USO DE UN EQUIPO DE NEUTRONES PARA MEDICIONES DE PERFILES DE HUMEDAD DEL SUELO Y DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION

HERNAN BREINBAUER CADAGAN
Ing. Civil U. de Chile

SANTIAGO, Junio 1970.-

Uso de un equipo de neutrones para mediciones de perfiles de humedad del suelo y determinación de la evapotranspiración.

HERNAN BREINBAUER CADAGAN.

Ing. Civil U. de Chile.

BIBLIOTECA IREN

SANTIAGO, JUNIO

1970.

1.- INTRODUCCION :

Este trabajo resume parte de los resultados obtenidos en una investigación más general realizada en la Sección Hidrología y Riego de la Universidad de Chile y que el autor ha desarrollado como tema de memoria como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Civil. El tema fue propuesto y dirigido por el Profesor Ingeniero Basilio Espíldora C., Jefe de la Sección Hidrología y Riego.

Esta investigación tiene por objeto contribuir al estudio de las tasas de riego en Chile, aplicando ciertas técnicas de medición y equipo que aún, no se han generalizado en nuestro país. Básicamente consiste en el estudio cualitativo y cuantitativo de la aplicación del agua de riego y evapotranspiración (E. T.) en un cultivo de trébol rosado, delimitado para ello una superficie de 1/2 hectárea.

La etapa de experimentación se desarrolló en los terrenos de la estación experimental agrícola de la Universidad Católica en Pirque, entre Diciembre de 1967 y Junio de 1968.

En terreno se efectuaron las siguientes mediciones:

a) Determinación de parámetros meteorológicos (radiación, insolación, evaporación, temperaturas, humedad relativa y precipitación) en una estación adyacente con el objeto de correlacion r las determinaciones directas de E.T. que se obtendrían.

b) Determinación de las características del suelo.

c) Medición del agua de riego aplicada y derremes mediante aforadores Parshall.

d) Medición continuada del estado y variación de la humedad del suelo a lo largo del período de experimentación, mediante un equipo de neutrones (neutrón meter).

Estas mediciones tuvieron por objeto analizar específicamente los siguientes aspectos:

a) Estudio de la penetración y movimiento del agua de riego y/o lluvia y de su uniformidad sobre el campo.

b) Determinación de las eficiencias reales de los riegos.

c) Calibración y posibilidades de uso práctico de un equipo medidor de neutrones para determinar perfiles continuados de humedad del suelo.

d) Determinación de la E. T. del cultivo mediante un balance hídrico del suelo, su correlación con algunos parámetros meteorológicos y su comparación con el valor obtenido con otros métodos empíricos y semi empíricos.

2.- DESCRIPCION DEL EQUIPO USADO :

Del equipo de neutrones usado para la determinación de perfiles de humedad de suelo, esta basado en la pérdida de velocidad que experimentan neutrones de alta energía al chocar elásticamente con los núcleos de los átomos del medio.

Los neutrones que a través de estos choques pierden gran parte de su energía, hasta alcanzar una que es característica para la temperatura ambiente, se denominan neutrones lentos o térmicos.

Debido a la similitud de masa entre los neutrones y los núcleos de hidrógeno, éstos son los elementos más eficaces para reducir la energía cinética de los neutrones rápidos. Además, en un suelo, la probabilidad que ocurran estos choques con los núcleos de hidrógeno es mayor a la de la mayor parte de los otros elementos presentes en él.

Estos dos hechos hacen que el hidrógeno sea el medio más eficaz para reducir la velocidad de los neutrones.

En general en un suelo el hidrógeno se presenta principalmente constituyéndo moléculas de agua, por lo tanto la densidad de neutrones lentos que se forman alrededor de una fuente de neutrones rápidos se puede correlacionar con el contenido de agua en volumen, mediante una curva de calibración.

Hay que tener presente, sin embargo, que en realidad se determina la proporción de átomps de hidrógeno y no de moléculas de agua, por lo que la presencia de compuestos que contengan hidrógeno, tales como la materia orgánica, pueden afectar las medidas. En suelos con bajo a mediano contenido de materia orgánica (1 - 5%) no se requiere corrección por este motivo y basta una curva de calibración standard.

La presencia de cierta proporción de algunos elementos buenos absorbentes de neutrones lentos tales como: Boro, Cloro, Cadmio, Litio y Manganeso hacen disminuir el número de neutrones que llegan al detector.

El equipo de neutrones usados corresponde al modelo diseñado por la Nuclear Chicago.(1) Este equipo consta de una probeta emisora y detectora (Modelo P - 19) y de un escalímetro o equipo medidor de impulsos (Modelo 2800 A).

La probeta de un cilindro metálico de 38 cm. de altura y 38 mm. de diámetro en cuyo interior están incluídos una fuente de 4,5 milicurie de Radio (226) Berilio, que emite neutrones de alta energía, un detector de neutrones lentos de Trifluoruro de Boro y un preamplificador transistorizado. Cuando no se realizan medidas la probeta, cilíndrica se coloca dentro de un cilindro mayor (que contiene plomo y parafina) que sirve de protección contra las radiaciones y para efectuar medidas standard. Para hacer las medidas, debe colocarse en el suelo un tubo de acceso hasta la profundidad en que se quiere determinar el perfil de humedad (la profundidad máxima es de 70 m.). Por el interior de dicho tubo se introduce hasta la profundidad deseada la probeta emisora detectora, quedando en el extremo superior del tubo de acceso el cilindro o escudo protector. Los neutrones rápidos emitidos desde la fuente chocan con los núcleos de los átomos de Hidrógeno perdiendo energía.

Para medir estos neutrones que han sido frenados, se emplee un detector de Trifluoruro de Boro.

Como los neutrones son partículas sin carga, para poder detectarlos hay que incorporarlos en una reacción nuclear que dé como resultado una partícula cargada. Cada neutrón lento que llega al detector reacciona con los átomos de Boro^{10}, produciendo una partícula de acuerdo a la siguiente reacción:

$$_5B^{10} + {}_0^1n = Li + He + 2{,}5\ Mev.$$

Esta partícula ioniza el gas del contador y resulta un impulso de descarga. Estos pulsos se preamplifican en la probeta antes de transmitirlos al escalímetro o medidor de impulsos.

(1) Los nombres comerciales se indican sólo para mayor claridad y esto no constituye ningún patrocinio al fabricante.

El escalímetro es un contador luminoso con 5 tubos de décadas que permite registrar cuentas o impulsos hasta 99.999.-

Tiene además un dispositivo de tiempo que permite medir el tiempo transcurrido desde que comenzó el registro. De esta manera se puede determinar fácilmente el número de cuentas por minuto, que están relacionadas con la humedad en volumen del suelo en ese punto.

La probeta descrita se denomina probeta de profundidad, ya que no permite efectuar medidas superficiales (sobre 20 cm.) debido a la dispersión hacia el aire de los neutrones emitidos. Cada medida con la probeta tiene una esfera de influencia cuyo radio depende del contenido de humedad del suelo y es del orden de 20 a 30 cm.

3.- USO DEL EQUIPO EN TERRENO :

Como ya se indicó, en el punto del terreno en que se va a efectuar el perfil de humedad, se requiere instalar un tubo de acceso de la profundidad deseada.

Para las mediciones efectuadas, se dispusieron 30 tubos de acceso convenientemente distribuídos en la media hectárea de la parcela de experimentación. Por razones de economía, facilidad de suministro, y requisitos de operación del equipo, dichos tubos fueron de cobre de 1.3/4" de diámetro exterior, sin costuras y de 0.8 mm. de espesor. Se les dió una profundidad de 2.00 metros y estaban sellados en su extremo inferior y con un tapón de goma en el extremo accesible.

Para instalar los tubos de acceso se hizo una perforación con barreno de 1.3/4". Al hacer dicha perforación se fueron extrayendo muestras de suelo cada 25 cm. con el objeto de caracterizar posteriormente la textura y constantes hídricas del perfil de suelo en dicho punto.

Al iniciar la serie de mediciones, se determinaron cuentas standard con la probeta dentro del escudo protector con el fin de referir todas las medidas posteriores a ella y de compensar así atuomáticamente posibles variaciones del equipo. Al final de un día de operación se repitió el proceso.

En cada tubo de acceso se determinó el perfil de humedad con medidas cda veinte centímetros hasta el metro ochenta. Mediciones especiales demostraron que no se justificaba llegar a una mayor discriminación de dicho perfil. Los perfiles se determinaron un día inmediatamente antes de cada riego o corte, un día 3 días después del riego o corte y posteriormente con una periodicidad máxima de una semana.

En cada punto de un perfil se tomó el número de cuentas en 1 minuto. El tiempo requerido para determinar un perfil de 1,80 m. fue de aproximadamente 15 min. y el tiempo total en cada una de las cuatro subparcelas de experimentación fue de 2 horas.

4.- CALIBRACION DEL EQUIPO :

Para determinar el contenido de humedad del suelo en base al equipo medidor de neutrones, es preciso haber correlacionado previamente el número de partículas o cuentas por minuto (c.p.m.) que registra el aparato con dicha humedad. Esta correlación es directa y prácticamente lineal, es decir, a mayor número de cuentas por minuto, mayor humedad del suelo. En dicha correlación la humedad del suelo se expresa como porcentaje en volumen.

En la calibración, se utilizaron 20 tubos de acceso de 1 m. de profundidad. En torno a algunos de dichos tubos se construyó un pequeño pretil que permitiera acumular cierta lámina de agua con el objeto de lograr un mayor contenido inicial de humedad que fuera homogéneo en el perfil del suelo.

En cada uno de estos tubos se distinguieron de dos a cinco niveles de medición previa verificación que en los horizontes correspondientes la humedad fuera lo más homogénea posible. En cada uno de estos niveles se registró el número de cuenta en dos minutos, repitiéndose esta operación 10 veces. Inmediatamente después se extrajeron en cada nivel y en torno al tubo de acceso, tres muestras inalterables de suelo, (Fig. 1) de manera de determinar la densidad aparente del horizonte representativo y posteriormente su contenido de humedad en peso por secado en estufa a peso constante. La distancia entre el eje del tubo y el eje de las muestras fue de aproximadamente 12 a 15 cm. El promedio de humedad de estas tres muestras se correlacionó con el número de cuentas por minuto registrada en el

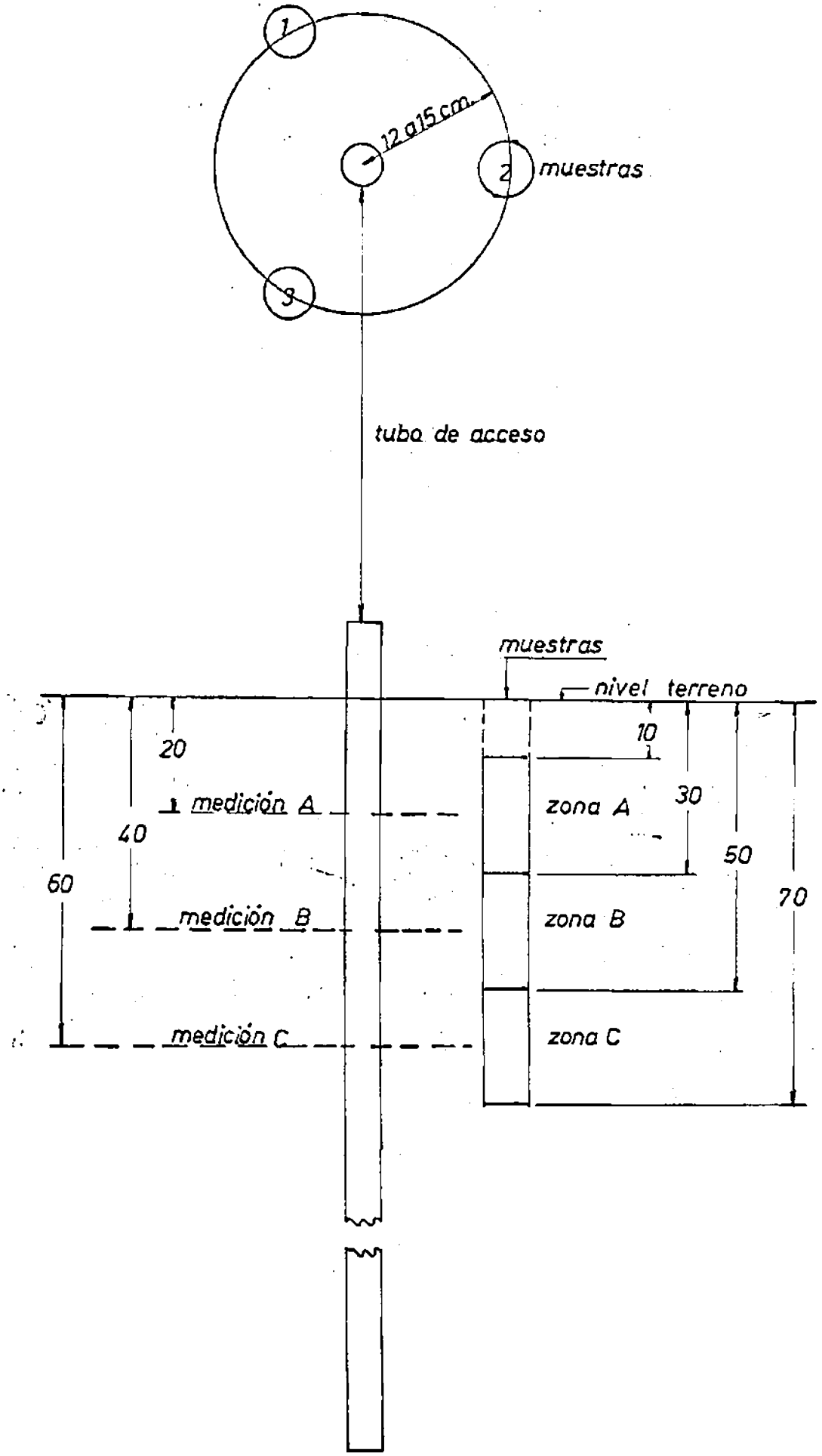
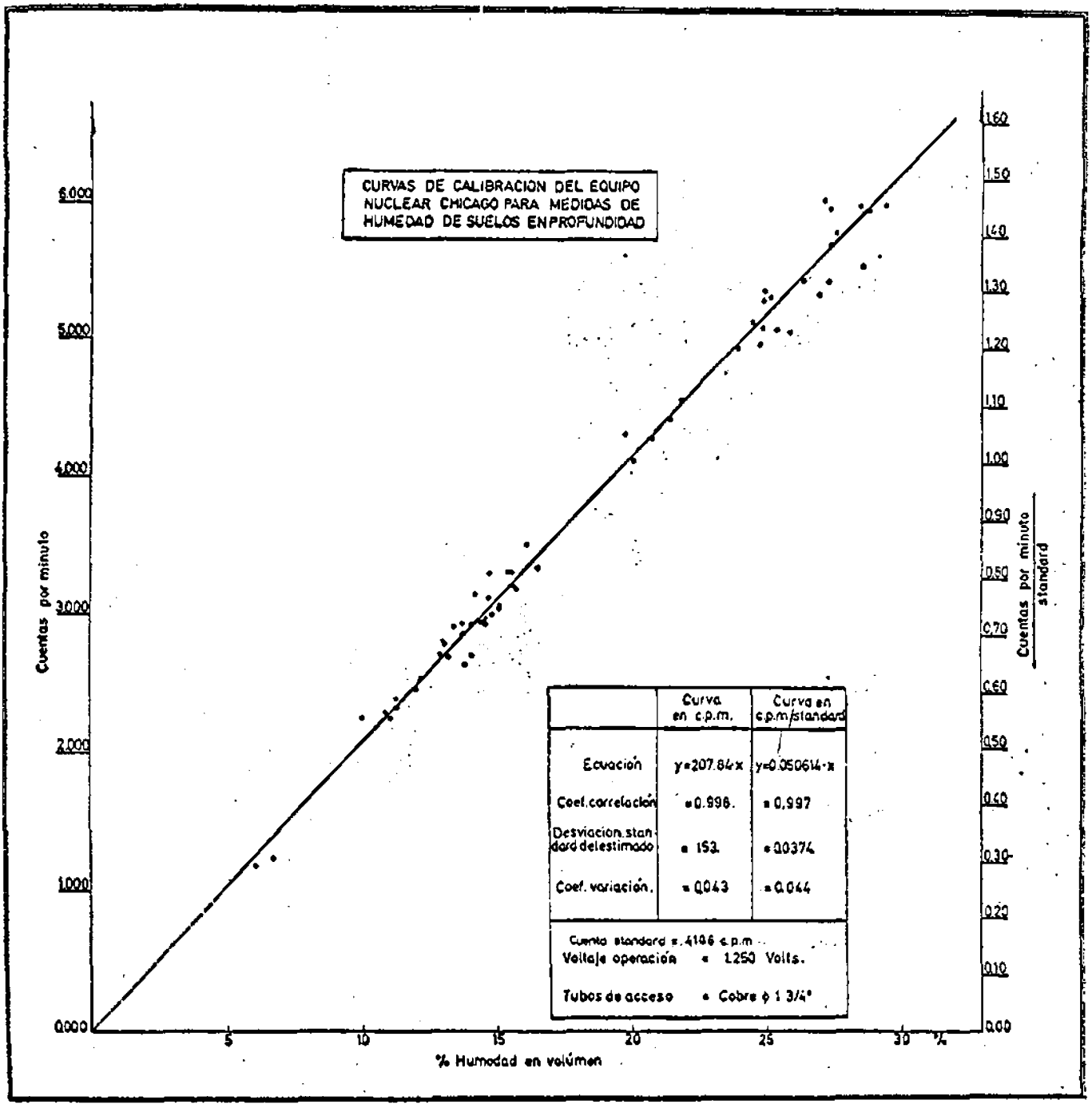


Fig. 2 Distribución de muestras alrededor de un tubo de

Fig. 2


CURVAS DE CALIBRACION DEL EQUIPO NUCLEAR CHICAGO PARA MEDIDAS DE HUMEDAD DE SUELOS EN PROFUNDIDAD
Cuentas por minuto
6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0.000
Cuentas por minuto / standard
1.60
1.50
1.40
1.30
1.20
1.10
1.00
0.90
0.80
0.70
0.60
0.50
0.40
0.30
0.20
0.10
0.00
5
10
15
20
25
30
%
% Humedad en volúmen
Curva en c.p.m.
Curva en c.p.m/standard
Ecuación
y=207.84x
y=0.050614·x
Coef. correlación
=0.998.
=0.997
Desviacion standard de estimado
=153.
=0.0374
Coef. variación.
=0.043
=0.044
Cuenta standard = 4186 c.p.m.
Voltaje operación = 1250 Volts.
Tubos de acceso = Cobre ϕ 1 3/4"

nivel correspondiente, obteniéndose así un punto de la curva de calibración.

De esta manera se lograon 63 puntos de correlación que cubrieron el rango de 1.200 a 6.100 c.p.m. y de 6 a 30% de humedad en volumen. Al conjunto de puntos se les ajustó una recta por mínimos cuadrados, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.998 y un coeficiente de variación de 4.3%.

Análogamente se efectuó otra correlación refiriéndo las cuentas por minuto al standard, obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.997 y un error standard de 4.4%. En ambos casos dichos coeficientes resultaron altamente significativos al nivel 99,9% (Fig. 2.).

La recta de calibración obtenida es válida para el tipo de probeta y tubo de acceso utilizado. Se puede emplear en cualquier suelo que no sea orgánico, salino, y que no contenga proporciones anormalmente altas de cloro, boro, litio, cadmio y manganeso.

En la figura Nº 3.- se indica la curva de calibración obtenida para tubos de cobre y se compara con la curva correspondiente a tubos de acero de 1.5/8" y 0.97 mm. de espesor (suministrada por el fabricante (1)). Se observa que la recta correspondiente a tubos de cobre es más sensible, esto se debe al menor espesor de los tubos y a que el acero es menos permeable al paso de los neutrones.

5.- ERRORES DEL INSTRUMENTO :

Las dos principales fuentes de error al hacer las mediciones de humedad del suelo con el equipo de nêutrones son las debidos al cuenteo aleatorio y los errores que se cometen al traducir los valores expresados en c.p.m. a humedad en volumen.

El error debido al cuenteo aleatorio expresado en c.p.m. queda dado por la siguiente expresión (3)

$$E_N = \frac{K \times \quad}{t} \qquad \text{(c.p.m.)}$$

donde:

K = Coeficiente que determina el nivel de confianza

t = Tiempo en minutos en que se acumula el total de cuentas n.

= Desviación standard de n.

Cuando n. es grande = n.

La relación que liga el número de c.p.m. N con la humedad del suelo H, es lineal y pasa por el origen y tiene la expresión:

$$N = m \times H.$$

m= pendiente de la recta de calibración, por lo tanto

$$E_H = \frac{E_N}{t}$$

Combinando con las ecuaciones anteriores se llega a

E_H = error aleatorio en % en volumen

Esta ecuación representa una familia de curves que relaciona E_H con la humedad H teniendo como parámetros el nivel de confianza y el tiempo de medición t.

En la figura 4 se han dibujado estas curvas para t = 1 y 2 minutos con un nivel de confianza de 95%.

De estas curvas se puede dterminar el tiempo mínimo de medición para obtener errores inferiores a un cierto valor prefijado, al realizar mediciones en un cierto rango de humedades.

6.- ALGUNOS RESULTADOS OBTENIDOS :

En las figuras Nº 5 y 6 se puede visualizar la variación del perfil de humedad entre riegos en dos tubos de acceso típicos.

Puede observarse el movimiento del agua en el perfil de suelo, las zonas de máxima extracción y la desuniformidad en la acumulación del agua. Conociendo previamante la zona de raíces del cultivo puede así determinarse la cantidad de agua acumulada en el riego, la magnitud del consumo por E. T. y la percolación profunda si es que hubo (Fig. 6)

En la figura Nº 7 se indican los valores de E. T. mensuales medidos (calculadas mediante un balance hídrico) y se comparan con los valores calculados por algunos métodos empíricos y semi empíricos normalmente usados. Se observa que los métodos de Blaney - Criddle, el de Turc (basado enla radiación) son las que mejor se ajustan a los valores medidos. En la figura Nº 8 se presenta un resumen de los datos meteorológicos registrados en la estación de Pirque durante el período de mediciones.

Con los valores de E. T. medidos se realizaron correlaciones lineales múltiples con algunos parámetros meteorológicos, en la Tabla Nº 1, se indican los valores considerados en las correlaciones y en la Tabla Nº 2 se presenta un cuadro con las regresiones obtenidas al aplicar mínimos cuadrados se indican además los coeficientes de correlación y las desviaciones atandard.

El significado de cada uno de los términos de la Tabla Nº 2 es el siguiente:

E. T. = evapotranspiración expresada en mm/día.
E = evaporación (mm/día)
T = temperaturas máximas medias ºC
R = radiación global, incidente, expresada en mm. de agua evaporada por día.
$(e_a - e_d)$ = déficit higrométrico mm. de Hg.
n = número de horas de sol en el día.

Variación del perfil de humedad en tubos de acceso típicos

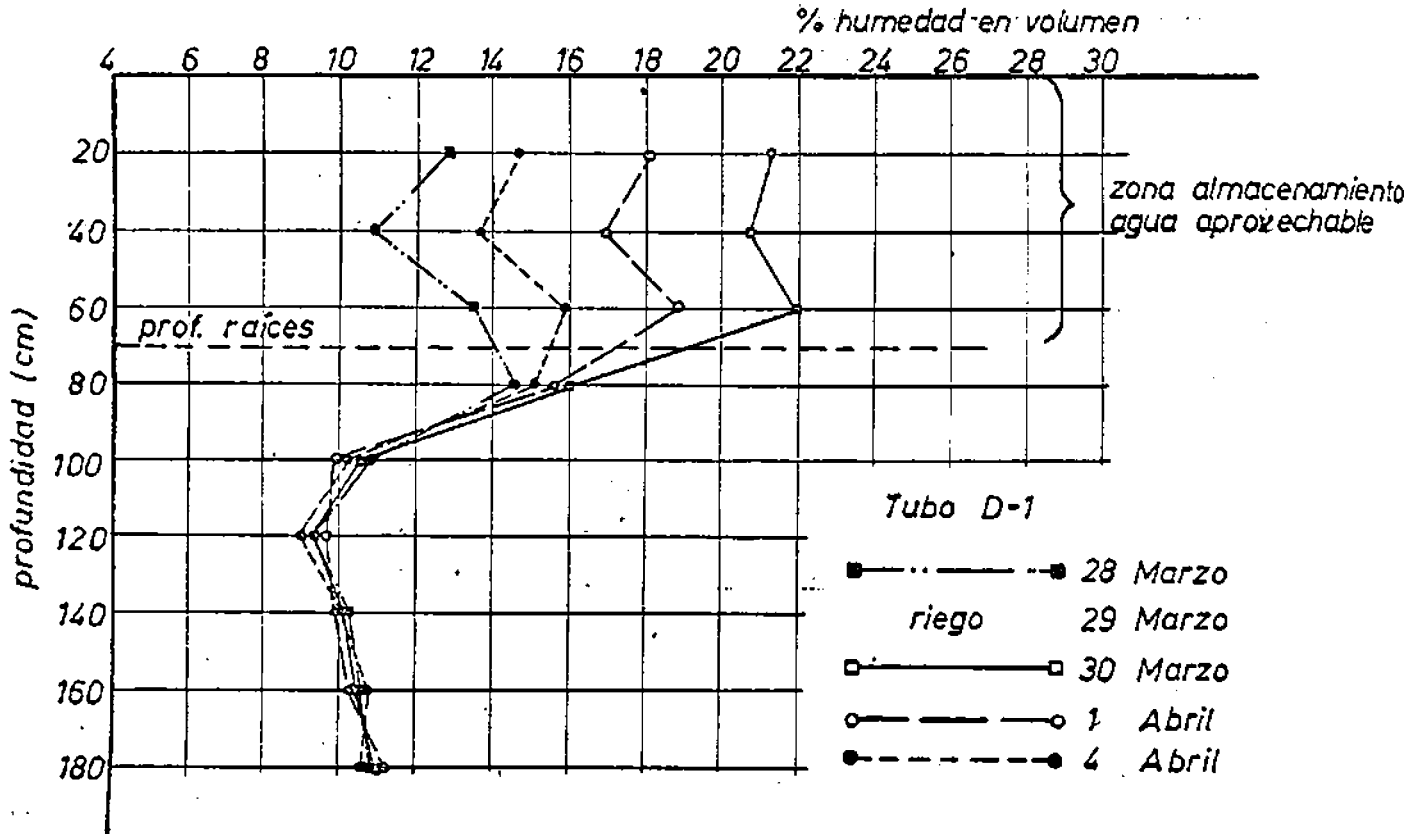


Fig. 5

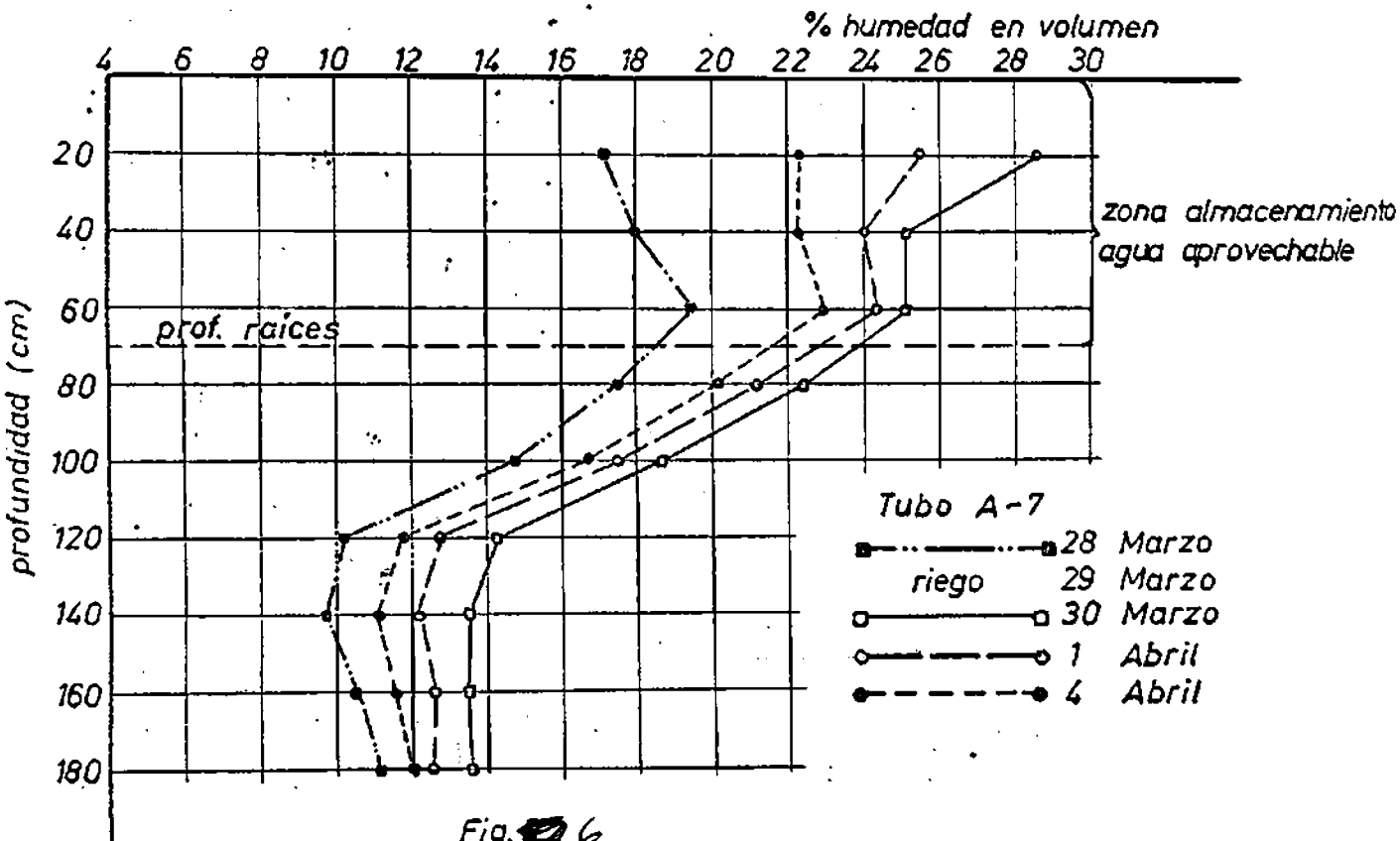


Fig. 6

TABLA 5 - 17

Ecuación de Regresión	coeficiente de correlación	Desviación standard del estimado
E.T. = 0,486 E + 0,95	0,897	0,553
E.T. = 0,809 (ea - ed)	0,854	0,590
E.T. = 0,674 (ea - ed) + 0,57	0,856	0,588
E.T. = 0,268 T - 3,42	0,838	0,684
E.T. = 0,501 R - 0,63	0,907	0,481
E.T. = 0,499 E - 0,008 T + 1,09	0,897	0,571
E.T. = 0,580 E - 0,143 n + 1,80	0,911	0,486
E.T. = 0,192 E + 0,297 R + 0,02	0,913	0,480
E.T. = 0,289 T - 0,081 n - 3,24	0,832	0,655
E.T. = 0,026 T + 0,609 (ea - ed) + 0,17	0,856	0,609
E.T. = 0,527 E + 0,055 T - 0,180 n + 1,02	0,913	0,500
E.T. = 0,225 E + 0,361 R - 0,075 T + 1,11	0,917	0,487
E.T. = 0,088 T - 0,160 n + 0,686 (e_a - ed) - 0,18	0,867	0,611
E = 1,061 R - 3,37	0,958	0,658

TABLA Nº.....

Período	E.T. (mm)	E (mm)	R (mm)	T (ºC)	M (Horas)	(ea-ed) mm Kg.
12-14-I-68	5,9	8,1		30,7		
15-17-I	4,6	8,4	10,2	30,7	12,7	
18-20-I	5,1	7,0	9,9	25,3	8,9	4,4
21-23-I	4,8	9,0	10,0	31,6	12,8	6,8
5- 8-II	3,3	7,1	9,8	28,0	11,6	4,4
9-11-II	3,9	6,5	10,2	29,2	12,3	4,6
12-15-II	4,2	6,7	9,8	28,9	12,3	5,9
16-18-II	4,3	6,1	9,6	27,9	10,7	4,7
19-22-II	4,5	6,7	9,3	27,4	11,7	5,5
23-29-II	3,2	5,9	9,0	28,1	10,6	5,3
1- 3-III	3,3	4,0	7,1	25,6	7,1	3,6
4- 6-III	3,4	4,1	7,4	24,8	7,9	3,9
7-14-III	2,8	4,1	7,2	24,3	9,0	3,5
15-28-III	3,1	3,9	7,3	23,4	9,4	3,5
29-10-IV	2,8	3,3	6,4	24,5	9,0	3,9
11-17-IV	2,4	2,8	5,8	21,1	8,1	3,2
18-21-IV	1,5	1,6	4,1	17,7	4,8	1,4
22-25-IV	1,2	1,8	4,8	20,3	7,5	1,8

7.- CONCLUSIONES :

Los resultados obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones de carácter general.

a) El equipo de neutrones utilizado permite medir variaciones de humedad de suelos en form. más rápida, más representativa y más precisa que otros métodos de medición actualmente en uso. Los errores puntuales se estiman en aproximadamente 1,5 a 2%. El principal inconveniente para la generalización del uso de estos equipos en nuestro país, es su alto costo.

b) Para determinaciones del perfil de humedad sobre 20 cm. debe disponerse de una probeta de superficie o acoplar una pantalla protectora de diseño especial.

c) El uso del equipo facilita un mayor número de mediciones no perturbadas que sirven para determiner adecuadamente la distribución y uniformidad en planta y en profundidad de la cantidad de agua incorporada al suelo, de su extracción por E.T. y de la percolación producida. Como los lugares de muestreo no cambian, cualquier variación de la humedad del suelo se atribuye a alguno de estos hechos y no a una posible variación debido al cambio del lugar de muestreo.

d) El tipo de tubo de acceso que utilizó se presta adecuadamente a las exigencias del método. En su instalación debe lograrse una mínima distorsión del suelo y un buen contacto entre sus paredes y el suelo.

e) La curva de calibración obtenida es válida para la probeta y tipo de tubo de acceso utilizado, se puede emplear en cualquier suelo que no sea salino y/u orgánico y que no contenga cantidades apreciables de algunos elementos como: cloro, boro, litio, cadmio, manganeso, que son buenos absorbentes de neutrones lentos.

f) El medidor de neutrones, en las condiciones de trabajo en que se usó, no implicó en ningún momento riesgo acumulativo de radiación nociva para el organismo.

REFERENCIAS

1.- BREINBAUER C. HERNAN (1970) "Uso de un equipo de neutrones en la medición de humedad del suelo y su aplicación en la determinación de la evapotranspiración". Memoria de Título. Escuela de Ingeniería, Universidad de Chile.

2.- Nuclear Chicago (1964) "Model P-19 depth moisture gauge" and "Model 2.800. Portable Scaler". Instruction manual. Chicago U. S. A.

3.- Bell J. P. and J. Mc Culloch (1966) "Soil moisture estimation by the neutron scattering method in Britain". Vol IV Nº 3. Journal of Hidrology North - Holland Pub. CO. Amsterdam.

IREN