

CALIBRACIÓN DE SENSORES PARA EL AJUSTE O ESTIMACIÓN DE HUMEDAD A TRAVÉS DEL DESARROLLO DE METODOLOGÍA (HG_RCG)

Hector Monterroso¹, Manuel Chang²

¹Especialista en Riegos, ²Técnico en Riegos, CENGICAÑA

RESUMEN

La importancia del uso de sensores se centra en la sustitución del método de humedad gravimétrico, siendo éste el más exacto para determinar la humedad del suelo y su vez considerado como un método destructivo y laborioso que requiere de toma de suelo de campo. Esto conlleva a la evaluación de cuatro sensores para la medición de humedad, siendo su principio de funcionamiento de reflectometría de dominio de tiempo (TDR) para los sensores; TDR350 y GTBILT, otro que se basa en la medición de la constante dieléctrica; Vegetronix VH400 y por último el sensor Watermark 200ss que mide la humedad por medio de la tensión. Las cuatro opciones tecnológicas evaluadas reflejaron tendencias similares a los valores de humedad gravimétrica en suelos con textura arenosa y franco arenosa, pero con cierta variación, siendo necesario el uso de modelos de ajuste o de estimación, según unidad de medida. Se validó la metodología HG_RCG(humedad gravimétrica_ Riegos CENGICAÑA) para generación de modelos de ajustes y/o estimación, obteniendo diferenciales respecto al valor de humedad del laboratorio de +0.33 a -2.76 por ciento, teniendo una media del diferencial de -1.27 por ciento de humedad, considerándose aceptables por las variaciones observadas en campo cuando se extraen dos muestras del mismo punto. En suelos de textura arcillosa (>50 por ciento), se observó que sensores fijos, por efecto de la compactación, no muestran descenso de la humedad, por tanto, no se logró generar un modelo por falta de correlación entre las variables.

ABSTRACT

The importance of the use of sensors is centered on the substitution of the gravimetric humidity method, being this the most exact to determine the humidity of the soil and at the same time considered as a destructive and laborious method that requires taking field soil. This led to the evaluation of four sensors for humidity measurement, its working principle being time domain reflectometry (TDR) for the sensors; TDR350 and GTBILT, another with the principle of reflectometry being; VH400 and finally the Watermark sensor that measures humidity through tension. The four technological options evaluated reflected trends similar to the gravimetric humidity values in soils with sandy and sandy loam texture, but with some variation, requiring the use of adjustment or estimation models, depending on the unit of measurement. The HG_RCG (gravimetric humidity_ Risks CENGICAÑA) methodology was validated to generate adjustment and / or estimation models, obtaining differentials with respect to the laboratory humidity value of +0.33 to -2.76 percent, with a mean differential of -1.27 percent humidity. , being considered acceptable for the variations observed in the field when two samples are taken from the same point. In clayey soils (> 50 percent), it was observed that fixed sensors, due to the effect of compaction, do not show a decrease in humidity, therefore, it was not possible to generate a model due to the lack of correlation between the variables.

INTRODUCCIÓN

La optimización del agua se logra aplicando la cantidad de agua necesaria para el desarrollo del cultivo, siendo necesaria la integración de tecnologías para estimar la cantidad del agua existente en el suelo, tal es el uso de sensores para la medición de humedad del suelo, que permite programar el riego en relación a parámetros de porcentajes de humedad donde la planta puede absorber agua, los parámetros son; capacidad de campo y punto de marchitez permanente.

El uso de sensores, son una alternativa viable para estimar el porcentaje de humedad en el suelo, por la obtención de resultados de forma inmediata, sin destrucción del suelo y menos laborioso, pero antes de su uso es importante considerar la calibración de los mismos para ajustar y/o estimar los porcentajes de humedad, según el principio y la unidad de medida, esto permitirá tomar decisiones oportunas del cuándo regar y cuanta lamina aplicar.

En el desarrollo de este estudio se consideraron la evaluación en tres texturas del suelo siendo estas; arenosa, arcillosa y franco arenoso, y cuatro tipos de sensores para la medición de humedad usados o con potencial de uso, sean sensores estos; portátiles (sensor TDR350) y fijos (GTBILT, VH400 y Watermark).

OBJETIVO

Generar modelos para el ajuste o estimación de humedad a través del desarrollo de metodología HG-RCG.

MATERIALES Y METODOS

El método gravimétrico es el más exacto de todos, y de hecho se usa para calibración de los demás métodos, Radulovich (2009).

CALIBRACION DE SENSORES PARA EL AJUSTE Y/O ESTIMACION DE HUMEDAD

Los valores generados por los sensores para indicar el valor de humedad del suelo, puede ser en porcentaje de humedad gravimétrica o volumétrica, medida de tensión en centibares o valores relativos de humedad. Para conocer si los valores de humedad indicados por el sensor es igual al valor generado por el laboratorio, es necesario realizar un análisis de dispersión en diferentes niveles de humedad en el suelo, para ello es fundamental tener áreas homogéneas de suelo y crear las diferentes condiciones de humedad para realizar el análisis en poco tiempo, determinando la necesidad de realizar ajuste de valores de humedad y/o modelo de estimación, esta forma deja una interpolación de valores sin estudiar dentro de los diferentes niveles de humedad, a la vez se corre el riesgo de que el sitio no sea homogéneo, algunos errores de medición, etc. Por lo tanto, se propuso la metodología denominada HG_RCG, que consiste en el estudio del abatimiento de humedad en el suelo desde un nivel de saturación, hasta que el suelo llegue por debajo de la humedad a punto de marchitez permanente, durante este abatimiento se toman las lecturas de los sensores de humedad y los valores de humedad gravimétrica determinada por la metodología HG_RCG.

CALIBRACION DE SENSORES DE HUMEDAD DEL SUELO

Se reunieron las características principales y esenciales para el desarrollo del estudio de los valores generados por los sensores, que se detallan en el Cuadro 1.

Cuadro1. Características principales de sensores de humedad evaluados

CODIGO DE SENSOR	SENSOR	PRINCIPIO	PROFUNDIDA DE EXPLORACION	RADIO DE EXPLORACION	PRECISIÓN	USO	UNIDAD DE MEDIDAD	TOMA D DATOS
S-1	TDR 350	REFLECTOMETRIA DE DOMINIO DE TIEMPO	20 CM	APROX. 10 CM	+ - 3% CON EC < 2mS/cm	PORTATIL	CONTENIDO DE AGUA VOLUMETRICO	MANUAL
S-2	VH_400	CONSTANTE DIELECTRICA	10 CM	APROX. 10 CM	NO INDICA, Insensible a la salinidad	FIJO	CONTENIDO DE AGUA RELATIVO (0-100)	ENVIO AUTOMAT.
S-3	GTBILT	REFLECTOMETRIA DE DOMINIO DE TIEMPO	10 CM	APROX. 10 CM	+ 5%	FIJO	CONTENIDO DE AGUA VOLUMETRICO	ENVIO AUTOMAT.
S-4	WATERMARK	TENSION	10 CM	APROX. 10 CM	NO INDICA	FIJO	CENTIBARES	MANUAL

DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES EVALUADOS

- Sensor TDR350 y GTBILT, usan el método de reflectometría de dominio de tiempo, su expresión en ingles “Time Domain Reflectometry” (TDR), el cual menciona Radulovich, R. (2009). Que se basa en la relación que existe entre el contenido de agua y su constante dieléctrica, el agua tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la del suelo, por lo que la constante del suelo húmedo depende principalmente de su contenido de agua. La constante dieléctrica del suelo se mide emitiendo un pulso electromagnético de corta duración a través del suelo y se mide el tiempo de ida y vuelta que tarda en reflejarse la onda.
- Sensor Vegetronix VH400, según Payero, JO, Qiao, X., Khalilian, A., Mirzakhani-Nafchi, A., y Davis, R. (2017). mide la constante dieléctrica del suelo utilizando técnicas de línea de transmisión. El sensor tiene un regulador de voltaje interno y funciona con un voltaje de entrada de 3.5 a 20 VDV, que requiere una corriente de entrada de menos de 7 mA. Produce un voltaje de salida en el rango de 0 a 3 VCC, que se puede medir con un multímetro regular, un registrador de datos o un microcontrolador. El voltaje de salida está relacionado con el contenido de agua del suelo.
- Sensor Watermark 200ss, como los describe la empresa IRRROMETER, misma que los desarrolla, que el sensor consiste de un par de electrodos de alta resistencia a la corrosión que se encajan dentro de una matriz granular. Enciso, J. M., Porter, D., & Peries, X. (2007). Menciona que la resistencia eléctrica aumenta a medida que se incrementa la succión del agua en el suelo, o a medida que disminuye la humedad en el suelo. Por tanto, el medidor del sensor correlaciona a la resistencia a centibares (kilopascales) de tensión de agua del suelo.

METODOLOGÍA HG_RCG (Humedad gravimétrica _ Riegos CENGICAÑA), PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD GRAVIMÉTRICA EN UN AMBIENTE CONTROLADO

a. PRINCIPIO PARA LA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD GRAVIMÉTRICA

Para su determinación se usa el método de gravimetría, siendo el más exacto para la determinación de la humedad del suelo a nivel de laboratorio, el cual consiste en tomar muestras de suelo recolectadas en campo previamente, que llevan cierta cantidad de humedad, siendo necesario secar el suelo a 105°C en un horno,

durante un tiempo de 18 horas consecutivas, esto permite obtener el peso de suelo seco, dato que permite determinar el porcentaje de humedad en el suelo, usando la siguiente formula.

$$\%Hg = \frac{psh-pss}{pss} \times 100$$

Donde:

Hg= porcentaje de humedad gravimétrica

Psh= peso de suelo húmedo en gramos.

Pss= peso de suelo seco en gramos.

b. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE RECIPIENTE

Se consideró la profundidad de monitoreo de humedad del sensor y el radio de exploración, teniendo de referencia la información del Cuadro 1, donde se observa que la máxima profundidad de monitoreo de humedad es a 20 cm para el caso de sensor S-1 y considerando un mínimo de exploración de 5 cm de radio, por lo que se diseñó un tubo de PVC de 25 cm de profundidad, con un diámetro de 10 cms.



Figura 1. Diseño de recipiente para el análisis del valor del sensor y humedad por la metodología HG_RCG.

En la Figura 1, se observa en la parte inferior del recipiente el uso de malla, esto permitió asegurar el drenaje del agua, posterior a la saturación y a la vez la disminución de la humedad en el suelo.

c. SELECCIÓN DE TIPOS DE SUELO

Para la prueba de la metodología HG_RCG, se evaluaron cuatro sensores para la medición de humedad, en tres diferentes tipos de texturas de suelo, siendo estas; textura arenosa, franco arenosa y arcillosa, una vez identificadas las texturas se realizó el análisis físico de suelo, teniendo los siguientes resultados de; textura (proporción de minerales arcilla, limo y arena), porcentaje de humedad a capacidad de campo (CC), porcentaje de humedad a punto de marchitez permanente(PMP) y densidad aparente (D.Ap.).

d. SECADO Y TAMIZADO DEL SUELO

Posteriormente se secó el suelo necesario para el llenado de los recipientes, a temperatura de 70°C durante 48 horas, posteriormente se pasa en un tamiz, evitando la formación de terrones por la compactación y al mismo tiempo se evita los espacios de aire que afecten el valor del sensor.

e. CORRECCIÓN DEL PESO SECO

Se determinó el porcentaje de humedad gravimétrica a nivel de laboratorio, para la corrección del peso de suelo después del secado al horno, al tener los resultados del porcentaje de humedad, se corrigió el peso de suelo seco, considerado inicialmente en el recipiente, utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{ss} = \frac{P_{sh}}{\left(\frac{\%Hg}{100}\right) + 1}$$

Donde:

P_{ss} = Peso de suelo seco en gramos.

P_{sh} = Peso de suelo húmedo en gramos.

Hg = Humedad gravimétrica

f. SATURACIÓN E INICIO DE TOMA DE LECTURAS

La saturación, se logró al aplicar el agua suficiente hasta que existió drenaje y filtración de la columna de agua aplicada, en ese momento se inició la toma de lecturas de peso que permitió conocer el porcentaje de humedad gravimétrica y a la vez se registró el valor del sensor, el final de la prueba se determinó hasta que los valores estimados de porcentaje de gravimetría hayan superado el porcentaje de humedad a punto de marchitez permanente.

g. DETERMINACIÓN DEL ERROR DE ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE HUMEDAD GRAVIMÉTRICA

Al finalizar la prueba se realizó un análisis de gravimetría a nivel de laboratorio de los recipientes usados para la metodología HC_RCG para cada sensor, al obtener el resultado se comparó y se determinó el porcentaje de diferencia, considerando una diferencia máxima de porcentaje de humedad del 3 por ciento. Resumiendo, el proceso de la metodología HG_RCG, se basó en determinar el porcentaje de humedad usando el principio de gravimetría, por lo que se diseñó un recipiente que permitió pesar suelo y el registrar el valor del sensor, desde una condición saturada hasta una condición de baja humedad, esto permite generar un análisis de dispersión que ayuda a generar modelos de calibración por textura de suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de análisis físico de suelo, confirman que los suelos evaluados son de textura; arenosa, franco arenoso y arcilloso, al mismo tiempo se obtienen las constantes de humedad que son los valores de porcentajes de humedad a capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, observándose en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados de análisis físico de suelo

ARCILLA	LIMO	ARENA	TEXTURA	PORCENTAJE DE HUMEDAD A CAPACIDAD DE CAMPO (CC)	PORCENTAJE DE HUMEDAD A PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE (PMP)	DENSIDAD APARENTE EN GR/CC
4.70	4.05	91.26	Arena	7.90	4.07	1.41
8.79	26.49	64.72	Franco Arenoso	35.09	14.26	0.90
54.00	29.14	16.86	Arcilloso	41.16	25.03	1.14

En el Cuadro 2, se observa que el suelo de textura arenosa, predomina la cantidad de arena en su contenido mineral siendo esta un 91.26 por ciento de arena, el suelo franco arenoso como se esperaba que contenga mayor proporción de arena en comparación del limo y arcilla, conteniendo un 64.72 por ciento de arena y para el suelo arcilloso, se esperaba un porcentaje mayor de arcilla entre su composición mineral, siendo esta del 54 por ciento.



Figura 1. Sensores en recipientes durante la evaluación.

En la imagen se observa cada uno de los sensores y recipientes usados, para el caso del sensor S2 y S4, enviaban los datos en un lapso de tiempo de una hora a plataforma en sitio web, para los demás sensores la toma de datos fue manual.

ANÁLISIS DE CURVAS DE CALIBRACION PARA EL AJUSTE DE HUMEDAD Y/O PARA LA GENERACIÓN DE MODELOS DE ESTIMACIÓN

En un gráfico de dispersión, se analizó el valor de humedad generado por el sensor como variable “X” y el valor de humedad gravimétrica o volumétrica de la metodología HG-RCG como variable “Y”, en algunos casos se procedió hacer un análisis de porcentaje de consumo, para relacionar el valor de la humedad de acuerdo a sus constantes físicas de suelo(CC y PMP), sea el caso para el sensor S-2 y S-4.

- **SENSOR TDR350 (S-1)**

Sensor portátil, que funciona con el principio de reflectometría de dominio de tiempo, como método indirecto para la estimación de humedad, su capacidad de medición es a la profundidad de 20 cm, cuenta con tres modos para la lectura del valor de humedad, sean estos el modo Sand para suelo arenoso, el modo estándar para el suelo franco-franco arenoso y el modelo Hi-clay para suelos arcillosos.

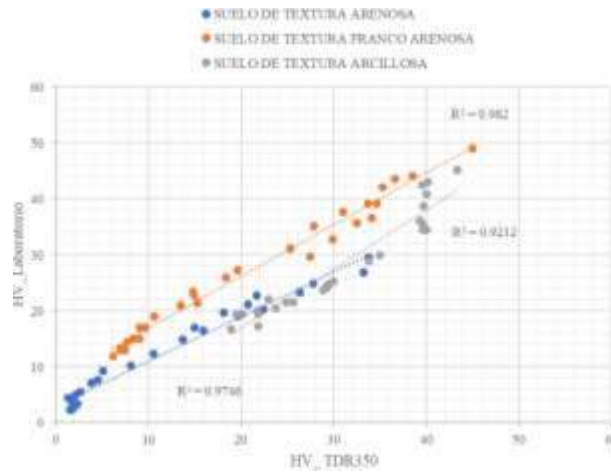


Figura 1. Dispersión de humedad volumétrica S-1 y humedad volumétrica estimada.

Cuadro 3. Primer muestreo comparativo entre la humedad de laboratorio y humedad estimada con la metodología

Suelo	%Hg_Lab.	%Hg HG-RCG	Diferencial (%)
Arcilloso	23.47	24.53	1.06
Arenoso	10.53	8.73	-1.80
Franco Arenoso	31.74	30.24	-1.50

Cuadro 4. Muestreo final comparativo entre la humedad de laboratorio y humedad estimada con la metodología

Suelo	%Hg_Lab.	%Hg HG-RCG	Diferencial (%)
Arcilloso	15.08	12.68	-2.40
Arenoso	2.06	1.36	-0.70
Franco Arenoso	13.04	10.28	-2.76

En este caso según el análisis de dispersión de la Figura 1, donde se muestra la medición por el sensor de acuerdo al modelo usado Sand, Estándar y Hi-Clay, y la humedad volumétrica generada por la metodología HG_RCG, se obtuvieron los siguientes resultados; para el comparativo del suelo de textura arenosa se usó el modelo de Sand del sensor y valor de humedad volumétrica, donde se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.97 y de correlación de 0.98, en esta comparación también se logra observar que el mayor diferencial entre la humedad registrada por el sensor y el valor de humedad estimada por la metodología fue de +6.27 por ciento de sobreestimación, y esto ocurre cuando la humedad se encuentra a capacidad de campo o saturación, cuando la humedad tiende a disminuir aumenta el ajuste de las lecturas del sensor respecto al valor de la humedad de la metodología, oscilando los valores de -4.09 a +2.22 por ciento de humedad. Para el caso del suelo de textura Franco arenosa al realizar el análisis se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.98 y de correlación de 0.99, el diferencial observado muestra una subestimación, esta ocurre a distintos niveles de humedad, teniendo diferenciales de -8.63 a -2.23 por ciento de humedad, y por último el suelo de textura arcilloso muestra un coeficiente de determinación de 0.92 y de correlación de 0.96, observándose una oscilación de diferenciales entre los valores de -5.58 a +2.91 por ciento de humedad, en general el

análisis de correlación muestran que los valores se acerca a +1 que indican que existe una alta asociación lineal positiva del valor del sensor y valor de humedad del suelo.

Para darle validez al comparativo se realizaron dos análisis a nivel de laboratorio de la humedad del suelo del recipiente, resultados se muestran en los Cuadro 3 y 4, el Cuadro 3 que corresponde al primer muestreo donde las variaciones de humedad entre lo estimado por la metodología HG_RCG y el valor de laboratorio fue de +1.1, -1.8 y -1.5, correspondiendo la mayor variación en suelo de textura arenosa y al finalizar la prueba, se realizó otro muestreo, donde se obtuvieron diferenciales de -2.4, -0.70 y -2.76, teniendo el mayor diferencial en el suelo franco arenoso considerando que están dentro del parámetro de variación aceptable. En este sentido se propone modelo de ajuste de humedad por cada tipo de suelo siendo estos presentados en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Modelo de ajuste de valores de humedad generados por metodología HG_RCG

Textura	Modelo de ajuste	R ²
Arenosa	%HV= 0.7998(%VWC Sand)+2.9734x Dap	0.97
Franco Arenoso	%HV= 0.9278(%VWC Estandar)+7.5544xDap	0.98
Arcilloso	%HV= 1.053(%VWC Hi-Clay)-4.0878 xDap	0.92

La alta correlación observada entre la humedad registrada por el sensor y la humedad estimada por la metodología, indican que es necesario un ajuste, para ello se generan modelos que permiten disminuir el diferencial de los valores para cada modo del sensor, por ejemplo para un suelo franco arenoso, si se tiene un valor de 20 de %VWC, se usa el modelo %HV= (0.9278*20)+7.5544*0.90, al usar el modelo de ajuste el valor a considerar es de 23.50 por ciento de humedad volumétrica, considerando un valor de densidad aparente de 0.90 gr/cc, para ello es necesario conocer el sitio definido para la toma de lecturas del sensor, esta información será útil para determinar el momento de riego, una vez se cuente con la información de las constantes de humedad del suelo (CC y PMP).

• **SENSOR VH400 (S-2)**

Es un sensor fijo que envía los datos registrados con una frecuencia de cada hora, la longitud del sensor es de 10 cm, adaptándose a distintas profundidades de interés, el valor que registra está dentro de una escala de 0-100 por ciento, esta interpretación varía de acuerdo a la textura y según tipo de suelo.

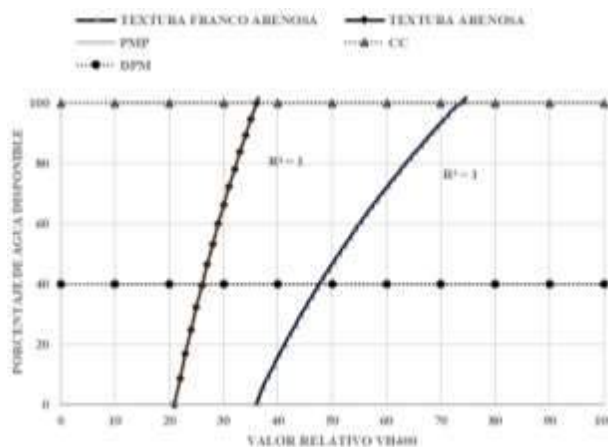


Figura 2. Dispersión de humedad volumétrica S-2 y humedad volumétrica estimada.

Cuadro 6. Muestreo final comparativo entre la humedad de laboratorio y humedad estimada con la metodología

Suelo	%Hg_Lab.	%Hg HG-RCG	Diferencial (%)
Arenoso	13.92	11.98	-1.94
Franco Arenoso	2.13	2.06	-0.07

La Figura 2, de dispersión de la humedad relativa para el sensor S-2 y la humedad gravimétrica estimada por la metodología, permitió integrar la información dentro de la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente del suelo, generando un comportamiento logarítmico de la humedad disponible, esto permite la estimación de la humedad cuando el suelo contengan diferentes constantes de humedad dentro de la misma textura del suelo, observándose que tiene diferente comportamiento para cada textura de suelo. Sea el caso de suelo de textura arenosa, cuando la humedad está a capacidad de campo teniendo el 100 por ciento de humedad disponible, se observa que el valor esta cercano a 40 y cuando llega a déficit permitido de manejo, es decir el 40 por ciento de humedad disponible, se observa que indica un valor de sensor alrededor de 28 y cuando llega a punto de marchitez permanente los valores se ubican alrededor a 21 según escala de valores del sensor S-2. Para el caso de suelo franco arenoso, se observa cuando llega a capacidad de campo el valor del sensor se ubica cercano a 75, cercano al déficit permitido de manejo (60 por ciento de consumo) se ubica en un valor de 50 y cuando llega de punto de marchitez permanente se ubica con un valor de 35.

Al final de la prueba se realizó el análisis de laboratorio de la humedad del suelo de los recipientes, donde se instalaron los sensores, obteniéndose los resultados que se muestran en el Cuadro 7, teniendo diferenciales de -1.94 y -0.07, el mayor diferencial de humedad se dio en suelo franco arenoso, considerándose valores aceptables para la generación del siguiente modelo de estimación que se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 7. Modelo de estimación de humedad generados por metodología HG-RCG

TEXTURA	MODELO DE ESTIMACION	R ²
Arenosa	Para CC < 19% %Hg= CC+(((185.54Xln(valor_S-2)-564.87)-100)/100) X LAA(%)	1
Franco Arenoso	Para CC > 19% %Hg= CC+(((138.7Xln(valor_S-2)-495.76)-100)/100) X LAA(%)	1

Al generar el valor humedad disponible usando el valor del sensor, muestra un comportamiento logarítmico, con un valor de coeficiente de determinación de 1, para ambas texturas de suelo, esto permite una estimación de humedad gravimétrica a través del valor del sensor VH400, es importante mencionar que este modelo necesita los valores del análisis físico de suelo, donde se instale el sensor, esto asegura la adecuada estimación. Por ejemplo, usando las constantes físicas del suelo de textura franco arenosa del Cuadro 2, suponiendo que se tiene un valor de VH400 de 50, el porcentaje de humedad es %Hg=35.09+(((185.54*ln(50)-564.87)-100)/100)*20.83 es igual a 24.02 por ciento de humedad.

• **SENSOR WATERMARK 200SS(S-3)**

Este permite conocer la humedad disponible dentro del rango de medición de 0-200 centibares, es sensor fijo de una longitud de 10 cm, las lecturas son manuales, y se pueden instalar a la profundidad de interés, la interpretación depende de la textura de suelo.

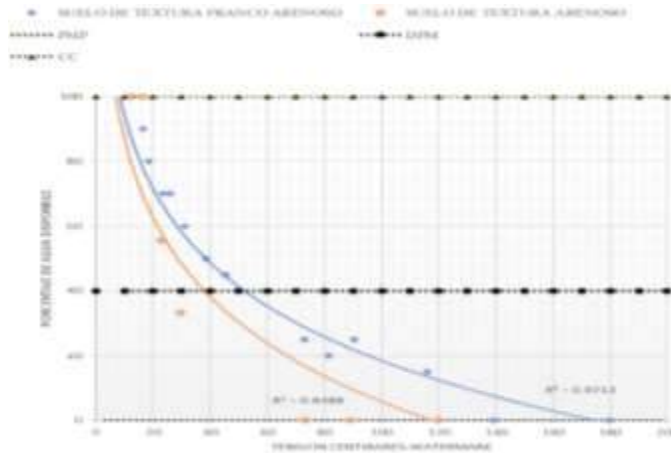


Figura 3. Dispersión de valor de tensión en centibares y humedad gravimétrica estimada por la metodología.

En la Figura 3, se compara la tensión en centibares(ctb) del sensor S-3 y la humedad disponible estimada por la metodología, esto respecto a los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente, considerando un comportamiento logarítmico, adecuándose para la estimación de humedad gravimétrica cuando las constantes de humedad varíen en una misma textura de suelo, en suelo de textura arenosa, cuando está a capacidad de campo donde existe el 100 por ciento de humedad disponible, se observa que el valor de tensión es igual a 15 ctb y cuando llega a déficit permitido de manejo, cuando el existe un 40 por ciento de humedad disponible, se observa que indica un valor de sensor alrededor de 40 ctb, esto se transpone a lo que menciona Enciso, *et al.* (2007), que indica que al tener un valor de 75 ctb, corresponde un valor un 90 por ciento de consumo, para este mismo valor de consumo se obtuvo en el estudio el valor de 83 ctb y cuando llega a punto de marchitez permanente los valores se ubican alrededor a 120 ctb según valor del sensor, aunque teóricamente se debería situar alrededor de 1500 ctb, por lo que podría considerar variaciones por disminución de humedad en el suelo que hace que disminuya la compactación del suelo y el sensor, esto se limita a mediciones máximas de 200 ctb. Para suelo franco arenoso, se observa cuando llega a capacidad de campo el valor del sensor se ubica cercano a 12 ctb, cuando se acerca al déficit permitido de manejo, cuando la humedad disponible se encuentre en un 40 por ciento, se ubica en un valor de 60 ctb y cuando llega de punto de marchitez permanente se ubica con un valor de 200 ctb, aunque teóricamente se debe de situar a un valor de 1500 ctb, por lo que la precisión de las lecturas de este sensor podría limitarse a condiciones de humedad entre 40-100 por ciento de humedad disponible, porque en condiciones de baja humedad podría afectar las lecturas obtenidas.

Cuadro 8. Modelo de estimación de humedad generados por metodología propuesta

TEXTURA	MODELO DE ESTIMACION	R ²
Arenosa	$\%H_g = CC + (((-35.39 \times \ln(\text{valor_ctb}) - 168.72) - 100) / 100) \times LAA(\%)$	0.8488
Franco Arenoso	$\%H_g = CC + (((-33.03 \times \ln(\text{valor_Ctb}) - 170.48) - 100) / 100) \times LAA(\%)$	0.9713

En el Cuadro 8, se presenta los modelos generados a través del estudio, el valor correlación observado entre el valor en centibares por el sensor y la humedad estimada por la metodología, permiten una estimación de humedad gravimétrica a través del valor del sensor Watermark, es muy importante mencionar que el modelo mejorará la estimación al incluir los valores del análisis físico de suelo donde se instale el sensor, esto asegura la adecuada interpretación.

- **Sensor GTBILT (S-4)**

Su principio de funcionamiento es a través de la reflectometría de dominio de tiempo (TDR), dispone de dos varillas de 10 cm de largo, registra valores de humedad en modo Moist y Dry, envía los datos registrados con una frecuencia de una hora, tiene la facilidad de registrar información en tres profundidades de interés.

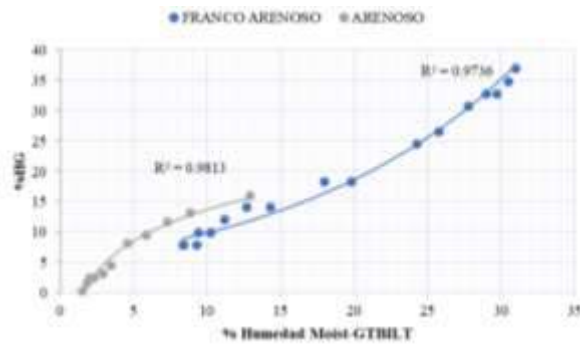


Figura 4. Dispersión de valor de humedad en modo Moist-GTBilt y humedad gravimétrica estimada por la metodología.

Cuadro 9. Muestreo final comparativo entre la humedad laboratorio y humedad estimada con la metodología

Suelo	%Hg_Lab.	%Hg HG-RCG	Diferencial (%)
Arenoso	0.98	0.29	-0.69
Franco Arenoso	8.59	8.92	0.33

Según Figura 4, los resultados muestran el comportamiento de la humedad de Moist_S-4 y el valor de humedad gravimétrica, para el suelo de textura arenosa, muestra un comportamiento logarítmico con un coeficiente de determinación de 0.98 y de correlación de 0.99, en esta comparación también se logra observar que el mayor diferencial entre la humedad registrada por el sensor y el valor de humedad estimada por la metodología fue de 4.25 por ciento de subestimación, y este ocurre cuando la humedad se encuentra a capacidad de campo o saturación, cuando la humedad tiende a disminuir aumenta el ajuste de las lecturas del sensor respecto al valor de la humedad de la metodología con una oscilación de -1.20 a 1.11 por ciento. Para los suelos de textura franco arenosa, el comportamiento observado es de tipo exponencial, con un coeficiente de determinación de 0.97 y de correlación de 0.98, en esta comparación también se logra observar que el mayor diferencial entre la humedad registrada por el sensor y el valor de humedad estimada por la metodología fue de 5.29 por ciento de subestimación, y este ocurre cuando la humedad se encuentra a capacidad de campo o saturación, cuando la humedad tiende a disminuir el diferencial de las lecturas del sensor respecto al valor de la humedad de la metodología, tiene una oscilación de -1.52 a 1.43 por ciento. Al realizar el comparativo final de la humedad del suelo a nivel de laboratorio y la humedad estimada por la metodología HG_RCG, se muestra en los resultados diferenciales de -0.69 y +0.33, teniendo el mayor

diferencial en el suelo arenoso, considerándose valores aceptables para la generación del modelo de ajuste que se muestra en el cuadro siguiente.

Cuadro 10. Modelo de ajuste de valores de humedad generados por metodología propuesta

TEXTURA	MODELO DE AJUSTE	R ²
Arenoso	$\%Hg = 7.4037 \times \ln(\text{valor S-4}) - 3.3535$	0.9813
Franco arenoso	$\%Hg = 5.2316e^{0.0635 \times (\text{valor S-4})}$	0.9736

En el Cuadro 10, se presenta los modelos generados a través del estudio, el valor correlación observado entre el valor del sensor en modo Moist y la humedad estimada por la metodología, permiten una estimación de humedad gravimétrica, dependiendo la textura de suelo.

VALIDACIÓN DE INSTALACIÓN DE SENSORES

Los mayores inconvenientes observados durante la evaluación en campo y que causa diferenciales en la humedad del sensor y la humedad gravimétrica, se dan principalmente por una mala instalación, observándose que esto ocasiona una falta de precisión de la estimación de la humedad por el uso incorrecto de estos modelos.

Según la Figura 5, se observa los diferenciales de las lecturas de dos sensor respecto a la humedad gravimétrica, el primero instalado a 0-20 cm y el segundo de 40-60 cm de profundidad, para el primer sensor de 0-20 cuando no existe validación de instalación, existe variaciones del diferencial desde -2.50 a 6.17 por ciento de humedad y para el sensor de 40-60 el diferencial es de 2.51 a 6.24 por ciento de humedad.

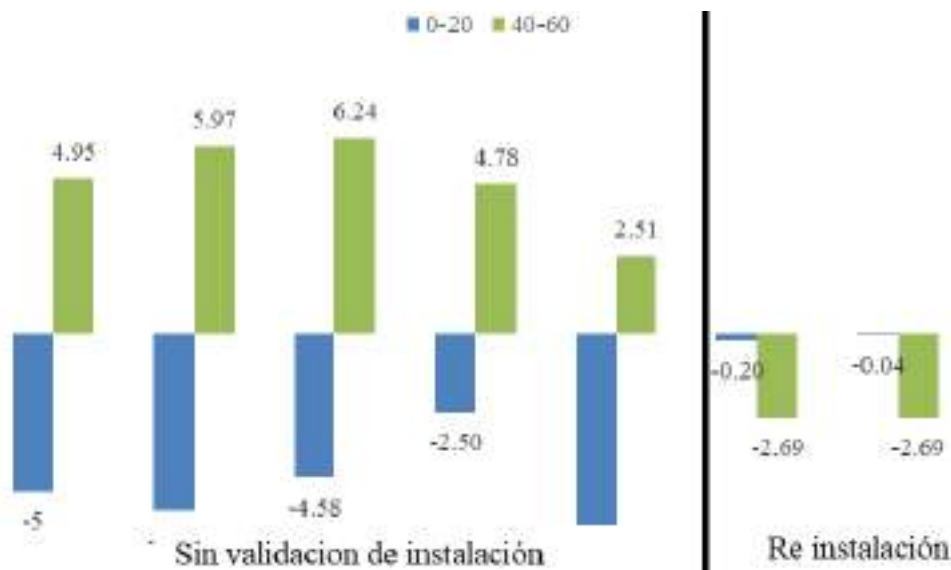


Figura 5. Diferencial de humedad gravimétrica respecto a humedad estimada por sensor.

Una validación de instalación, puede ayudar a disminuir el diferencial del dato del sensor y la humedad gravimétrica, en este caso mejoro la estimación para el sensor de 0-20 cm teniendo diferencial de -0.04 a -0.20 por ciento de humedad y para el sensor de 40-60 se mantuvo el diferencial en -2.69 por ciento de humedad, recomendando en cada instalación la validación a través de la humedad gravimétrica.

CONCLUSIONES

- Las cuatro opciones tecnológicas reflejaron tendencias similares a los valores de humedad gravimétrica en suelos con textura arenosa y franco arenosa, mejorándose el valor obtenido por el sensor mediante un modelo de ajuste o de estimación resultado del proceso de calibración, es necesario mencionar que algunos modelos de estimación requieren de análisis físico de suelo donde sea instalado el sensor, siendo estos los modelos generados;

SENSOR	Textura	Modelo de ajuste	R ²
S-1	Arenosa	$\%HV = 0.7998(\%VWC \text{ Sand}) + 2.9734x \text{ Dap}$	0.97
	Franco Arenoso	$\%HV = 0.9278(\%VWC \text{ Standar}) + 7.5544x \text{ Dap}$	0.98
	Arcilloso	$\%HV = 1.053(\%VWC \text{ Hi-Clay}) - 4.0878 x \text{ Dap}$	0.92
S-2	Arenosa	Para CC < 19% $\%Hg = CC + (((185.54 \times \ln(\text{valor_S-2}) - 564.87) - 100) / 100) \times \text{LAA}(\%)$	1
	Franco Arenoso	Para CC > 19% $\%Hg = CC + (((138.7 \times \ln(\text{valor_S-2}) - 495.76) - 100) / 100) \times \text{LAA}(\%)$	1
S-3	Arenosa	$\%Hg = CC + (((-35.39 \times \ln(\text{valor_ctb}) - 168.72) - 100) / 100) \times \text{LAA}(\%)$	0.85
	Franco Arenoso	$\%Hg = CC + (((-33.03 \times \ln(\text{valor_Ctb}) - 170.48) - 100) / 100) \times \text{LAA}(\%)$	0.97
S-4	Arenoso	$\%Hg = 7.4037 \times \ln(\text{valor S-4}) - 3.3535$	0.98
	Franco arenoso	$\%Hg = 5.2316e^{0.0635x(\text{valor S-4})}$	0.97

- Se validó la metodología HG_RCG para generación de modelos de ajustes y/o estimación, obteniendo diferenciales respecto al valor de humedad del laboratorio de +0.33 a -2.76 por ciento, teniendo una media del diferencial de -1.27 por ciento de humedad, considerándose aceptables.
- En suelos de textura arcillosa (>50 por ciento), se observó que los sensores fijos S-2, S-3 y S-4, por efecto de la compactación, no muestran descenso de la humedad, por tanto no se determinó generar un modelo por la baja de correlación entre las variables.

RECOMENDACIONES

- Validar los modelos obtenidos mediante lecturas en campo en la operación del riego.
- Los modelos generados permiten obtener datos aproximados, para mejorarlo podrían realizar el mismo estudio en condiciones de interés.
- Realizar estudios de calibración para sensores fijos en suelos arcillosos, con contenido de arcilla inferior al 50 por ciento.
- Para el sensor portátil, tiene la limitación de lecturas a una única profundidad del suelo, por lo que es necesario cuantificar las variaciones de humedad a distintas profundidades.

AGRADECIMIENTOS

Ingeniería agrícola de ingenio Santa Ana, La Unión, Madre Tierra y Magdalena por permitir el conocimiento y uso de la tecnología para la medición de la humedad en los campos.

LITERATURA CONSULTADA

1. Castro, O., Pocasangre, R., & Monterroso, H. (2012). El uso de del FDR para la estimación de la humedad en el suelo. La importancia de la calibración en nuestras condiciones. En: Memoria de presentación de resultados zafra 2011-12, CENGICAÑA. Pág. 278-285.
2. Enciso, J. M., Porter, D., & Peries, X. (2007). Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. *University of Texas System, Austin, TX*.
3. Payero, JO, Qiao, X., Khalilian, A., Mirzakhani-Nafchi, A., y Davis, R. (2017). Evaluación del efecto de la textura del suelo en la respuesta de tres tipos de sensores utilizados para controlar el estado del agua del suelo. *Revista de Recursos y Protección del Agua* , 9 (06), 566.
4. Radulovich, R. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía costarricense*.
5. Villaseñor-López, O. A., Bocardo, J. F., García-Quintana, Y., & Martínez, L. A. Evaluación del contenido de humedad de un suelo vertisol compactado mediante sensor watermark en una plantación de Cedrela odorata L. en el Valle del Yaqui, Sonora.