

CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA Y NO SATURADA EN CONDICIONES DE CAMPO UTILIZANDO EL DIVINER 2000 LA CONCORDIA, ESMERALDAS 2010

Gabriel Chimbo¹ y Marcelo Calvache²

¹ *Asociación Nacional de Cultivadores de Palma Aceitera (ANCUPA). Becario Tesista. Correo electrónico: gabrielchimboyepez@gmail.com*

² *Universidad Central del Ecuador. Decano de la Facultad de Ciencias Agrícolas.*

RESUMEN

Uno de los parámetros más importantes que se debe considerar en un suelo previo la dotación de riego es la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración, ya que estos influyen en la cantidad y tiempo que permanece el agua en la zona radical de la planta y es aprovechable para ella. Existen varias metodologías para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada como son: Cilindros infiltrómetros sencillos y dobles, Cilindros de carga constante, Tazas, Surcos infiltrómetros, mientras que para medir la humedad del suelo y determinar la conductividad hidráulica no saturada se pueden utilizar equipos como: DIVINER 2000, sonda de neutrones y tensiómetros. Sin duda uno de los cultivos de mayor rentabilidad y crecimiento en el país es el de la Palma Aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.), por tal motivo se llevó a cabo esta investigación en el Centro de Investigaciones en Palma Aceitera (CIPAL), durante el mes de Agosto y Septiembre del 2010, con el fin de evaluar la conductividad hidráulica no saturada y saturada de este suelo; y con el fin de conocer la utilidad para el cálculo de una metodología más moderna y mucho más exacta como el DIVINER 2000. Como resultados de esta investigación se obtuvo una ecuación de la conductividad hidráulica a los 100cm de profundidad, $y = 0,4809x - 16,482$; donde X= humedad volumétrica (%) y $Y = \log k$ (mm/día),

Palabras clave: Conductividad Hidráulica saturada y no saturada, Cilindros infiltrómetros, infiltración, DIVINER 2000.

INTRODUCCION

Previo el estudio de la conductividad hidráulica es necesario conocer cuál es el agua que se pierde por percolación o su paso a capas más bajas del suelo, misma que se conoce como agua gravitacional. Ocupa temporalmente el volumen de aireación, que fluye bajo la acción de la gravedad, al no poderla sostener el suelo. En realidad y pese a la gran difusión de los dos conceptos, es prácticamente imposible dividir el agua que un suelo retiene, entre agua capilar y agua adsorbida, ya que el agua, debido al carácter polar de su molécula, no forma nunca capas monomoléculares sobre las partículas sólidas y por otro lado existen capilares de diámetro suficiente para unas pocas moléculas de agua solamente. (Calvache 2009)

La conductividad hidráulica puede definirse como la capacidad de transmisión de agua de los suelos, esta puede ser saturada o no saturada. En la práctica sólo se usa la conductividad hidráulica saturada, comúnmente llamada permeabilidad. Esta propiedad de los suelos depende en gran parte de la textura de los suelos. La conductividad hidráulica saturada (permeabilidad), es fundamental para los estudios de drenaje y agua subterránea. Su medición se puede realizar en el laboratorio, sin embargo la mejor manera es hacerla en el campo (Calvache y Reichardt, 1996)

La variabilidad espacial de conductividad hidráulica del suelo debe ser considerada en los modelos hidrológicos distribuidos, ya que hay que representar correctamente el comportamiento de la infiltración y la generación de escorrentía de origen superficial o subsuperficial dentro de una cuenca de drenaje debido a que las heterogeneidades espaciales en las respuestas de los sistemas hidrológicos no son bien representadas por los valores medios de los parámetros y una componente importante en estos modelos son la infiltración, el drenaje y lixiviado de sustancias químicas que se encuentran

fuertemente influenciados por la magnitud y distribución espacial de la conductividad hidráulica saturada de campo (Greacen, 1981)

El conocimiento de la conductividad hidráulica es esencial en los estudios de conducción de agua y eficiencia de riego, y en el diseño de sistemas de drenaje para la eliminación de excesos de agua y en la recuperación de suelos salinos y alcalinos. En régimen de flujo saturado, la conductividad hidráulica es constante (suponiendo el suelo uniforme), mientras que en flujo no saturado depende del rozamiento del agua con las paredes de los poros, por lo que tendrá un valor menor que en flujo saturado. En un suelo no saturado su conductividad hidráulica varía con el contenido de agua. Ésta circula mejor por los poros de mayor tamaño, que son los primeros que se vacían al pasar de mayor a menor contenido de agua. Por eso, la conductividad en suelos no saturados disminuye muy de prisa conforme disminuye el contenido de agua (Fuentes, 2003)

Conductividad hidráulica no saturada

En este caso, debido al menor contenido de humedad, el área seccional través de la cual ocurre el flujo es menor, y con ello la permeabilidad disminuye. Sin embargo, en este caso, como en el flujo en suelos saturados, el movimiento del agua se debe a diferencias de potencial, y ocurre siempre en dirección en la que disminuye la energía. Las dificultades que se presentan en la medición del flujo en suelos no saturado se debe principalmente a los cambios en el área de flujo a medida que varía el contenido de humedad, y a la necesidad de medir presiones negativas (IAEA, 1990).

Muchos factores afectan a la permeabilidad del suelo. En ocasiones, se trata de factores en extremo localizados, como fisuras y cárcavas, y es difícil hallar valores representativos de la permeabilidad a partir de mediciones reales. Un estudio serio de los perfiles de suelo proporciona una indispensable comprobación de dichas mediciones. Las observaciones sobre la textura del suelo, su estructura, consistencia, color y manchas de color, la disposición por capas, los poros visibles y la profundidad de las capas impermeables como la roca madre y la capa de arcilla, constituyen la base para decidir si es probable que las mediciones de la permeabilidad sean representativas.

La permeabilidad está condicionada fundamentalmente por la textura y la estructura. Se evalúa por la velocidad de infiltración que representa el caudal de agua que puede pasar por unidad de tiempo. Valores de dm/hora corresponden a suelos muy permeables, cm/hora dan suelos permeables y mm/hora para suelos poco permeables (CALVACHE, 2010).

El sistema FDR calcula la humedad de un suelo mediante la respuesta a cambios en la constante dieléctrica del medio usando una técnica de reflectometría de dominio de frecuencias conocida como capacitancia. Este tipo de sistemas de medida ofrece grandes ventajas con respecto a otros métodos, como son la posibilidad de obtener un gran número de medidas, de forma continuada, y sin disturbar las propiedades del suelo, sin embargo cuentan con una serie de inconvenientes a veces difíciles de resolver. Entre ellos está la necesidad de realizar calibraciones que requieren de mucho tiempo, debido al elevado número de repeticiones que son necesarias con el fin de obtener un amplio rango de humedades. Estas calibraciones resultan ser de carácter casi obligado en suelos con elevada salinidad, elevados contenidos en materia orgánica, o un alto porcentaje de arcillas. Otra de las dificultades que plantean el uso de este tipo de sondas, es el escaso volumen de suelo al que vienen referidas las medidas, lo cual implica que pequeñas variaciones en el medio como la existencia de grietas o una cierta pedregosidad, pueden influenciar drásticamente en los valores obtenidos (IAEA, 1990).

El método FDR se basa en la relación existente entre el contenido volumétrico de humedad y la constante dieléctrica aparente del medio. Dicha constante se determina a partir del tiempo de tránsito de una señal electromagnética a lo largo de una sonda metálica introducida en el suelo. Cada sensor de 5.1 cm. de diámetro y 7.5 cm. de longitud, mide en una distancia axial de 10 cm., aunque aproximadamente el 93% de la señal radial sólo afecta a una distancia de tres centímetros del tubo de acceso (IAEA, 1990).

Los objetivos del trabajo fueron: Determinar la curva de infiltración del suelo del Centro de Investigaciones en Palma Aceitera (CIPAL). Determinar la Conductividad Hidráulica no saturada en condiciones de campo. Demostrar la utilidad de la tecnología FDR para obtener la conductividad hidráulica de un suelo

MATERIALES Y METODOS

Características del sitio experimental. El presente trabajo de investigación fue realizado en el CIPAL-ANCUPA, ubicado en la Provincia de Esmeraldas **Cantón:**La Concordia **Sector:** CIPAL (km 37.5 vía Sto. Domingo, Quinindé.) **Altitud:** 260 m.s.n.m. **Latitud:** 00°06'49" **Longitud:**78°29'11" O

Características climáticas. Temperatura promedio anual: 26.0 °C; Precipitación promedio anual: 1500-1800 mm.; Humedad relativa promedio anual: 75 %; Velocidad promedio anual del viento: 11 km/h Sur-este; Luminosidad: 1400 horas sol/año; Zona Ecológica : Bosque húmedo tropical (bh-T) ; Textura: Franco limoso

Conductividad hidráulica no saturada.

Para la determinación de la Conductividad Hidráulica no saturada, por el método del Perfil Instantáneo, (Calvache y Reichardt, 1996), se seleccionó un área plana de 10 x 10 m (100 m²) en un suelo Dystrandep, ubicado en el CIPAL. En esta área fueron instalados tubos de acceso para el DIVINER hasta las profundidades de 100 cm. El área fue inundada, manteniéndose una pequeña lámina constante de agua arriba de la superficie del suelo, hasta que la velocidad de infiltración se estabilizó, lo que pudo ser observado por medio de cilindros infiltrómetros. La velocidad de infiltración es el valor máximo de $K = K_0$ que corresponde al valor de la humedad de saturación del suelo.

Terminada la infiltración, se inicia el proceso de redistribución del agua, gobernado principalmente por el potencial gravitacional, y el suelo sufre drenaje interno. La superficie fue cubierta con una lona plástica, para evitar pérdidas de agua por evaporación. Considerando el inicio de la redistribución como $t = 0$, se realizaron mediciones de humedad del suelo en varios tiempos y en las profundidades seleccionadas, obteniéndose datos de humedad y tiempo como se muestran en el Cuadro 1.

Los cálculos de K fueron realizados a través del método conocido como "método del perfil instantáneo" (IAEA, 1984). Este método ha sido utilizado por muchos investigadores para determinar la conductividad hidráulica de suelos bien drenados. Libardi et al (1980), Sisson, (1980), citados por IAEA (1984).

Conductividad hidráulica saturada. Se utilizaron los cilindros infiltrómetros dobles (Calvache, 2009), el de menor diámetro se introdujo 15 – 20 cm en el suelo y el otro se colocó concéntrico con el anterior y a menor profundidad que este último. Se llenó de agua el espacio entre ambos cilindros hasta una altura de 25 – 30 cm y se mantuvo esa altura de agua durante todo el proceso. Inmediatamente, se llenó de agua el cilindro interior hasta una altura de 15-20 cm. Se realizan mediciones de la altura de agua del cilindro interior a intervalos periódicos de 5 minutos., con estos datos se calculó la cantidad de agua infiltrada durante un determinado tiempo.

RESULTADOS

En el Cuadro 1, se presentan los datos de la humedad volumétrica (%), en función de la profundidad y del tiempo de lectura, después del libre drenaje. Se observa en los gráficos 2 a 6, que la humedad del suelo disminuye en función del tiempo de drenaje, ajustándose perfectamente a una regresión lineal con el log del tiempo. Con estos resultados se obtuvieron los valores de Conductividad Hidráulica en función de la humedad a la profundidad de 100 cm, siguiendo el método del perfil instantáneo descrito por Calvache (2003).

Cuadro 1. Cálculo de la conductividad hidráulica no saturada utilizando los datos obtenidos con el DIVINER 2000. La Concordia, Esmeraldas 2010.

Perfil del suelo	Momentos de lectura de la humedad (mm agua/10cmsuelo)						
	0	6,3	19,4	30,1	54,1	65,1	319,6
10 cm	41,338	34,537	33,417	31,165	30,787	29,910	28,930
20 cm	41,918	41,773	40,833	40,761	40,331	39,830	39,410
30 cm	43,016	42,137	40,403	40,117	39,904	39,120	38,910
40 cm	45,100	45,025	44,201	43,237	43,978	43,680	41,770
50 cm	45,401	45,477	44,425	44,052	43,904	43,530	42,060
60 cm	43,904	43,459	42,942	43,163	42,209	41,990	39,970
70 cm	41,338	40,117	39,195	39,620	38,773	38,140	36,630
80 cm	42,283	41,555	41,555	40,977	40,761	40,550	38,840
90 cm	36,763	35,339	35,272	34,471	34,074	34,010	32,440
100 cm	38,493	37,106	36,695	35,811	35,676	35,610	33,740
Humedad (mm agua/10cm de suelo)	41,955	40,652	39,894	39,338	39,040	38,637	37,270
Hva (cm³/cm³)	0,420	0,407	0,399	0,393	0,390	0,386	0,373
A mm	419,553	406,524	398,939	393,375	390,397	386,370	372,700
ΔA mm		13,029	7,586	5,564	2,978	4,027	13,670
k mm/h		2,076	0,577	0,523	0,124	0,363	0,054
k(mm/día)		49,815	13,842	12,546	2,980	8,724	1,289
Hvb cm³ cm⁻³		37,800	36,901	36,253	35,743	35,643	34,675

En el Grafico 1, se describe la ecuación del log de la Conductividad Hidráulica (mm/día) en función de la humedad volumétrica (%), medida con el DIVINER, a la profundidad de 100 cm. Con esta ecuación se puede calcular el drenaje profundo, a cualquier valor de humedad. Por ejemplo, a una humedad del 49% , el suelo drenaría a una velocidad de 525 mm/día; a una humedad del 37 %, el suelo drenaría a una velocidad de 19 mm/día y a una humedad del 20%, el flujo de drenaje sería muy despreciable (0,00000013 mm/día)

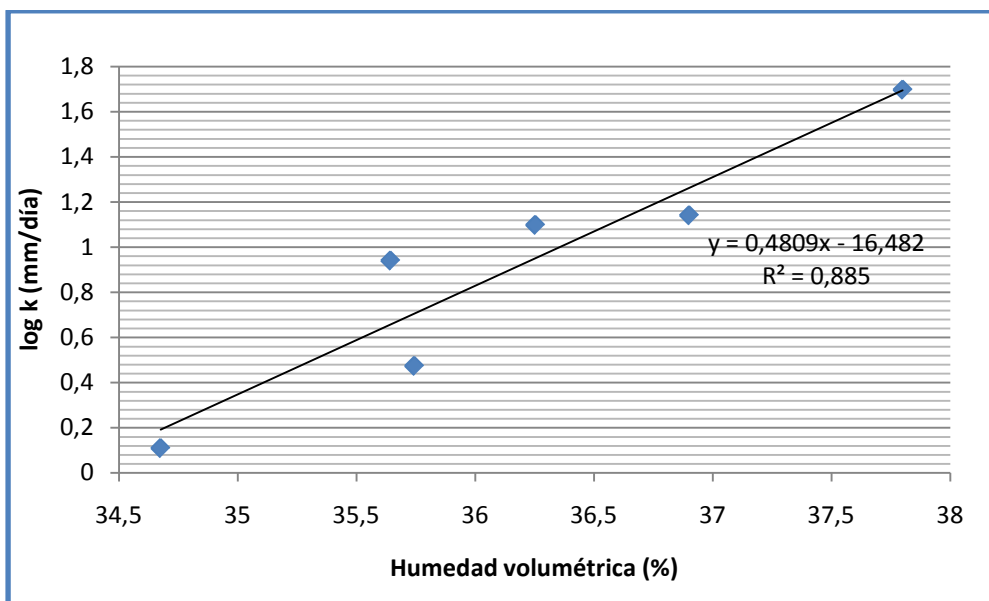


Gráfico 1. Recta de regresión de la humedad volumétrica vs el logaritmo de la conductividad hidráulica en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

En los gráficos 2 al 6 se describen las rectas de humedad versus el log del tiempo en horas, observándose un alto coeficiente de regresión. Este modelo ha sido encontrado por varios autores (Gracen, 1981, Calvache y Reichardt, 1996, IAEA, 1990)

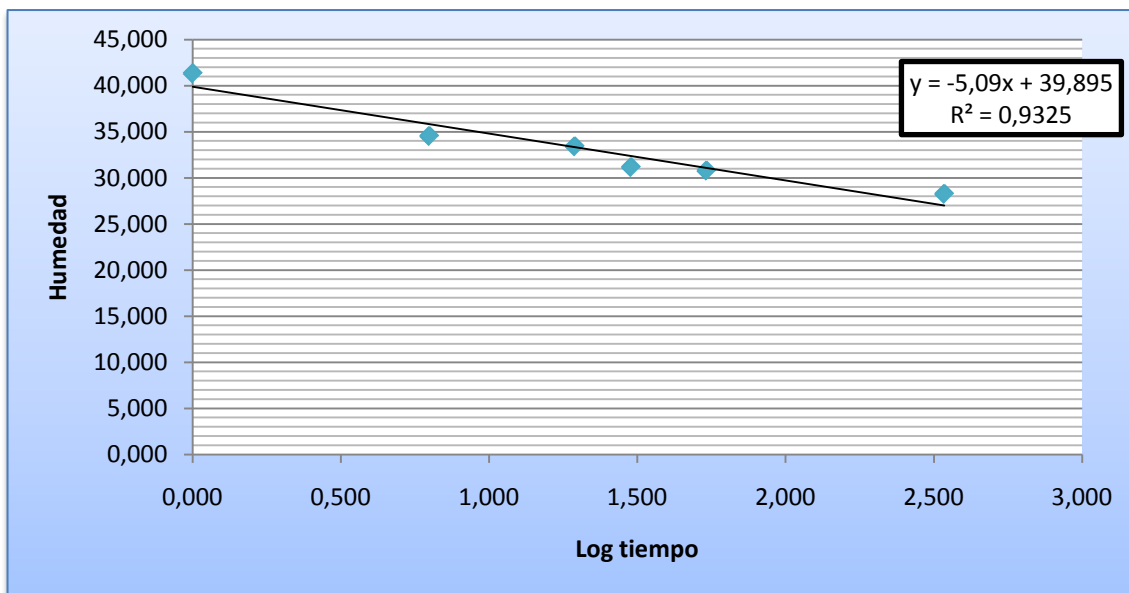


Gráfico 2. Recta de regresión de la humedad volumétrica a 10 cm de profundidad vs el logaritmo del tiempo en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

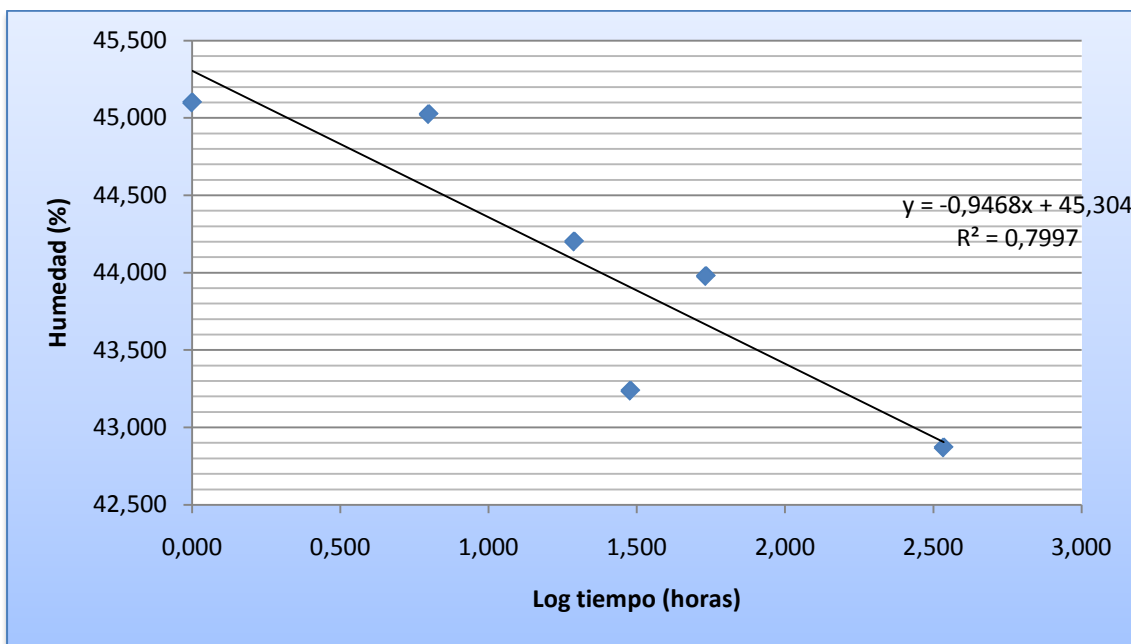


Gráfico 3. Recta de regresión de la humedad volumétrica a 40 cm de profundidad vs el logaritmo del tiempo en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

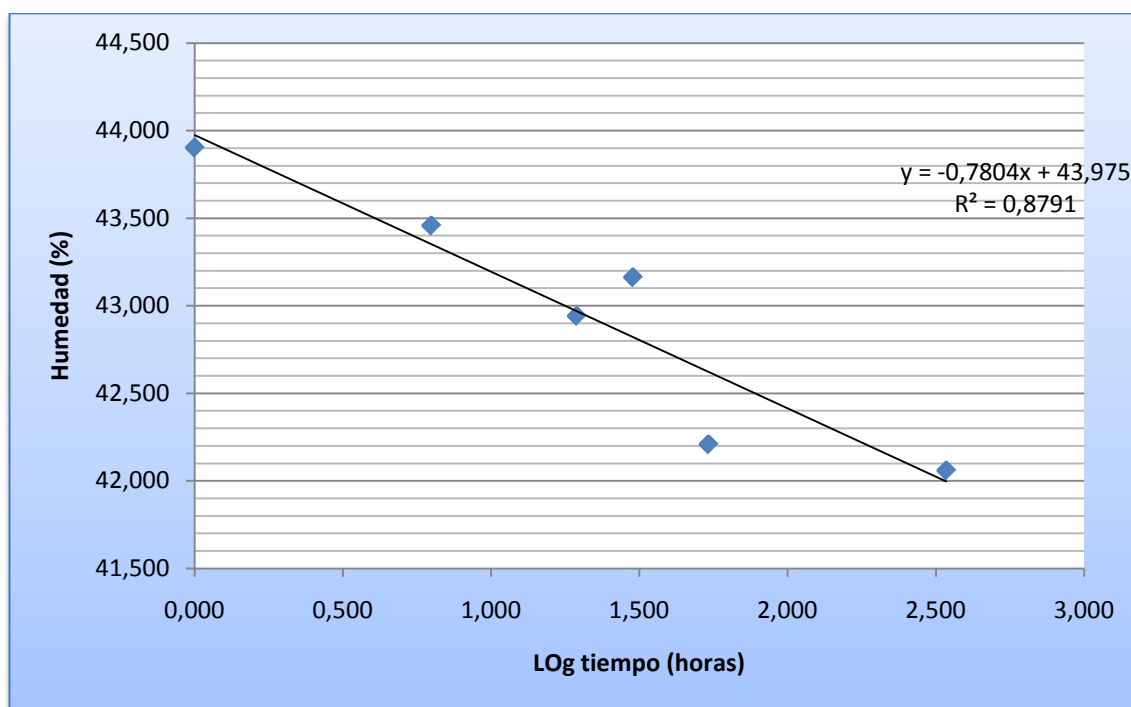


Gráfico 4. Recta de regresión de la humedad volumétrica a 60 cm de profundidad vs el logaritmo del tiempo en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

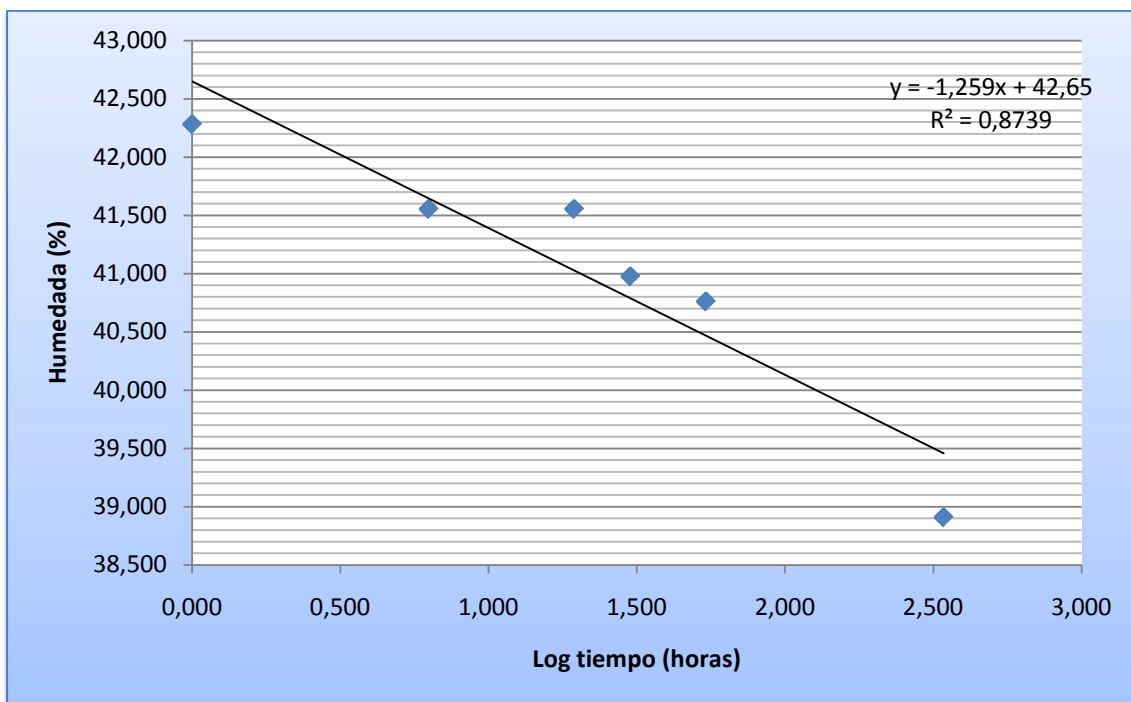


Gráfico 5. Recta de regresión de la humedad volumétrica a 80 cm de profundidad vs el logaritmo del tiempo en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

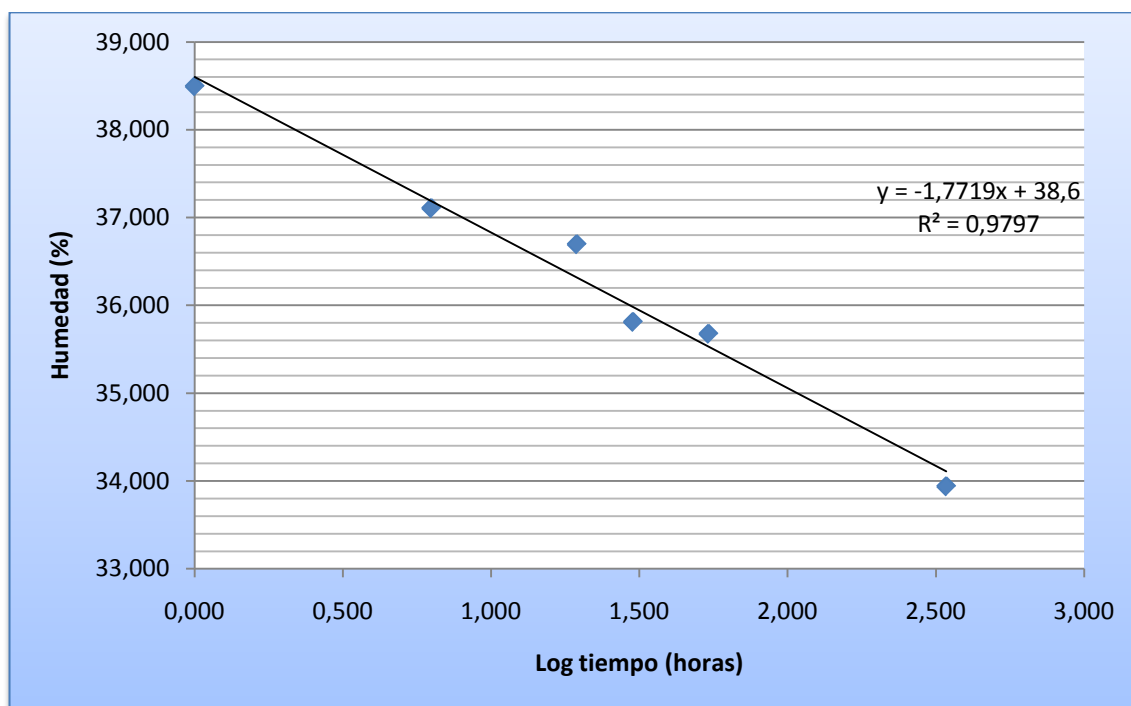


Gráfico 6. Recta de regresión de la humedad volumétrica a 100 cm de profundidad vs el logaritmo del tiempo en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el Diviner 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

En el Cuadro 2, se presentan los datos de la infiltración básica e infiltración acumulada. La Infiltración básica o Conductividad hidráulica saturada, se estabiliza entre los 70 y 90 minutos de

saturación, con valores de 80 mm/hora o 1920 mm/día, lo que le clasifica a este suelo como muy permeable.

En el Grafico 6 se encuentra la regresión entre el log de la Infiltración acumulada (mm) y el log del tiempo acumulado (minutos), con un coeficiente de regresión de 0.99, que describe muy bien el fenómeno encontrado por varios autores (Hidalgo y Calvache, 2007; Calvache, 2009).

Con esta curva, se puede determinar la infiltración acumulada en cualquier tiempo. Por ejemplo a los 100 minutos de tiempo de infiltración ($\log 100 = 2$), la columna de agua infiltrada seria de 209 mm. De esta forma se puede estimar la lamina de riego que se puede aplicar en el suelo y el tiempo de oportunidad.

Cuadro 2. Cálculo de la velocidad de infiltración en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000, La Concordia, Esmeraldas 2010.

TASA DE INFILTRACIÓN						
t (min)	t ac. (min)	lect (mm)	Δ. Infil (mm)	Infil (mm/h)	infil ac. (mm)	Tasa infiltr.(mm/h ora)
0	0	42				
5	5	59	17	204	17	204,00
5	10	75	16	192	33	198,00
5	15	88	13	156	46	184,00
5	20	101	13	156	59	177,00
5	25	113	12	144	71	170,40
3	28	30		0	71	152,14
5	33	45	15	180	86	156,36
5	38	55	10	120	96	151,58
5	43	68	13	156	109	152,09
5	48	79	11	132	120	150,00
5	53	87	8	96	128	144,91
1	54	35		0	128	142,22
5	59	45	10	120	138	140,34
10	69	59	14	84	152	132,17
10	79	71	12	72	164	124,56
10	89	85	14	84	178	120,00

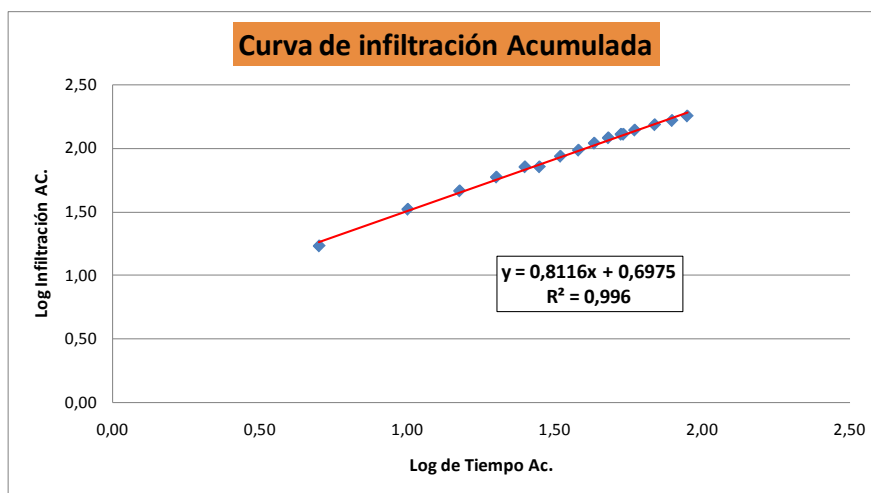


Gráfico 7. Recta de regresión de la curva de infiltración acumulada en el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en condiciones de campo utilizando el DIVINER 2000 La Concordia, Esmeraldas 2010.

CONCLUSIONES

- ✓ La ecuación que permite conocer la conductividad hidráulica no saturada (Y= mm/hora) a partir de datos de humedad volumetrica(x) es $y = 1,241x + 14,91$; la misma que tiene un coeficiente de determinación fue de 0,89.
- ✓ La metodología para la determinación de la conductividad hidráulica saturada, con el DIVINER 2000, es mucho más exacta que otros métodos utilizados en estudios anteriores.
- ✓ Es necesario realizar la determinación de la conductividad hidráulica de un suelo para conocer que cantidad de nutrientes se van a lixiviar una vez que se haya dado riego o se produzca una fuerte lluvia.
- ✓ El cálculo de conductividad hidráulica no saturada con el DIVINER 2000 permite programar el riego, ya que permite calcular el valor exacto del agua que se percola a las capas más bajas del suelo.
- ✓ La tasa de infiltración en el suelo del CIPAL es de 120,00 mm/hora.
- ✓ La ecuación que permite conocer la conductividad hidráulica saturada a partir de datos de humedad (%) es $y = 0,8116x + 0,6975$; la misma que tiene un coeficiente de determinación fue de 0,99.

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar este tipo de ensayos previa la instalación de un sistema riego ya que esto permite mejorar la manera en que se da riego a un cultivo.
- ✓ Realizar este tipo de ensayos previo la realización de un balance hídrico sea cual sea el cultivo que se fuera a instalar, ya que esto nos permite conocer cuanta agua se pierde por efecto del drenaje.
- ✓ Realizar el ensayo de conductividad hidráulica saturada y no saturada en suelos que tienden al anegamiento, ya que de esta manera es posible realizar con exactitud un buen sistema de drenaje.

BIBLIOGRAFIA

- Calvache, 2003. Uso de sondas nucleares en Física de Suelos. Escuela Latinoamericana de Física de Suelos. La Serena, Chile. 12 p
- Calvache. 2009. Física de suelos en la Agricultura. Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrícolas, 120 p.
- Calvache, M., y K. Reichardt. 1996. Efeito de épocas de deficiência hídrica na eficiência do uso de nitrogênio na cultura de feijão cv. Imbabello. Scientia Agricola, 53(2/3), 343-353.
- Fuentes, J. 2003. “Técnicas de riego” España 483pp.
- Greacen, L. 1981. Soil water assessment by the neutron method. CSIRO, Australia. 20 p
- Hidalgo, D., y M. Calvache. 2007. “Influencia del Riego en el Comportamiento de tres híbridos tenera de Palma Aceitera (*Elaeis guineensis Jacq*) de dos años de edad. La Concordia, Pichincha”. Revista Rumipamba. Vol. XXI – No. 1 15p.
- IAEA. 1984. Field soil-water properties measured through radiation techniques. Technical Report Series N° 312. Vienna, Austria.
- IAEA. 1990. Use of nuclear techniques in studies of soil-plan relationships. Training Course Series N° 2. Vienna, Austria.