

## FUNDAMENTOS PARA MODELACIÓN DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS DEL SUELO A PARTIR DE TEXTURA, MATERIA ORGÁNICA Y EL MODELO SPAW

José Gabriel Vargas González<sup>1\*</sup>; Nelys Maribel Escobar Abreu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Programa Ciencias del Agro y del Mar, sub programa Agronomía. Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Vice Rectorado de Producción Agrícola (UNELLEZ-VPA). C.P. 3350, Guanare, estado Portuguesa, Venezuela.

vargasgjoseg@gmail.com – 58 0426 5526981 (\*Autor de correspondencia)

<sup>2</sup>Escuela Técnica Agropecuaria “Oscar Villanueva”, C.P. 3350, Guanare, estado Portuguesa, Venezuela.

---

### Resumen

La cuantificación del flujo de agua y el transporte de productos químicos en la zona vadosa generalmente requiere el conocimiento de sus propiedades hidráulicas (*Pro-Hid*). A éste respecto, las relaciones del potencial hídrico y la conductividad hidráulica (*K*) del suelo con su contenido de agua, son necesarias para muchas investigaciones relacionadas con el manejo del mismo, como la conservación del agua, la programación del riego, el drenaje, la migración de solutos, así como el crecimiento y el estrés hídrico de las plantas. De tal manera, que en el presente trabajo se pretende fundamentar la modelación de las *Pro-Hid* del suelo a partir de la textura, la materia orgánica (*MO*) y el modelo *SPAW* como herramienta integradora. Por lo tanto, se define la modelación como proceso o método de investigación y se destacaron algunos de los modelos predictivos en la gestión hídrica del suelo. Por otra parte, se definieron las *Pro-Hid* del suelo consideradas en este trabajo; como las constantes de humedad del suelo y los parámetros del movimiento del agua en el suelo, se exhiben las relaciones de la textura y la *MO* con las *Pro-Hid* del suelo y se presentan los fundamentos para el cálculo de las mismas, y finalmente, se describe el modelo *SPAW* (versión 6.02.75), con énfasis en sus restricciones de uso. Así, se concluye que la modelación mediante modelos informáticos, posee un valor útil y representa actualmente una oportunidad para el análisis de procesos de las relaciones suelo-agua-planta en la gestión del recurso hídrico del suelo y manejo de cultivos.

**Palabras clave:** modelos de simulación, constantes hídricas del suelo y propiedades hidráulicas de la zona vadosa.

## Introducción

De acuerdo con Saxton *et al.* (1986) y Saxton y Rawls (2006), las mediciones en campo o laboratorio de las *Pro-Hid* del suelo son difíciles, costosas y a menudo poco prácticas para muchos análisis hidrológicos. No obstante, Filgueira *et al.* (2006) aseguraron que se pueden obtener valores representativos del campo sin los problemas aparejados de la toma y transporte de muestras. A éste respecto, Saxton *et al.* (1986) previeron que para muchos propósitos, como la valoración de la curva de humedad característica completa, las estimaciones generales basadas en información más fácilmente disponible, como la textura del suelo, serían suficientes. Por su parte, Saxton y Rawls (2006) aseguraron que para definir los efectos hidrológicos del agua del suelo, es necesario estimar las características del agua en el mismo para el potencial hídrico del suelo ( $\psi_h$ ) y la  $K$ , al utilizar variables del suelo como la textura, la  $MO$  y la estructura, por lo que las correlaciones estadísticas entre éstas variables, pueden proporcionar estimaciones suficientemente precisas para muchos análisis y toma de decisiones.

Saxton *et al.* (1986), reportaron el desarrollo de correlaciones estadísticas entre la textura del suelo y sus  $\psi_h$ , seleccionados con el uso de una gran base de datos, y también entre texturas del suelo seleccionadas y sus valores de  $K$ , procedentes de estudios previos que concluyeron en la generación de ecuaciones matemáticas para estimaciones continuas en amplios rangos de textura,  $\psi_h$  y  $K$ , que si bien, solo representaron una estimación estadística y la influencia de la textura, éstas proporcionaron resultados bastante útiles para muchos casos habituales de suelo y agua. Por lo tanto, enfatizaron sobre la necesidad de ecuaciones para contar con el beneficio de un método computacionalmente eficiente para estimar las características del agua del suelo con una precisión razonable a partir de entradas fácilmente disponibles.

A tales efectos, Saxton *et al.* (1986) demostraron que la textura determina predominantemente las características de retención de agua de la mayoría de los suelos agrícolas, y señalaron que la misma suele estar disponible o puede estimarse mediante métodos simples (Bouyoucos (1951) citado por Saxton *et al.* (1986)), por lo que podría servir fácilmente como la principal variable de entrada para un método matemático de estimación de las relaciones características del suelo y el agua. De tal modo, que las ecuaciones de Saxton *et al.* (1986) brindaron una excelente eficiencia computacional para aplicaciones en modelos, y las texturas pueden ser usadas como parámetros de calibración donde se encuentren disponibles datos característicos del agua del suelo en el campo o en el laboratorio, por lo tanto concluyeron, que siendo éstas ecuaciones válidas para una amplia gama de texturas, resultarían computacionalmente eficientes para permitir un uso fácil con una computadora digital, para proporcionar estimaciones razonablemente precisas de los  $\psi_h$  en suelos no saturados y las  $K$ , con un mínimo de datos fácilmente disponibles.

Con otro enfoque del problema, Rawls *et al.* (1998) citados por Filgueira *et al.* (2006) usaron datos de textura, densidad aparente ( $D_a$ ) y la pendiente de la curva de retención hídrica para predecir la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ). Mientras que por su parte,

Saxton y Rawls (2006) desarrollaron nuevas ecuaciones características del agua del suelo a partir de la base de datos de suelos del *Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés)* disponibles para la fecha, al utilizar solo las variables fácilmente disponibles como textura y *MO*, y aunque estas ecuaciones son similares a las reportadas previamente por Saxton *et al.* (1986), las mismas incluyen más variables y rangos de aplicación, al combinarlas con las relaciones previamente informadas para las tensiones y conductividades y los efectos de la *Da*, la grava y la salinidad, para formar un sistema predictivo integral de las características del agua del suelo para su gestión agrícola y análisis hidrológicos.

Así, la aplicación de este conocimiento es imprescindible para la simulación hidrológica dentro de paisajes naturales, por lo que Saxton y Rawls (2006) programaron un sistema predictivo en un modelo computarizado gráfico, con el fin de proporcionar una aplicación fácil y soluciones rápidas en el cálculo de las *Pro-Hid* del suelo, al actualizar las ecuaciones de Saxton *et al.* (1986), incorporar la ecuación de conductividad mejorada de Rawls *et al.* (1998), y combinarlos con los efectos de la *Da*, la grava y la salinidad, en un modelo predictivo ampliamente aplicable. Por lo tanto, en el presente trabajo se pretende fundamentar la modelación de las *Pro-Hid* del suelo a partir de la textura, el contenido de *MO* y el modelo *SPAW* como herramienta integradora.

## **Materiales y Métodos**

### **Aspectos generales de la investigación**

La presente investigación estuvo enmarcada como componente del proyecto titulado; “Estado actual de los sistemas de drenaje superficial y su impacto sobre la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) en la finca Orión, municipio Papelón, estado Portuguesa”, avalado por el grupo de Creación Intelectual “*Cartografía y Topografía*” perteneciente al Centro de Creación Intelectual “*Centro Cartográfico*” del Instituto de Biodiversidad, Conservación y Gestión de Recursos Ambientales “*Oswaldo Barbera*”, en respuesta a la iniciativa promovida desde la cátedra de “*Drenaje y Riego*” de la carrera Ingeniería Agronómica del Vicerrectorado de Producción Agrícola de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (UNELLEZ-VPA).

### **Descripción de métodos y componentes esenciales**

Con el propósito de fundamentar el proceso de modelación de las *Pro-Hid* del suelo a partir de la textura, la *MO* y el modelo *SPAW* como herramienta integradora, se definió el término modelación, enfocado como proceso o método de investigación y se destacaron algunos de los modelos predictivos en la gestión hídrica del suelo. Por otra parte, se definieron las *Pro-Hid* del suelo consideradas en este trabajo; como las constantes de humedad del suelo y los parámetros del movimiento del agua en el suelo. Además, se expusieron las relaciones de la textura y la *MO* con las *Pro-Hid* del suelo y se presentaron los fundamentos para el cálculo de las *Pro-Hid* del suelo, para finalmente, describir el modelo *SPAW* (versión 6.02.75) y enfatizar sus restricciones de uso.

## Resultados y Discusión

### La modelación como proceso o método de investigación

Morles (2002) señaló que el antecedente de la modelación por computadoras lo constituye el experimento mental, con vigencia actual y futura, ya que este comprende el hecho de imaginar lo que sucederá en un escenario si se cambiaran u ocurriesen ciertos hechos internamente o en su entorno, al asegurar que éste método ha sido utilizado por los grandes teóricos en muchas áreas, incluyendo la física (con Albert Einstein), la astronomía, la sociología o política y la ingeniería, entre otros. Además, muchas técnicas especializadas están basadas o utilizan este método o el de la modelación (también conocida como *simulación*); por ejemplo, la técnica *Delphi*, la técnica de los escenarios, la perspectiva y la investigación de operaciones.

No obstante, cuando se comenzaba a trabajar con modelos computacionales, un consejo común era: “*No confiar en ningún modelo hasta que este haya sido validado usando datos independientes*”. Sin embargo, en la actualidad y con algunos de los modelos determinísticos más comunes ya probados y comprobados en su credibilidad, la expresión ha cambiado hacia; “*No confiar en ninguna serie de datos hasta que esta haya sido validada usando un modelo*” (Allen *et al.*, 1998). Ahora bien, González (2016) demostró que la modelación es una competencia a partir del análisis de variadas definiciones actuales de las cuales se asume una estructura compuesta por conocimientos, habilidades, valores y procesos de autorregulación del aprendizaje. Así, la modelación de procesos de informatización es una de las actividades más importantes en el quehacer ingenieril, debido a la necesidad de una representación anticipada de los procesos de informatización por realizar.

La modelación integra el grupo de los cinco grandes procedimientos, métodos generales o vías para resolver problemas intelectuales, que puede usarse aisladamente o en combinación con la intuición, el ensayo-error, la razón y la experiencia, y que contempla su valor, su oportunidad, sus ventajas y sus desventajas. Así, la modelación se perfila como un método innovador de reciente aparición, que permite la creación de realidades virtuales (modelos de la realidad), mediante sistemas computarizados u otros artefactos, con el propósito de manipularlas a voluntad para observar su comportamiento o efectos, ya que mediante este procedimiento se pueden realizar estudios prospectivos al observar las respuestas de variables reinventadas (Morles, 2002).

### Modelos predictivos en la gestión hídrica del suelo

Real *et al.* (2016) aseguraron que la disponibilidad de métodos más asequibles y sencillos para la caracterización física del suelo y su comportamiento hidráulico, resulta ser de especial interés. A este respecto, Lidón *et al.*, (2011) citados por Fontanet *et al.* (2022) señalaron a los modelos de simulación como herramientas potentes para complementar los ensayos de campo, validar las regulaciones establecidas en zonas vulnerables y analizar diferentes escenarios o estrategias de suelo-clima-cultivo-manejo.

De tal manera, que éstos modelos permiten ventajosamente considerar aspectos no siempre contemplados en el manejo de los suelos agrícolas y ayudan a evaluar prácticas encaminadas a la mejora de la estructura del suelo, al disponer de un mayor conocimiento del agua disponible para las plantas y al conocer términos del balance hídrico del suelo (Real *et al.*, 2016), ya que de acuerdo con Fontanet *et al.* (2022), éstos incluyen una sub-rutina que modeliza los procesos relacionados con el movimiento de agua en el perfil del suelo, como la infiltración, la redistribución y el drenaje, la evaporación y la absorción radical, entre otros.

Por ejemplo, el modelo *SPAW* para computadora estima los contenidos diarios y el movimiento del agua y nutrientes para los suelos de campos agrícolas, además de los balances diarios de agua para humedales agrícolas, estanques y embalses. Por su parte, Schelle *et al.* (2013) y Biel-Maeso *et al.* (2015) citados por Real *et al.* (2016) aseguraron que otros métodos como el de evaporación simplificado (*Hyprop*) están siendo cada vez más utilizados, ya que a través del programa *Hyprop Fit 2.0* es posible ajustar los datos experimentales obtenidos a diversos modelos matemáticos (Fontanet *et al.*, 2022), así mismo, mencionaron otros modelos de simulación, como: “*EU-Rotate\_N*”, “*Hydrus-2D*”, “*CropSyst*” y “*LEACHM*”, como herramientas válidas en la gestión hídrica de los suelos.

### **Pro-Hid del suelo**

De acuerdo con Real *et al.* (2016), el análisis de algunos de los términos del balance de agua requiere conocer las *Pro-Hid* del suelo, ya que éstas proporcionan información acerca de cómo se comporta el agua en el suelo, es decir, cuál es su capacidad de almacenamiento y cuando se producen los flujos de agua en el suelo. Por otra parte, es necesario conocer las relaciones entre los parámetros implicados y su dependencia del manejo agrícola realizado. Estos parámetros están relacionados con la curva de retención de humedad y la *K*.

### **Constantes de humedad del suelo**

La curva de retención de humedad expresa la correspondencia entre la humedad volumétrica del suelo y su potencial matricial (que es el resultado de las fuerzas capilares y de adsorción de la matriz del suelo), de tal manera, que por su interés físico y biológico hay que destacar tres contenidos de agua en el suelo: el contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ), a *Capacidad de Campo* (*CC*) y en el punto de *Punto de Marchitez Permanente* (*PMP*) (Real *et al.*, 2016).

Shaxson y Barber (2005) definieron el contenido volumétrico de humedad ( $\theta$ ) a *CC* ( $\theta_{CC}$ ) como la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. De acuerdo con esto, el drenaje ocurre por la transmisión del agua a través de los poros mayores de 0.05mm de diámetro; sin embargo, la *CC* puede corresponder a poros que varían entre 0.03 y 1.00mm de diámetro. Por su parte, el *PMP* se refiere al contenido de agua de un suelo que ha perdido tal cantidad de agua a causa del drenaje o del cultivo, que el agua que aún permanece en él, no está disponible

para el mismo. En esas condiciones, el cultivo estará permanentemente marchito y no podrá revivir cuando se le coloca en un ambiente saturado de agua. Al contacto manual, el suelo se siente casi seco o muy ligeramente húmedo.

Por otra parte, Claro (1991) aseveró que el agua aprovechable o disponible ( $AD$ ) para las plantas es calculada de forma clásica como la diferencia entre el  $\theta_{CC}$  y el contenido volumétrico de humedad en el  $PMP$  ( $\theta_{PMP}$ ). Por su parte, Pérez y Florentino (2013) se refirieron a este rango de humedad en el suelo como el *Intervalo de Agua más Limitante (IAML)*, al coincidir en que el  $\theta_{CC}$  o a la porosidad de aireación igual a 10% ( $\theta_{pa}$ ) representa su límite superior, mientras que el límite inferior es el  $\theta_{PMP}$  o el contenido de humedad a una resistencia del suelo igual a 1,500kPa.

No obstante, Kay y Grant (1996) citados por Pérez y Florentino (2013) cuestionaron la utilidad de éste concepto al referir que la misma es fuertemente influenciada por la textura y carbono orgánico del suelo, pero no responde a incrementos de la  $Da$ , por lo tanto, podrían presentarse limitaciones al crecimiento de las plantas atribuidas a una pobre aireación y alta resistencia mecánica, aun cuando la humedad del suelo se encuentre dentro del *IAML*. De tal manera, que Pérez y Florentino (2013) concluyeron que la determinación clásica del agua aprovechable, no es muy confiable en suelos con cierto nivel de degradación de sus propiedades físicas.

Por otra parte, Copa (2014) aseguró que la *Capacidad de Retención de Agua (CRA)* por los suelos es una función de la textura, la  $MO$  y el contenido de sales, éste último expresado por la conductividad eléctrica ( $Ce$ ). Finalmente, el  $\theta_s$  se entiende como el  $\theta$  del suelo cuando prácticamente 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 (Shaxson y Barber, 2005).

### Parámetros del movimiento del agua en el suelo

La  $K$  es la medida de la capacidad que posee el suelo para permitir el paso de agua a través del mismo (Real *et al.*, 2016). Por su parte, Lozano *et al.* (2005) citados por Bermejo *et al.* (2021) la definieron como la propiedad que determina el movimiento del agua en el suelo en unas condiciones de saturación dadas por el medio, según las características asociadas a los componentes sólidos, líquidos y gaseosos relacionados con el espacio poroso.

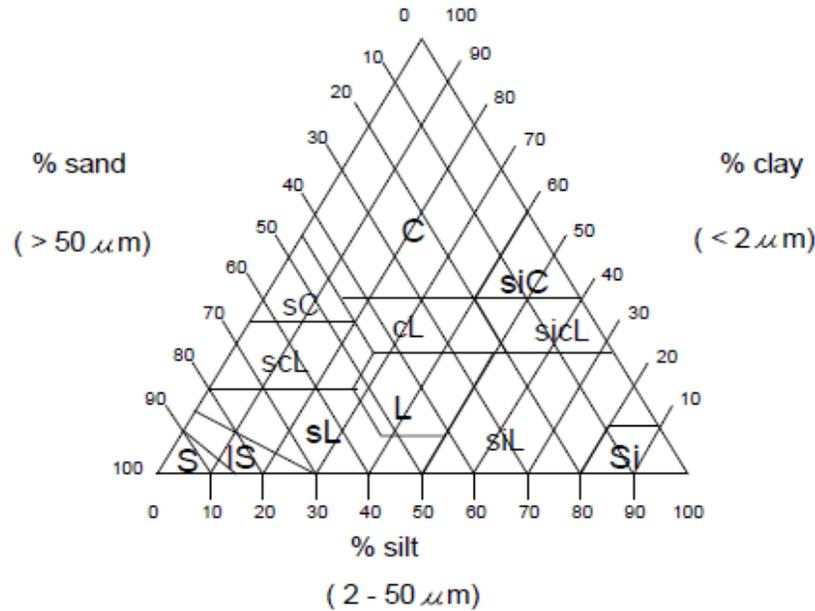
Deb y Shukla (2012) citados por Castiglion *et al.* (2018) y Bermejo *et al.* (2021) coincidieron en que la  $K_s$  es una de las propiedades edáficas más importantes para entender las dinámicas que confluyen en el ciclo hidrológico y en la interacción agua-suelo-planta, al determinar el movimiento subsuperficial del agua en el suelo en condiciones de saturación e influir en el transporte de solutos en el perfil del suelo. Además, permite evidenciar las afectaciones por las alteraciones que han sufrido por el cambio de coberturas vegetales, los ecosistemas estratégicos para la conservación del recurso hídrico (Honda y Durigan (2017) citados por Bermejo *et al.* (2021).

Real *et all.* (2016) aseguraron que el conocimiento de la estructura porosa del suelo a través del comportamiento de la  $K_s$ , es importante de cara a evaluar el drenaje del suelo, el cual no solo resulta de interés desde el punto de vista agronómico, sino también medioambiental. Así, la  $K_s$  ejerce una fuerte influencia sobre la partición de la lluvia en infiltración y escurrimiento (flujo de agua vertical y horizontal), de tal manera, que una correcta estimación de esta propiedad es importante para poder modelar de manera realista los procesos hidrológicos y de erosión que ocurren en el suelo (Zimmermann *et all.* (2013) citados por Castiglion *et all.*, (2018)). Por lo tanto, la  $K_s$  es requerida por distintos modelos de crecimiento de cultivos y de movimiento de agua en el suelo, de la misma manera que muchas veces es necesaria para evaluar la calidad física edáfica (Gregorich *et all.* (1993) y Reynolds *et all.* (2000) citados por Castiglion *et all.*, 2018)).

### Relaciones de la textura y la *MO* con las *Pro-Hid* del suelo

Matus y Maire (2000) aseguraron que la acumulación de *MO* depende del aporte de material orgánico y de la textura del suelo hasta que un equilibrio es alcanzado, cuando la tasa de incorporación iguala a la tasa de mineralización, momento en el cual, ésta última, no dependería de la textura del suelo ni del contenido de *MO*. Por su parte, Julca *et all.* (2006) denominaron indistintamente *MO* o humus a la parte orgánica del suelo, que tiene efecto sobre sus propiedades físicas, al formar agregados y dar estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas para formar el complejo de cambio, favorece la penetración del agua al igual que su retención, disminuye la erosión y favorece el intercambio gaseoso, con lo cual se confiere un efecto muy marcado sobre las propiedades físicas del suelo.

La textura del suelo fue definida por Bravo (2000) como la proporción en que se encuentran las fracciones de tamaño disperso de los diámetros de las partículas primarias del suelo, y señalada por Feike *et all.*(1986) en categorías precisadas por el sistema de clasificación del Servicio de Conservación de Suelos y del *USDA*, como arena (con un tamaño de entre 50 y 2000 $\mu$ m), limo (con un tamaño de entre 2 - 50 $\mu$ m) y arcilla (con un tamaño menor de 2 $\mu$ m), según se muestra en la figura 1. Dexter *et all.* (2005) aseguraron que en la mayoría de los casos, el contenido de arcilla, el contenido de *MO* y la *Da* no son variables independientes y están fuertemente armonizados, al mencionar la correlación inversa entre el contenido de *MO* y el volumen de densidad. Por su parte, Saxton y Rawls (2006) aseguraron que la textura y la *MO* son variables primarias que afectan el  $\theta$  del suelo.



**Figura 1.** Triángulo textural de suelo de la USDA-SCS (tomado de Feike *et al.* 1986)

S = Sand (Arena), IS = loamy Sand (Areno francoso), sL = sandy Loam (Franco arenoso), sCL = sandy clay Loam (Franco arcillo arenoso), Si = Silt (limo), SiL = silt Loam (Franco limoso), cL = clay Loam (Franco arcilloso), L = Loam (Franco), siL = silt clay Loam (Franco arcillo limoso), sC = sandy Clay (Arcillo arenoso), siC = silt Clay (Arcillo limoso), C = Clay (Arcilla).

Cosby *et al.* (1984) citados por Saxton *et al.* (1986) demostraron claramente que la textura está relacionada con las características hidráulicas del suelo, cuando aplicaron análisis de regresión en la discriminación a dos grupos de datos. Posteriormente, Saxton *et al.* (1986), aseguraron que el contenido de arcilla es el factor más importante de la textura en la relación entre el  $\psi_h$  y el  $\theta$  en el suelo, al destacar.

Por otra parte, Arrieché *et al.* (2013) aseguraron que la *MO* es un componente importante de la calidad del suelo, al destacar la importancia de su cuantificación, ya que ésta contribuye de manera reconocida a la productividad de los suelos en la agricultura tradicional, por ser la base de su fertilidad. En éste sentido Sanchez *et al.* (2005) señalaron que la *MO* del suelo es una mezcla heterogénea de residuos de plantas y animales en varios estados de descomposición, de sustancias sintetizadas microbiológicamente y/o químicamente a partir de los productos de degradación, de los cuerpos de microorganismos vivos y muertos, pequeños animales y sus restos en descomposición.

### Fundamentos para la modelación de las *Pro-Hid* del suelo

Saxton *et al.* (1986) advirtieron que el  $\psi_h$  en el suelo y la relación de la *K* con el  $\theta$  en el mismo, son necesarios para muchos estudios de las relaciones agua-suelo-planta, pero que la medición de estas relaciones es costosa, difícil y a menudo poco práctica. Así, por ejemplo la *CC* se determina mejor en el campo, saturando el suelo y midiendo su

contenido de agua después de 48 horas de drenaje. El suelo a CC se siente muy húmedo en contacto con las manos (Shaxson y Barber, 2005).

Los cambios temporales en las propiedades del suelo constituyen indicadores de su funcionamiento y del manejo a que es sometido. Sin embargo, debe considerarse que, si bien, las propiedades físicas e hidráulicas del suelo pueden ser mejor comprendidas si se estudian de manera independiente, es bien sabido que entre ellas existe una estrecha interrelación y dependencia, que hace que de la interpretación de alguna se pueda inferir el comportamiento de otras (García *et al.*, 2012). De tal manera, que los análisis hidrológicos se logran comúnmente mediante la simulación por computadora de procesos individuales que luego se combinan en resultados más completos, para ser analizados mediante estadísticas o series de tiempo (Saxton y Rawls, 2006). Si bien los métodos modernos no ignoran los datos disponibles, la simulación de los procesos individuales, la recombinación en el paisaje y las respuestas de las cuencas a menudo revelan detalles adicionales más allá de los previamente disponibles, particularmente cuando los datos son limitados o son de difícil acceso.

A este respecto, por ejemplo, Cerana *et al.* (2005) citados por Barrios y Florentino (2008) señalaron las grandes dificultades para obtener valores confiables de  $K_s$  en suelos *Vertisoles* (expansivos y que se agrietan al secarse). Mientras que Filgueira *et al.* (2006) enfatizaron sobre el trabajado realizado en los últimos 15 años para encontrar un método rápido, sencillo y preciso que permitiera estimar dos *Pro-Hid* del suelo; la  $K_s$  ( $\text{mm h}^{-1}$ ) y la sortividad ( $S_0$ ) ( $\text{mm h}^{-1/2}$ ), de tal manera que parametrizaron una ecuación que permite, a partir de la porosidad efectiva, predecir la  $K_s$ , de manera que no fuera necesario el trabajo experimental para estimarla.

Por su parte, Zavala *et al.* (2018) reportaron la existencia de modelos analíticos que describen las *Pro-Hid* del suelo, clasificándolos como; *funciones de pedotransferencia* (establecidas sin considerar explícitamente las bases físicas del movimiento del agua en el suelo) y *modelos mecanicistas* basados en las leyes de Poiseuille y Laplace (que permiten representar detalladamente los mecanismos fundamentales del proceso a partir de leyes físicas). Así, evaluaron la capacidad descriptiva de los modelos fractales al comparar sus predicciones con datos experimentales.

Too *et al.* (2014) citados por Zavala *et al.* (2018) señalaron los estudios de la capacidad descriptiva de grupos de modelos para las *Pro Hid*. Sin embargo, la justificación de los modelos en el contexto de la teoría de la infiltración se ha considerado limitadamente, ya que la mayoría de los análisis evalúa sólo su flexibilidad para describir datos experimentales de campo o laboratorio. Por otra parte, Diersch (2014) citado por Zavala *et al.* (2018) mencionó que los modelos mecanicistas para las *Pro-Hid* están disponibles en programas de cómputo que simulan el flujo del agua en suelos parcialmente saturados.

### Descripción del modelo SPAW versión 6.02.75

El programa de simulación de los sistemas Suelo-Planta-Aire-Agua (SPAW, por sus siglas en inglés, disponible en <https://data.nal.usda.gov/nal-terms/computer->

*software?page=22*) para campos agrícolas y cuencas hidrográficas, es un modelo de balance hidrológico diario para campos agrícolas y estanques (humedales, lagunas, estanques y embalses), concebido por Saxton *et all.* (2006) para la programación del riego y el cálculo del balance de nitrógeno del suelo, por lo que resulta útil para comprender y gestionar el agua en la agricultura, la producción de las plantas y la utilización de nutrientes. Así, el modelo *SPAW* para computadora estima los contenidos diarios y el movimiento del agua y nutrientes para los suelos de campos agrícolas, además de los balances diarios de agua para humedales agrícolas, estanques y embalses.

En concordancia con lo anterior, Saxton *et all.* (2006) señalaron que en el balance hídrico, el modelo *SPAW* estima simultáneamente los componentes de; a) la atmósfera, ya que proporciona lluvia, energía de secado y viento conductor, b) el dosel vegetal y un sistema de raíces a medida que se desarrolla a lo largo de la temporada de crecimiento, c) el perfil de suelo, d) el agua almacenada y transportada en el suelo, e) el agua de riego añadida al sistema, y f) los nutrientes aplicados, almacenados e infiltrados en el suelo. De tal manera, que el modelo *SPAW* es un programa de computadora que puede ayudar a enseñar y asesorar a los agricultores sobre la administradores del recursos agua y el balance de nutrientes en el suelo. Algunos usos comunes para el balance hidrológico en campos agrícolas y estanques, se mencionan a continuación:

- Evalúa el clima diario y el estado del agua del suelo en la producción de cultivos.
- Desarrolla el riego óptimo y planes de aplicación química.
- Evalúa el movimiento del agua y químicos a las aguas subterráneas.
- Evalúa la frecuencia y duración de las inundaciones de humedales.
- Diseña estanques para el abastecimiento de agua, incluido el riego.
- Diseño de lagunas de almacenamiento.

#### Restricciones del modelo *SPAW* versión 6.02.75

Los suelos con un contenido de *MO* mayor de 8%, fueron omitidos del conjunto de datos analizados por Saxton y Rawls (2006) por considerarlos como suelos orgánicos, cuyas características del agua no serían representativas de los suelos minerales típicos, de tal modo, que las ecuaciones que relacionan el efecto de la *MO*, como variable dependiente, con la capacidad de retención de agua y *K* de los suelos, no deben aplicarse más allá del 8% en peso de *MO*, ya que no se espera que estos ajustes se apliquen más allá del contenido de *MO* de los suelos agrícolas dominados por minerales típicos, clasificados generalmente como altamente orgánicos o turba.

Así mismo, Saxton y Rawls (2006) omitieron de la base de datos aquellas muestras con valores extremos de *Da* ( $< 1,0$  y  $> 1,8 \text{ Mg (m}^3\text{)}^{-1}$ ) y contenido de arcilla ( $> 60\%$ ), debido a que las muestras fuera del rango pudieron haber sido el resultado de la labranza o la compactación, lo que las hace diferentes a los suelos naturales, para efectos de la *Da*, y que los suelos con un contenido muy alto de arcilla a menudo tienen una estructura de poros y efectos mineralógicos diferentes a los que contienen porciones más altas de

fracciones de arena o limo. Finalmente, y sin menoscabo de las capacidades o limitantes de modelo *SPAW*, la obtención de datos lo más representativos posible de la muestra a caracterizar, permitirá realizar simulaciones más ajustadas a la realidad (Fontanet *et all.*, (2022).

## Conclusiones

La modelación de procesos de las relaciones agua-suelo-planta en la gestión del recurso hídrico del suelo y manejo de cultivos mediante modelos informáticos, es un procedimiento o método generalmente válido para resolver problemas relacionados con estos, al poseer un valor útil y representar una oportunidad actual para el análisis.

El modelo *SPAW* está fundamentado en el desarrollo e incorporación de modelos analíticos (funciones de pedotransferencia y/o mecanicistas) desarrollados previamente.

El conocimiento y cálculo de las *Pro-Hid* del suelo proporcionan información acerca de cómo se comporta el agua en el suelo. Esto permite conocer las relaciones entre los parámetros implicados (curva de retención de humedad y la *K*) y su dependencia del manejo agrícola realizado.

El programa *SPAW* limita los análisis a aquellos suelos cuyos valores sean inferiores al 8 y 60% del contenido de *MO* y del contenido de arcilla, respectivamente, además de los suelos con un valor de *Da* de entre 1,0 y 1,8 Mg (m<sup>3</sup>)<sup>-1</sup>.

## Referencias Bibliográficas

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements* (First ed.). Roma: FAO, Irrigation and Drenaje Paper N° 56.
- Arrieche, I., Ruíz, M., Carrillo, C., León, M., Aular, L., Mora, R., Castillo, L., Tovar, M., Martínez, A., Díaz, T., Baptista, H., Cruz, J., Reveron, A., Silva, C., Alfonzo, N. (2013). Unificación de criterios para la determinación de la materia orgánica del suelo. Estudio interlaboratorio. *Revista Venesuelos*, 21, 33-42.
- Barrios, R. y Florentino, A. (2008). Propiedades hidráulicas de dos suelos subirrigados cultivados con Palmaaceitera en el estado Monagas, Venezuela. *Revista Agronomía Tropical*, 58(2), 155-162.
- Bermejo, L., García, A. y Soler, L. (2021). Influencia de la vegetación en la conductividad hidráulica en tres tipos de coberturas forestales. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(2), 52-60.
- Bravo, S. (2000). *Aspectos básicos de química de suelos*. Barinas, Venezuela: Colección Ciencia y Tecnología, Ediciones de la Universidad Ezequiel Zamora.

- Castiglion, M., Kraemer, F. y Marquez, J. (2018). Conductividad hidráulica saturada determinada por distintos procedimientos en suelos con alta humedad inicial. *Revista Ciencia del Suelo (Argentina)*, 36(2), 158-169.
- Claro, F. (1991). *Balance hídrico*. Instituto colombiano de hidrología, meteorología y adecuación de tierras (HIMAT), Santa fe de Bogotá. Pp. 34.
- Copa, R. (2014). *Propiedades hidrofísicas y químicas del suelo para el mejoramiento del sistema de riego y su uso sostenible*. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Agronomía, Unidad de Postgrado, Maestría en Ingeniería de Riego, La Paz, Bolivia.
- Dexter, A., Czyz, E., Birkás, M., Díaz, E., Dumitru, E., Enache, R., Fleige, H., Horn, R., Rajkaj, K., de la Rosa, D. y Simota, C. (2005). SIDASS project Part 3. The optimum and the range of water content for tillage – further developments. *Journal Soil & Tillage Research*, 82, 29-37.
- Feike, L., William, A., Martinus, v. G. y Williams, J. (1986). The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database User's Manual Version 1.0. National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Cincinnati: Ohio 45268.
- Filgueira, R., Soracco, C., Sarli, G. y Fournier, L. (2006). Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Revista Ciencia del Suelo*, 24(1).
- Fontanet, M., Rodrigo, G., Arbat, G., Marsal, J. y Ferrer, F. (2022). Nuevos métodos experimentales para la obtención de los parámetros hidráulicos del suelo utilizados en modelos de simulación del movimiento de agua y la lixiviación de nitratos. *Acta de Horticultura Nº 66, V jornadas del grupo de fertilización SECH*, (págs. 200-205).
- García, Y., Ramírez, W. y Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Revista Pastos y Forrajes*, 35(2), 125-138.
- González, W. (2016). La modelación como competencia en la formación del profesional informático. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 10(2), 59-71.
- Julca, A., Meneses, L., Blas, R. y Bello, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Revista Idesia*, 24(1), 49-61.

- Matus, F. y Maire, C. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Revista Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126.
- Morles, V. (2002). Sobre la metodología como ciencia y el método científico: un espacio polémico. *Revista de Pedagogía*, 23(66), 121-146.
- Pérez, M. y Florentino, A. (2013). Intervalo de agua menos limitante en función de propiedades del suelo. *Revista Venesuelos*, 21, 43-60.
- Real, M., Bosch-Serra, À. y Lidón, A. (2016). *Caracterización hidráulica del suelo: implicaciones agronómicas y ambientales*. Recuperado el 02 de agosto de 2023, de Interempresas: Plataforma multisectorial de información especializada para empresas y profesionales: <https://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/163820-Characterizacion-hidraulica-del-suelo-implicaciones-agronomicas-y-ambientales.html>
- Sanchez, B., Ruiz, M. y Rios, M. (2005). Sanchez, B. Materia orgánica y actividad biológica del suelo en relación con la altitud, en la cuenca del río Maracay, estado Aragua. *Revista Agronomía Tropical*, 55(4), 507-534.
- Saxton, K. E. y Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions.
- Saxton, K., Rawls, W., Romberger, J. S. y Papendick, R. I. (1986). Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Trans. Amer. Soc. Agri. Engr.*, 50(4), 1031-1035.
- Saxton, K., Willey, P. y Rawls, W. (2006). *The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation*. (Editors, & C. Press, Edits.) Chapter 17 in: *Mathematical Modeling of Watershed Hydrology*, V. P. Singh and D. Frevert. 401-435.
- Shaxson, F. y Barber, R. (2005). *Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo*. Roma: Boletín de suelos de la FAO, número 79. Servicio de Manejo de las Tierras y de la Nutrición de Plantas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Zavala, M., Saucedo, H. y Fuentes, C. (2018). Modelos analíticos fractales para las propiedades hidráulicas de suelos no saturados. *Revista Agrociencia*, 52, 1059-1070.