Configuration to Estimate Soil Water Content in Pine Plantations on Sandy Land. *Pedosphere*, 17(6), pp.801–812.
- Zreda, M. et al., 2008. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, 35(21), pp.1–5.

ANEXO



VCC
 X1-3 →
 X1-2 → GND
 X1-1 → OUT
 22-23-2031

TITLE: FDR_v2

Document Number:

REV:

Date: 7/3/17 14:38

Sheet: 1/1

Lista detallada de componentes electrónicos del sensor

No.	VALUE	UNITS	PCB REFERENCE	Part Description	Package	Manufacturer Name	Manufacturer Part Number	Distributor	Distributor Part Number	Precio unitario	Precio Total
1	39k	1	R1	Resistencia SMD de Tipo Chip	1206	MULTICOMP	MCWR12X3902FTL	FARNELL	2447511	€ 0,01	€ 0,01
2	3k9	2	R2, R6	RESISTOR, RC02H 1206 3K9	1206	MULTICOMP	MC0125W 120653K9	FARNELL	9337393	€ 0,02	€ 0,05
3	27k	1	R3	Resistencia SMD de Tipo Chip	1206	MULTICOMP	MCWR12X2702FTL	FARNELL	2447493	€ 0,01	€ 0,01
4	100k	1	R4	Resistencia SMD de Tipo Chip	1206	MULTICOMP	MCWR12X1003FTL	FARNELL	2447453	€ 0,01	€ 0,01
5	33k	1	R5	Resistencia SMD de Tipo Chip	1206	MULTICOMP	MCWR12X5601FTL	FARNELL	2447530	€ 0,02	€ 0,02
6	10k	6	R7, R8, R9, R10, R11, R12	RESISTENCIA, CERÁMICA, 10K, 0,25W, 1%	1206	MULTICOMP	MCMR12X1002FTL	FARNELL	2073878	€ 0,04	€ 0,24
7	10uF/16v	1	C1	Condensador de Tantalio SMD, 10 µF, 16 V	3528-21	KEMET	T491B106K016AT	FARNELL	1457436	€ 0,16	€ 0,16
8	1nF	1	C2	Condensador de Cerámica Multicapa	1206	MULTICOMP	MC1206B102K201CT	FARNELL	1855866	€ 0,04	€ 0,04
9	2,2nF	1	C3	Condensador de Cerámica Multicapa	1206	MULTICOMP	MC1206B222K201CT	FARNELL	1855868	€ 0,04	€ 0,04
10	100nF	2	C4, C5	CAP, CERAMIC, 0.1UF, 16V, X7R, 1206	1206	MULTICOMP	MC1206B104K160CT	FARNELL	1759297	€ 0,04	€ 0,08
11	LMC555	1	IC1	LMC555CMX/NOPB Timer	SOIC-08	TEXAS INSTRUMENTS	LMC555CMX/NOPB	FARNELL	2334941	€ 0,86	€ 0,86
12	LM833	1	IC2	Amplificador de Potencia de Audio	SOIC-08	ON SEMICONDUCTOR	LM833DG	FARNELL	1426409	€ 0,38	€ 0,38
13	LM358	1	IC3	Amplificador Operacional, Doble	SOIC-08	ON SEMICONDUCTOR	LM358DR2G	FARNELL	2102546	€ 0,17	€ 0,17

Dimensiones del sensor (mm)

