



DTA-Agrícola

PROTOCOLO DE CALIBRACIÓN

Sondas agrometeorológicas DTA-SHT4x

(Diseño experimental)

2025



Objetivo y alcance

- **Objetivo principal:** Calibrar las sondas DTA-SHT4x, basada en el sensor capacitivo HW-390, relacionando su salida analógica con el contenido volumétrico de agua del suelo (θ_v), determinado únicamente con volúmenes de suelo y agua medidos con recipientes graduados.
- **Alcance práctico:** Método rápido, económico y portable, con control mínimo de variables clave (densidad aparente, temperatura, salinidad, voltaje) y procedimientos claros para técnicos.

Enfoque: cero horno ni balanza, todo por volúmenes conocidos, drenaje como referencia práctica de capacidad de campo, y curvas de calibración con mezclas a porcentajes definidos. Experimento profesional y ligero, optimizado para replicabilidad y documentación en campo.

Fundamentos y definiciones

- Contenido volumétrico de agua:

$$\theta_v = \frac{V_{agua}}{V_{suelo}}$$

- **Capacidad de campo (referencia práctica en mini-columna):** Punto en el que cesa el drenaje visible tras un periodo estandarizado de espera, usando aportes por incrementos pequeños y registro del drenado.
- **Porcentaje de humedad objetivo:**

$$\% \text{ agua} = 100 * \theta_v$$

- **Relación mediciones–lecturas:** Crear curva V_{out} o ADC vs θ_v y su inversa para estimar humedad a partir del sensor.

Materiales y montaje

- **Recipientes de suelo:**
 - Vasos rígidos perforados: \varnothing 6–8 cm, 3 orificios de 2–3 mm en fondo.
 - Papel filtro o tela no tejida: Evita pérdida de finos.
- **Medición de agua:**

- Jarras/pipetas/jeringas graduadas: Incrementos de 1–10 mL.
 - Copa colectora de drenaje: Graduada para medir volumen drenado.
- Sensor y electrónica:
 - HW-390 + microcontrolador: ADC estable.
 - Fuente regulada: 5.0 V o 3.3 V estable; masa común; cables cortos (<30 cm).
- Control básico:
 - Termómetro: Suelo/agua.
 - Medidor EC/TDS: Salinidad del agua.
 - Regla/calibre: Altura de columna y profundidad del sensor.
- Montaje del mini-sistema:
 - Forrado: Fondo del vaso con papel filtro; opcional capa fina de grava.
 - Sensor: Insertar HW-390 al centro, profundidad fija (p. ej. 4 cm), sin tocar el fondo.
 - Estabilidad: Evitar vibraciones; mantener cables cortos; registrar temperatura y EC.

Diseño experimental

Tratamientos y replicación

- Suelos y volúmenes:
 - Texturas: Idealmente 2 (ej. franco-arenoso y franco-arcilloso).
 - Volúmenes: 100 mL (solo prueba de hipótesis), 300 mL, 400 mL, 500 mL.
 - Replicación: 3–5 repeticiones por combinación suelo–volumen.
- Series de humedad objetivo (mezclas):
 - Curva principal: 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, saturado.
 - Validación fina: 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%.
 - Checks en días distintos: Repetir 10%, 30%, 50% para verificar estabilidad.
- Aleatorización:
 - Orden de medición: Aleatorio para reducir sesgos por temperatura/voltaje.

Procedimiento práctico por fases

Fase A. Determinar “capacidad de campo” en mini-columna

1. Preparación de suelo:
 - Homogeneidad: Romper terrones, retirar raíces/piedras.
 - Carga del volumen: Llenar el vaso al volumen objetivo V_{suelo} (usar marca interna o control por altura).
 - Asentamiento estándar: Tres golpes ligeros en la pared del vaso para uniformidad.
2. Aporte por incrementos y drenaje:
 - Incrementos pequeños: Añadir agua destilada a temperatura ambiente en pasos de 5–10 mL, distribuyendo uniforme.
 - Observación de drenaje: Tras cada incremento, esperar 2–5 min. Cuando aparezca goteo, continuar hasta que el goteo cese y mantener 10 min sin goteo.
3. Registro volumétrico:

- Volumen aplicado total: $V_{aplicado}$.
- Volumen drenado total: $V_{drenado}$ medido en la copa colectora.
- Agua retenida a CC:

$$V_{cc} = V_{aplicado} - V_{drenado}$$

- Contenido volumétrico a CC:

$$\theta_{v, cc} = \frac{V_{cc}}{V_{suelo}}$$

Consistencia entre volúmenes:

- **Comparativa:** Repetir en 300, 400 y 500 mL; comparar $\theta_{v, cc}$. La variación esperada por volumen debe ser baja si el método es estable.

Fase B. Preparar mezclas a porcentajes objetivos

5. Cálculo directo de agua a añadir:

- Para cada objetivo θ_v :

$$V_{agua\ objetivo} = \theta_v * V_{suelo}$$

- **Ejemplo:** Para 400 mL de suelo y 30%: $V_{agua} = 0.30 * 400 = 120$ mL.

6. Mezcla y reposo:

- **Homogeneización:** Añadir el agua en 2–3 porciones, mezclar por capas y plegados suaves.
- **Reposo:** 10–15 min para distribución; evitar charcos superficiales.

Fase C. Medición con HW-390

7. Lecturas por punto:

- **Estabilización:** 2–3 min por muestra; registrar 3 lecturas de V_{out} o ADC.
- **Condiciones:** Registrar temperatura del suelo, EC del agua usada y voltaje en bornes del HW-390.

8. Repetición y orden aleatorio:

- **Replicas:** 3–5 por punto.
- **Orden:** Aleatorizar los porcentajes para reducir deriva.

Control de calidad y mejoras clave

- Uniformidad de densidad aparente:

- **Etiqueta:** Documentar técnica de llenado y golpes; mantener igual entre réplicas. Diferencias de compactación afectan Θ_v y la respuesta capacitiva.
- **Temperatura:**
 - **Meta:** 20–25 °C. Si varía >2 °C entre puntos, anotar para corrección post-hoc.
- **Salinidad/EC:**
 - **Agua de baja EC:** Preferir destilada o filtrada; anotar EC. Salinidad puede desplazar la curva capacitiva.
- **Voltaje estable:**
 - **Medición directa:** Registrar el voltaje real en cada sesión; variaciones cambian V_{out} .
- **Tiempo a “capacidad de campo”:**
 - **Estándar reproducible:** 10 min sin goteo visible tras el último incremento. Registrar $V_{drenado}$.
- **Posición del sensor:**
 - **Profundidad constante:** Fijar a 4 cm (o la elegida) para todas las mediciones.

Registro de datos

- **Hoja por punto de medición:**
 - **Identificación:** Fecha, suelo (textura), volumen V_{suelo} , técnica de asentamiento.
 - **Condiciones:** Temperatura, EC del agua, voltaje.
 - **Capacidad de campo:** $V_{aplicado}$, $V_{drenado}$, V_{cc} , Θ_v , cc .
 - **Muestra objetivo:** Θ_v objetivo, V_{agua} calculado, notas de homogeneidad.
 - **Sensor:** Tres lecturas de V_{out}/ADC , media y desviación estándar.

Análisis y curva de calibración

- **Ajuste por suelo (y densidad similar):**
 - **Modelo lineal inicial:**

$$V_{out} = a + b * \Theta_v$$

- **Modelo cuadrático opcional:**

$$V_{out} = a + b * \Theta_v + c * \Theta_v^2$$

- **Selección:** Elegir el más parsimonioso con residuos aleatorios y buen (R^2).
- **Validación cruzada:**
 - **Checks de 10%, 30%, 50% en días distintos:** Error dentro de ± 3 –5 puntos porcentuales es razonable para uso operativo.
- **Ecuación inversa (operativa):**
 - **Estimación en campo:**

$$\theta_v = f^{-1}(V_{out})$$

- **Bandas:** Publicar rango con menor error (ej. 10–50%).
- **Correcciones prácticas:**
 - **Temperatura:** Si se observa dependencia,

$$V_{out\ corr} = V_{out} - k_T * (T - 25)$$

- **Salinidad:** Si EC alta desplaza la curva, definir factor corrector o curva alternativa.

Checklist rápido para hoy

- ☐ **Preparación:**
 - **Suelo:** Homogeneizar y retirar restos.
 - **Vasos:** Tres volúmenes (300, 400, 500 mL) con filtro.
 - **HW-390:** Profundidad fija; fuente estable; medir voltaje.
 - **Condiciones:** Medir temperatura y EC del agua.
- ☐ **Capacidad de campo:**
 - **Incrementos:** Añadir agua (5–10 mL), registrar (V_{aplicado}), coleccionar V_{drenado} .
 - **Cálculo:** $\theta_{v,cc} = (V_{\text{aplicado}} - V_{\text{drenado}}) / V_{\text{suelo}}$.
- ☐ **Curva principal:**
 - **Mezclas:** Preparar 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, saturado.
 - **Lecturas:** 3 por punto, con condiciones registradas.
- ☐ **Validación:**
 - **Fina:** 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%.
 - **Checks en otro momento:** Repetir 10%, 30%, 50%.

Pequeñas mejoras que elevan la precisión sin complicar

- ☐ **Marcadores internos de volumen:** Trazar líneas dentro del vaso para asegurar V_{suelo} consistente.
- ☐ **Distribución del agua:** Usar jeringa para repartir en anillos y evitar canales preferentes.
- ☐ **Reposo corto estándar:** 10–15 min tras mezclar, antes de medir el sensor.
- ☐ **Plantilla impresa:** Tabla de cálculo rápida para V_{agua} por cada V_{suelo} y porcentaje objetivo.
- ☐ **Blindaje ligero del sensor:** Laca protectora en zonas no sensibles para reducir interferencias por salpicado y humedad superficial.