

EFFECTO DE SUCCIONES MAXIMAS DE HUMEDAD
EN DOS CAPAS DE SUELO EN EL CRECIMIENTO
DE PLANTAS DE TOMATE

Tesis de Grado de MAGISTER SCIENTIAE

Orlando J. Vásquez N.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro de Enseñanza e Investigación
Departamento de Fitotecnia y Suelos
Turrialba, Costa Rica
Setiembre, 1970

EFFECTO DE SUCCIONES MAXIMAS DE HUMEDAD
EN DOS CAPAS DE SUELO EN EL CRECIMIENTO
DE PLANTAS DE TOMATE

Tesis

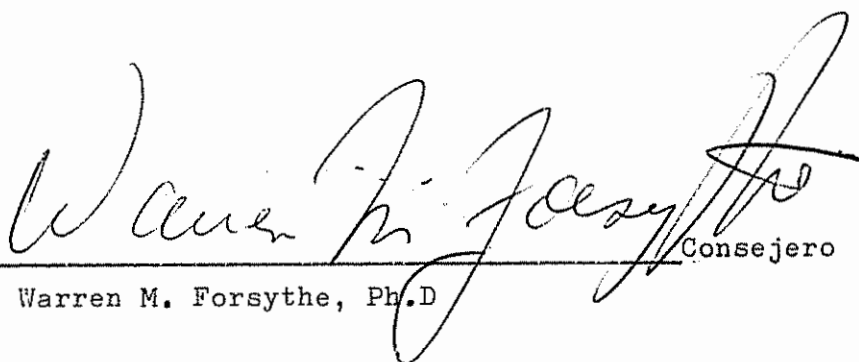
Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados
como requisito parcial para optar el grado de

Magister Scientiae

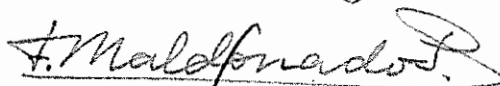
en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

APROBADA:

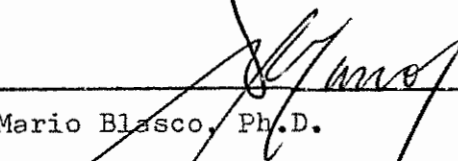

Consejero

Warren M. Forsythe, Ph.D



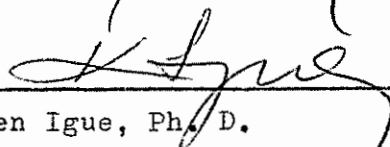
Comité

Fausto Maldonado, Ing. Agr.



Comité

Mario Blasco, Ph.D.



Comité

Kozen Igue, Ph. D.

Setiembre, 1970

A Miriam

A mis padres

AGRADECIMIENTO

El autor queda permanentemente agradecido, por la inapreciable ayuda prestada por el Dr. Warren M. Forsythe, a la conclusión de este trabajo; a los miembros del Comité Consejero por sus acertadas observaciones y desinteresada colaboración; al Dr. Gilberto Páez por su acertada guía en los análisis estadísticos; a todas las personas que en cualquier forma han contribuido a la finalización de este trabajo.

BIOGRAFIA

El autor nació en Nandasmo, Departamento de Masaya, Nicaragua en 1944. Se graduó de Ing. Agr. en la Escuela Nacional de Agricultura de Managua en 1966.

A partir de 1966 trabajó en el Departamento de Suelos del Programa de Catastro de Recursos Naturales de Nicaragua como Jefe de Grupo de Clasificación y Mapeo de Suelos.

Ingresó como estudiante graduado en la Escuela para Graduados del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, en Setiembre de 1968. Sus estudios en este Centro concluyeron en el mes de Setiembre de 1970.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	3
2.1 Generalidades	3
2.2 Succión del agua en el suelo	4
2.2.1 Potenciales de humedad en el suelo	4
2.2.2 Influencia de la succión del agua en el crecimiento de las raices	6
2.3 Tensión del agua en el suelo y el crecimien- to general de las plantas	8
3. MATERIALES Y METODOS	10
3.1 Las macetas	10
3.1.1 Separación de las capas de suelo	11
3.1.2 Medidas de humedad en el suelo	12
3.1.3 Tensiómetros para succiones bajas	12
3.1.3.1 Medición de succiones entre 0,05 y 0,44 bares	13
3.1.3.2 Medición de succiones mayores de 0,44 bar	14
3.1.3.3 Calibración de los "bloques de nylon" ...	15
3.2 El suelo	15
3.3 El agua	16
3.4 Succiones de humedad en el tomate	17
3.5 El invernadero	17
3.6 Manejo del experimento en el invernadero	18
3.7 Tratamientos de succión de humedad aplicados en el experimento	20
3.7.1 Modelo matemático del experimento	22
3.8 Conclusión del experimento en el invernadero	23

	<u>Página</u>
4. RESULTADOS Y DISCUSION	26
4.1 Análisis de varianza de los resultados	26
4.1.1 Análisis de varianza para volúmenes de agua consumidos por tratamiento de succión máxima	26
4.1.2 Análisis de varianza para eficiencia del consumo de agua	27
4.1.3 Análisis de varianza para energía total con- sumida en ergios por maceta	28
4.1.4 Análisis de varianza para las elongaciones de los tallos a partir de la aplicación de los tratamientos	28
4.1.5 Análisis de varianza para las respuestas de peso seco de la parte aérea de las plantas	29
4.2 Análisis de tendencia de los resultados	30
4.2.1 Elongación de los tallos y la succión del suelo	30
4.2.2 Producción de materia seca según succión ...	32
4.3 Otras variables independientes para determinar la humedad del suelo en función de la planta	35
5. CONCLUSIONES	41
6. RESUMEN	43
7. LITERATURA CITADA	44
FIGURAS	48
APENDICE	57

LISTA DE CUADROS

Cuadro N ^o		<u>Página</u>
1	Tratamientos de succiones de humedad aplicados en el experimento	21
2	Eficiencia de consumo de agua por tratamiento de succiones máximas	35
3	Indices de asociación (R^2) entre producción de materia seca y otras variables	37

LISTA DE FIGURAS

Figura N ^o		<u>Página</u>
1	Modelo de maceta en caso hipotético de instalación con todos los aparatos	49
2A	Tabique traspasado por las raíces de las plantas ..	51
2B	Corte transversal del tabique para separación de las dos capas de suelo	51
3	Frecuencia de riego para succiones máximas por capa de suelo en base de los promedios de los tratamientos	50
3A	Corte longitudinal de un tensiómetro fabricación manual	51
3B	Corte transversal de la zona porosa (a) del tensiómetro de la fig. 3A	51
4	Tensiómetro	51
5A	Curva de la succión de la humedad para Birrisito Ap obtenida con muestras disturbadas y secadas al aire	52
5B	Curva de la succión de la humedad para Birrisito A12 obtenida con muestras disturbadas y secadas al aire	53
6	Elongación de los tallos de tomate según succiones máximas en la capa superior e inferior del suelo...	54
7	Producción de materia seca por succiones máximas en las capas superiores e inferiores del suelo	55
8	Curva de consumo de energía total, por maceta, en ergios según succiones	56

1. INTRODUCCION

En un sistema de irrigación la disponibilidad del agua del suelo y su comportamiento tiene gran importancia debido a que errores en el suministro de agua a los cultivos traen como consecuencia una baja en los rendimientos por unidad de superficie. Los efectos son perjudiciales para el éxito de un programa de riego (25).

Por lo general en la programación del riego se trata al suelo como una entidad uniforme con propiedades similares a través de todo el perfil. Sin embargo, al observar un corte vertical de un suelo, se encuentra que en la mayoría de los casos está constituido por varios horizontes con propiedades diferentes que a veces dan a cada capa distinta capacidad para retener el agua que le es suministrada (2, 29).

También se sabe que las plantas absorben en forma diferencial el agua del suelo a distintas profundidades, aun cuando éste es uniforme (19).

No se conoce exactamente como se comportan las plantas cuando en el suelo se tienen diferentes condiciones de humedad que varían con la profundidad. Por lo tanto se decidió investigar el efecto que produce en el crecimiento de las plantas, un suelo uniforme pero con condiciones de humedad diferente a dos diferentes profundidades.

Al controlar las fuerzas de retención del agua en cada una de las dos capas de suelo y cuantificar ciertas variables de las plan-

tas que en él crecen, como son, la elongación del tallo, el peso fresco y peso seco, se determina la forma en que ha sido afectada la planta con el tratamiento que en este caso es la humedad medida por la fuerza de succión con que el agua es retenida por el suelo. Una vez conocido el comportamiento de la planta, se trata de desarrollar un método para determinar la forma más adecuada de manejar los datos de humedad del suelo en el que crece un cultivo cuyo sistema radicular sufre dos succiones de humedad a dos diferentes profundidades.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Generalidades

En la mayoría de los casos el suelo tiene muchas variaciones a través del perfil lo que ocasiona variaciones en el ambiente de humedad para las raíces de las plantas (2, 29, 13, 27). Es de esperar que las plantas respondan en forma diferencial a diferentes fuerzas de retención a diferentes profundidades del suelo, de manera que se ha considerado la posibilidad de que tal fenómeno ocurra (13). El uso de promedios adecuados de succión para obtener rendimientos máximos de un cultivo, son de suma importancia para la programación de la frecuencia de riego (25). De manera que gran parte del éxito de una empresa agrícola basada en la irrigación depende del uso adecuado del agua que se provee al suelo.

Se ha tratado de establecer el funcionamiento del mecanismo agua-suelo-planta y se ha concluido que las raíces extraen primeramente el agua de las capas superiores y luego la de las capas inferiores y que la evaporación de la superficie del suelo acelera el déficit de humedad en el suelo (39). Sin embargo el agua en el suelo no es pasiva, el trabajo anterior dió una idea del movimiento del frente seco en el suelo, ya que también se ha encontrado que las raíces absorben primero el agua del suelo que les rodea, luego la absorción actúa en la periferia del sistema radicular en la misma capa de suelo (31). En la Estación Experimental de Kentucky (19) se efectuaron mediciones de porcentajes de humedad a diferen-

tes profundidades en condiciones corrientes de cultivo del maíz y en áreas sin cultivar. Se encontró que entre 4 y 5 pies de profundidad la humedad era menor en el suelo no cultivado.

2.2 Succión del agua en el suelo

Si una determinada cantidad de agua se pone en contacto con un suelo no saturado es absorbida en virtud de la atracción que el suelo ejerce sobre ella, esto lo demuestra el funcionamiento del tensiómetro (descrito en la sección 3.1.3.1, fig. 4). A medida que un suelo está más seco, la columna de agua vertical y hacia abajo, a partir del plano horizontal del punto de contacto agua-suelo, es cada vez mayor para poder equilibrar la magnitud de la succión ejercida por el suelo; esto fue demostrado por Richards (27) quién al graficar la fuerza de succión en atmósferas con el contenido de humedad, encontró que se describe una curva similar a la determinada por Forsythe y Vásquez (8) para el suelo objeto de este estudio (ver fig. 5).

2.2.1 Potenciales de humedad en el suelo

Se sabe que diferentes tipos de suelos retienen diferentes cantidades de agua en condiciones de campo. La retención del agua por el suelo tiene en sí varios componentes descritos termodinámi-

camente cuando se considera que el total de las fuerzas de atracción actúan en un punto, espacio y tiempo dado. El total de las fuerzas actuantes se denomina "potencial total del agua" que depende de las propiedades de las caras internas del sólido que absorbe el agua, la clase y cantidad de solutos en el suelo, la temperatura ambiente y la presión atmosférica, que expresado en términos diferenciales es de la manera siguiente (15):

$$dM_A = \left(\frac{\partial M_A}{\partial a} \right)_{T,P,n_i} da + \sum_{j=1}^k \left(\frac{\partial M_A}{\partial n_j} \right)_{T,P,a} dn_j - \bar{S}_a dT + \bar{V}_a dP \quad (15)$$

Donde a es el contenido de humedad, ∂ diferencial, M_A es el potencial total del agua en el suelo, T es la temperatura ambiental en grados Kelvin, \bar{S} es la entropía específica parcial del sistema, \bar{V} es el volumen parcial de agua del sistema, n es el contenido de sustancias químicas i . El primer término de la ecuación describe la interacción entre el agua y los sólidos del suelo, por esa razón se ha llamado potencial matriz. La derivada parcial $\left(\frac{\partial M_A}{\partial a} \right)_{T,P,n_i}$ es la pendiente de la curva de retención del agua y llamada "potencial específico del agua". El segundo término de la ecuación expresa la influencia de la composición del agua en el potencial de humedad. Para un determinado suelo con mineralogía y contenido de material orgánico constantes dentro de un estado dado de empaquetamiento en ausencia de contracciones y dilataciones, es el "potencial del soluto" o "potencial osmótico". Al medir los potenciales de la matriz y del soluto la temperatura y presión atmosférica podrían considerarse cons-

tantes. Si dicha medida es efectuada siempre a la misma temperatura y presión atmosférica, se podrían desechar los dos últimos términos. Se considera muy importante el potencial de la matriz hídrica del suelo para la medida de la succión del agua en el suelo y se expresa en energía por unidad del volumen de agua (15).

2.2.2 Influencia de la succión del agua del suelo en el crecimiento de las raíces

La succión del agua puede afectar al sistema radicular en la dirección del crecimiento de las raíces; en la extensión lateral y en profundidad y en el crecimiento relativo del sistema radicular con respecto a las raicillas. Cuando no hay succión, o sea que las raíces están en contacto con el agua, cambian la dirección del crecimiento de manera que pueden tornarse en dirección contraria a la superficie del agua debido a exceso del líquido (16). La extensión de las raíces parece estar controlada principalmente por las características genéticas de la planta, pero está expuesta también a los factores ambientales (30). El crecimiento en volumen de las raíces y raicillas es muy pequeño cuando el suelo está seco, pero pequeños incrementos de humedad originan grandes aumentos en el volumen de dicho sistema radicular total en la zona mojada (38). Experimentos realizados con plantas de maíz demuestran que si bien el sistema radicular acelera su elongación por períodos cortos de tiempo bajo succiones altas, llega un momento en que se anula la elongación, lo que sucede aproximadamente entre 6 y 8 bares de succión de humedad (26).

Pero no solo la succión de la humedad influencia la elongación de las raíces, ya que se ha puesto a crecer plantas en solución nutritiva y en suelo con las mismas succiones se encontró que las raíces desarrollaron mejor en la solución nutritiva que en el suelo por lo que se concluyó que la penetrabilidad del suelo influye en el crecimiento radical (10). También se investigó la influencia de la succión osmótica de la solución del suelo y la succión del suelo y se encontró que ambas son aditivas en relación con el crecimiento de las raíces (40). Sin embargo, últimamente se ha encontrado que hay plantas que tienen la capacidad de adaptarse a succiones osmóticas generadas en el exterior al poner su solución interna en equilibrio con la externa (24).

Se ha relacionado la fuerza succión del agua del suelo con la absorción de iones por las raíces. Se determinó que la absorción de fosfato se reduce a medida que aumenta la succión de humedad del suelo (22). El mismo efecto se ha observado en la absorción del rubidio (32).

La aereación de un suelo disminuye al aumentar la humedad o bien, al disminuir la fuerza de succión del agua. Se ha relacionado la aereación con el ritmo de difución de oxígeno y se ha determinado que concentraciones menores de un 10,5 % de oxígeno en el aire del suelo son limitantes para el crecimiento de las raíces (1). Stolzy y Letey (35) consideraron que un ritmo de difusión de oxígeno de 0,2 microgramos por centímetro cuadrado por minuto es límite el mínimo crítico para las plantas. También se ha encontra-

do que cuando los espacios aéreos se reducen a menos de un 10%, la difusión de oxígeno se anula. Este valor es considerado como punto crítico en el crecimiento de los cultivos (10).

2.3 Tensión del agua en el suelo y el crecimiento general de las plantas

Son muy bien conocidas las funciones del agua en la planta, entre ellas están: transporte de los nutrimentos, participante directa de las reacciones que se efectúan dentro de la planta, catalizador, agente reactante, conformador de los tejidos, etc., de tal manera que constituye de 75 a 95% del peso fresco de la planta exceptuando algunas partes de ella como las semillas maduras en que su porcentaje baja. Generalmente toda el agua construida en los tejidos de la planta es proporcionada por la humedad del suelo que en un punto y momento dado la retiene con una fuerza determinada. A medida que el agua disminuye en el suelo, la planta tiene que hacer un mayor esfuerzo para extraerla, este esfuerzo afecta el crecimiento. La respuesta del crecimiento de la planta al déficit de humedad en el suelo es una característica de cada especie (33). En las plantas de tomate el aumento de longitud de los renuevos disminuye al someterla a períodos cortos de sequedad del suelo, pero se restablece al restituir la humedad (9). Por lo general la elongación de las plantas disminuye al aumentar la succión del suelo.

Se han relacionado las funciones de la reproducción de las plantas con la succión del suelo y se ha encontrado que al aumentar

ésta disminuye la polinización (30). El tamaño y forma de los frutos también son afectados por la succión del suelo. A mayor succión el porcentaje de frutos pequeños es mayor (14, 6).

Los trabajos mencionados anteriormente se refieren a succiones medidas a una profundidad de suelo. Taylor (36) presentó un trabajo teórico en que integra los conceptos de succión en el suelo para la zona radical con la profundidad y el tiempo. Presupuso que la succión conserva una relación lineal con la profundidad y el tiempo. Con estas premisas consideró que la succión se puede evaluar de la siguiente manera:

$$T_{pm} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^L (d_{i+i} - d_i) T_{ij}}{L \sum_{i=0}^m (d_{i+i} - d_i)} \quad [2]$$

donde L representa el número de profundidades con la presuposición de que el espaciamiento es uniforme donde se midió la succión; m representa el número de veces cuando fueron hechas las lecturas; i y j son los tiempos y profundidades individuales; $(d_{i+i} - d_i)$ es un factor de ponderación del tiempo y es el lapso de tiempo entre cada lectura. Si en la fracción se observa el denominador se ve que L, y m, ponderan a la succión. Posteriormente la fórmula fue aplicada en el campo en la producción de forrajes (41). Lo que se obtuvo al relacionar la succión ponderada fue una ecuación del tipo $Y = b_0 - bx$ donde Y es la producción, b_0 es una constante; b es un factor de x que representa la succión ponderada.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Las macetas

Como la idea básica que originó este estudio fue la de observar los efectos que producen, diferentes succiones en dos capas de suelo donde se desarrollan las raices en el crecimiento de las plantas fue necesario idear una técnica de invernadero para lograr que las raices se desarrollaran simultáneamente en las dos capas de suelo con succiones de humedad controladas independientemente. Para tal fin se emplearon recipientes de lata de forma cilíndrica y fondo plano cuya capacidad aproximada fue de 4,2 litros, altura de 19,5 cm y 16,5 de diámetro interno. Todos los recipientes fueron perforados por el fondo donde se practicaron varios orificios con el fin de proporcionar aireación a la capa inferior del suelo; también se practicó en todas cuatro agujeros, dos opuestos y a unos 4,5 cm del fondo con el fin de atravesar el bloque inferior de suelo con un tensiómetro de tubo plástico para medir las succiones de 0,050 bar; a otros dos agujeros se perforaron a 14,25 cm del fondo con el mismo fin pero para el bloque superior de suelo. Además se practicaron dos orificios más a la misma altura de los cuatro anteriores para proveer de agua al suelo de manera uniforme. En los tratamientos que tenían como succión máxima 0,44 bares en el bloque inferior de suelo, fue necesario efectuar en la maceta otro agujero lateral a unos 5 cm del fondo para adaptar un tensiómetro que midiera la succión, este tensiómetro se inclinó ligera-

mente hacia arriba y evitar la acumulación de burbujas de aire. (Para mayor aclaración ver la fig. 1 elaborada para el caso supuesto de que tuviera todas las instalaciones para medir humedad y proveer el agua). Los recipientes se recubrieron con pintura por dentro y por fuera para impedir la oxidación.

3.1.1 Separación de las capas de suelo

Las dos capas de suelo contenidas en las macetas se separaron por medio de un tabique constituido por un tubo plástico tipo polietileno de aproximadamente 1,7 cm de diámetro externo, cuyos extremos se juntaron y pegaron con un material adherente llamado epoxy. Al aro así formado se le adosó malla de plástico tipo nylon con orificios de un milímetro de distancia entre hilo e hilo. De esta manera se formó un recipiente chato que se rellenó con grava de diámetro entre 2 y 4 mm. Luego se cubrió la cara superior de la lámina de grava con malla plástica similar a la que sirvió de fondo; esta también se adhirió a las paredes externas del tubo plástico (ver fig. 2). El tabique así construido debía calzar lo más ajustado posible a la pared interna de los recipientes de lata.

El principio puesto en práctica para manejar independientemente la succión máxima y mínima en cada capa de suelo se basa en la ecuación:

$$h = H - Z$$

[3]

donde h es la carga ^{a/} de presión del punto de la capa superior del suelo que toca la grava; H es carga hidráulica, Z es carga de gravedad para el mismo punto, si se considera dicho punto, mientras h sea negativo o sea, menor que la presión atmosférica, no habrá paso de agua a la capa de grava. Esto se logró al mantener siempre con succión la capa superior del suelo (28) regulando adecuadamente el valor de H por el irrigador y usando los tensiómetros para vigilar el valor de dicha succión.

3.1.2 Medidas de humedad en el suelo

Para medir la humedad en el suelo se hizo uso de tres aparatos: tensiómetros hechos a mano, para medir las succiones entre 0,05 y 0,006 bares; tensiómetros de la "Soilmoisture Equipment Co." N° 2700B para medir succiones de 0,05 a 0,44 bares y el "Soil Moisture Meter" modelo 300A de la "Soiltest Inc." para medir succiones mayores de 0,44 bares.

3.1.3 Tensiómetros para succiones bajas

Para determinar las succiones de 0,006 a 0,05 bares se fabricaron a mano los tensiómetros que consistían en tubos de plástico polietileno de unos tres milímetros de diámetro externo y de dos milímetros de diámetro interno con longitud de 1,40 m. A unos 16 cm de

^{a/} Carga se define como energía por unidad de peso.

uno de los extremos del tubo se practicaron dos orificios de las paredes del mismo; estos orificios se recubrieron con una lámina de material plástico de polivinilo marca "porvic" con la propiedad de que una vez mojado solo deja pasar el agua y no el aire hasta una presión de entrada de 0,4 bares. La lámina de plástico poroso se adhirió al tubo con pegamento impermeable tipo "epoxy" de manera que por ningún lugar dejase pasar aire (ver fig. 3A y 3B).

Estos aparatos funcionan de la manera siguiente: el suelo no saturado ejerce una fuerza de atracción sobre el agua que forma películas en el suelo que hacen contacto con el material poroso plástico, esta fuerza de atracción es transmitida al seno de la masa líquida contenida en el tubo plástico. Cuando la magnitud de succión del suelo al agua se equilibra con la succión hidrostática de la columna de agua contenida en el tubo (h de la fig. 3A) dicha succión es medida por la distancia vertical del punto de contacto entre el suelo y el agua del tubo al menisco donde el agua está en contacto con la atmósfera. (La presión se expresa en centímetros de agua, 1 bar equivale a 1,023 cm).

3.1.3.1 Medición de succiones entre 0,05 y 0,44 bares

Se efectuó con tensiómetros N^o 2700B de "Soilmoisture Equipment Co."

Estos son unos aparatos que consisten en tubos plásticos rígidos y transparentes, en el extremo inferior traen un tabique cilíndrico de porcelana porosa cuyos poros una vez mojados no dejan pasar

el aire hasta 1 bar de presión de entrada. El otro extremo es abierto para que se pueda llenar el interior con agua; una vez lleno se cierra con un tapón plástico que tapa herméticamente dicho extremo. A pocos centímetros del tapón y en comunicación con la cavidad interior del tubo, está situado un manómetro que mide la fuerza de succión ejercida por el suelo al agua que recubre las paredes de la cerámica inferior (34). (Ver fig. 4)

3.1.3.2 Medición de succiones mayores de 0,44 bar

Estas mediciones se realizaron con el aparato "Soil Moisture Meter" Modelo MC 300A de la "Soiltest Inc." El aparato consiste en un omiómetro cuya función es medir la resistencia al paso del flujo eléctrico por un conductor de resistencia variable que se inserta en el suelo, este conductor conocido como "bloque de nylon" o "bloque de plástico" consiste en dos láminas de material metálico inoxidable, entre las dos láminas está prensada una malla de hilos plásticos; la corriente eléctrica que pasa de un polo a otro de la malla plástica varía con la humedad lo que permite relacionar la resistencia del bloque con la cantidad de agua en el suelo. (Para mayor detalle del funcionamiento de este aparato, ver: Colman, E. A. and Hendrix, E. A. The fiberglass electric soil-moisture instrument. Soil Science 76(6): 425-438. 1949). Como la conductividad eléctrica es diferente para cada suelo, fue necesario calibrar la resistencia para cada bloque, succión de humedad y suelo a usar en el experimento.

3.1.3.3 Calibración de los "Bloques de nylon"

Para poder medir con mayor exactitud la succión de humedad del suelo fue necesario calibrar la resistencia de cada bloque a diferentes succiones en el suelo empleado en el experimento. Para tal fin se usaron ollas de presión donde se sometió a presión una lámina de suelo de unos 2 cm de espesor por unos 16 cm de diámetro; estas láminas iban montadas sobre platos de cerámica. Insertados en la lámina de suelo iban los "bloques de nylon". Mediante ensayo anterior se había determinado que al cabo de tres días la humedad de la lámina de suelo estaba en equilibrio con la humedad de los "bloques de nylon". Al cabo de ese tiempo se extraía de las ollas el plato de cerámica que contenía el suelo y los bloques. En una tabla de registro se anotó la lectura del omiómetro para cada bloque y succión.

3.2 El suelo

Para el ensayo de invernadero se escogió el suelo de la serie "Birrisito", y de este las dos capas superiores (A_p y A_{12}). Este suelo según Knox y Maldonado (17) es un Oxic Dystrandept, Ashy, Isohypertermic, cuyos horizontes A son originados de material depositado posteriormente al que dió origen a los horizontes B. El horizonte A_p con un espesor de unos 38 cm tiene densidad aparente de 0,5 gramos por centímetro cúbico; el contenido de arena es de un 19%, el de limo un 44% y arcilla un 37%; el contenido de materia orgánica es de un 24,7% el pH es 4,6; la capacidad de inter-

cambio de cationes con Ca Cl_2 es de 15,1 mc/100 gramos de suelo para NH_4OAc es de 48,9 mc/100 gramos de suelo; el porcentaje de saturación de bases es de 1%. El horizonte A_{12} tiene de 38-72 cm de profundidad, un 17% de arena, 42% de limo y un 37% de arcilla; el contenido de materia orgánica es de un 22,5%; pH 5,0; capacidad de intercambio de cationes en miliequivalentes por 100 gramos de suelo para CaCl_2 14,5 y para NH_4OAc 55,0; porcentaje de saturación de bases 0,1. Las muestras de suelo para este experimento fueron tomadas del mismo lugar y dos meses después de donde se tomaron las muestras para el estudio hecho por Knox y Maldonado (17). Para este experimento se tomaron muestras de los horizontes A_p y A_{12} en más o menos igual cantidad; luego se secaron al aire, se tamizaron con mallas de 2 mm. y se homogenizaron. Una vez homogenizadas se colocaron cantidades de 1,64 kilogramos de muestra con un volumen aproximado de 1923,4 cc por capa de suelo.

3.3 El agua

Para evitar posibles problemas de sales en el agua, se usó el agua de lluvia recogida por el techo del invernadero y almacenada en barriles de lata cubiertos con pintura por dentro y por fuera para evitar la oxidación.

3.4 Succiones de humedad en el tomate

Como planta indicadora para este experimento se usó el tomate (Lycopersicon esculentum commune var. commune). No se ha determinado con precisión la succión óptima para esta planta. Flocker y Lingle (7) encontraron que la succión máxima de 2 bares fue mejor que la 0,7 bares. Se consideró que las succiones máximas óptimas varían entre 1 y 2 bares. En cambio Marsh (20) recomienda las succiones comprendidas entre 0,6 y 0,7 bares. Se escogió como punto central del diseño de este experimento la succión de 1,5 bares, o sea la medida aritmética de los extremos establecidos por Flocker y Lingle (7).

3.5 El invernadero

El experimento se llevó a efecto en una edificación adyacente a los Laboratorios de Suelos del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la Organización de Estados Americanos.

Las macetas se colocaron en hileras y distribuidas al azar sobre una mesa construída para ensayos en macetas, cuyas dimensiones son: 1,5 metros de largo, 1,10 metros de ancho y a unos 0,70 metros de la superficie del suelo.

Durante el período de aplicación de los tratamientos de succión se anotaron las temperaturas máximas y mínimas y las horas de ocurrencia en las dos capas de suelos de una maceta por medio del termógrafo de dos bulbos marca "Foxboro" serie 27927 y para la temperatura

ambiente, termómetro de alcohol de la "Taylor". Como se observa en el cuadro no. 2 del apéndice, ninguna de las temperaturas máximas excedió a 29° C límite máximo de temperatura para tomate establecidos por Shoemaker (32). Tampoco las temperaturas mínimas fueron más bajas de 15° C, límite crítico mínimo establecido para tomate por Work y Carow (42).

3.6 Manejo del experimento en el invernadero

Las muestras de suelo una vez secadas al aire, pesadas y homogenizadas, se fertilizaron con dosis de N,P,Ca recomendadas por Martini ^{a/}, en base a la densidad aparente de 0,5 gramos por cc de suelo y 15 cm de profundidad, que fueron las siguientes: N 200 kg/ha como urea, P₂O₅ 500 kg/ha como fosfato monósódico, Ca 500 kg/ha como carbonato. Después de fertilizado el suelo se instaló la capa inferior del mismo en las macetas y en ella los aparatos de medición de la humedad en forma tal que sus posiciones fueran más o menos iguales en todas y que midiesen aproximadamente la succión media para el total de la capa de suelo. Sobre la capa inferior de suelo se instaló el tabique que la separó de la capa superior donde también se instalaron aparatos de medición de humedad en forma similar a la capa inferior. Seguidamente se efectuó el primer riego en cantidades de agua tales que llevasen al suelo a una succión de 0,34 bar.

^{a/} Martini, J. A. Comunicación personal.

El día 24 de mayo de 1970 se realizó la siembra de las semillas de tomate. Por 10 semillas plantadas por maceta germinaron uniformemente entre el 28 y 29 del mes de setiembre. A los 7 días de nacidas las plantas se efectuó el primer raleo, se dejó un número de 6 plantas. Otro raleo se hizo a los 14 días de nacidas en el que se dejó solamente 3 plantas. Finalmente a los 21 días de nacidas, de las tres plantas se eliminó la de aspecto menos satisfactorio. Ese mismo día se irrigó por segunda vez todas las macetas hasta que la succión bajó a 0,01 bar. Se llevó a cabo una tercera irrigación 28 días después de nacidas las plantas, en igual magnitud a la anterior, pero como las plantas no desarrollaron satisfactoriamente, se decidió poner una fertilización básica adicional a la anterior completa recomendada por Martini, en comunicación personal. Las dosis de fertilizante aplicadas en el agua de riego fueron las siguientes: N 200 Kg/ha como urea, P_2O_5 500 Kg/ha como fosfato monosódico, K_2O 200 Kg/ha como cloruro, Ca 500 Kg/ha como carbonato, Mg 300 Kg/ha como carbonato, S 100 Kg/ha como sulfato de sodio, Cu 10 Kg/ha como cloruro, Zn 20 Kg/ha como cloruro, Mn 40 Kg/ha como cloruro, Fe 50 Kg/ha como citrato, Mo 10 Kg/ha como molibdato de sodio y B 10 Kg/ha como bórax.

Posteriormente a la tercera irrigación se dejó que la capa superior de suelo se secase al máximo para estimular el desarrollo de las raíces en la capa inferior. Este hecho se comprobó cuando los tensiómetros de esa capa comenzaron a marcar succiones mayores de 0,01 bar. Cuando en la capa superior de suelo había una succión aproximada de 2,0 bares y en la inferior de 1,5 bares, en la mayoría

de las macetas se consideró que era el momento adecuado para iniciar los tratamientos de diferentes succiones de humedad para las dos capas de suelos. Los tratamientos aplicados se determinaron como se explica en el párrafo siguiente.

3.7 Tratamientos de succión de humedad aplicados en el experimento

Se determinó que el diseño más adecuado de acuerdo a los objetivos del experimento sería el "diseño de superficie de respuesta" ^{a/} con un punto central rotativo. El punto central se fijó de antemano en 1,5 bares por las razones antes apuntadas (párrafo 3.3). Equidistantes del punto central y generando un círculo, se escogen las otras succiones para ambas capas de suelo según la siguiente fórmula:

$$X = (I.C) + A \quad \left[\sqrt{4} \right]$$

I es el intervalo en valores de succión una vez establecido el punto central y el mínimo (0,006 bar), X es el valor numérico de la succión, A es el punto central (1,5 bares) y C es el cociente de proporcionalidad. Con esa fórmula se determinó la succión para cada tratamiento y repetición en cada capa de suelo, como se puede ver en el cuadro 1.

^{a/} Box, G. E. P and Wilson, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. Jour. Royal of Stat. Soc. Series B . 13:1-45. 1951.

Cuadro 1. Tratamientos de succiones de humedad aplicados en el experimento

Nº de identificación	Succiones mínimas para todos los tratamientos (bar)	Succiones máximas (bares)	
		Capa superior	Capa inferior
1	0,05	1,50	1,50
2	0,05	1,50	0,006 *
3	0,05	0,44	0,44
4	0,05	0,006 *	1,50
5	0,05	0,44	2,55
6	0,05	1,50	2,99
7	0,05	2,55	2,55
8	0,05	2,99	1,50
9	0,05	2,55	0,44

* Las succiones de 0,006 bares no tienen succión mínima por mantener la humedad con flujo constante

Si se grafican los datos dados en el cuadro 1 de manera que en las abcisas se anoten las succiones de la capa ^{superior} inferior y en las ordenadas las succiones para la capa inferior de suelo, se puede observar que, los tratamientos de 1,5 y 1,5 bares son el centro de una circunferencia. Los otros puntos forman parte de la circunferencia equidistantes entre sí y del punto central.

De manera que, el diseño del experimento consiste en un factorial de 5^2 con 4 repeticiones en parcelas completamente al azar, lo que indica que hay dos tratamientos: la succión en la capa superior

y la succión en la capa inferior. Cada tratamiento tiene 5 niveles que son en bares: 0,006, 0,44, 1,50, 2,55 y 2,99.

En la práctica, para llevar al suelo a cada succión se irrigó a la succión mínima de 0,05 bares y se dejó que la planta extrajera el agua de cada capa de suelo hasta la succión fijada como máxima. Para controlar el momento en que el suelo llegó a dicha succión máxima, se hicieron lecturas de humedad varias veces al día. En un registro de datos se anotó las cantidades de agua consumida para bajar la succión máxima a la mínima, ésta se controló por medio de los tensiómetros manuales de manera que, cuando la succión en cada capa de suelo estaba en equilibrio con una columna de agua de 50 centímetros, se suspendía el suministro de agua. El agua se proveyó al suelo por medio de un vaso plástico graduado y un tubo plástico que por un extremo se introducía en el agua y por el otro tocaba el suelo formando un sifón. Para que el agua no entrase violentamente al suelo y originara goteo, se cubrió el cabo que tocaba el suelo con una pared de papel absorbente (ver dibujo 1)

3.7.1 Modelo matemático del experimento

La succión de cada capa de suelo se consideró como un factor independiente, bajo la presuposición de que los demás elementos fueran constantes, de manera que, las diferencias obtenidas en las variables medidas en las plantas, fuesen una función de la succión en las dos capas de suelo. En base a lo anterior se consideró que

el modelo matemático adecuado al experimento en cuestión podría ser:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 \quad [5]$$

o bien:

$$\hat{Y} = b_0 - b_1^{x_1} - b_2^{x_2} \quad [6]$$

en que \hat{Y} es la variable medida en la planta; b_0 una constante; b_1x_1 cambio por efecto de la succión en la capa superior; b_2x_2 cambio en y por efecto de la succión en la capa inferior; $b_{11}x_1^2$ y $b_{22}x_2^2$ son cambios en b_1x_1 y b_2x_2 ; $b_{12}x_1x_2$ efecto de interacción.

3.8 Conclusión del experimento en el invernadero

A los 22 días de iniciados los tratamientos de succiones del experimento, y aproximadamente a los 43 días de nacidas las plantas, se inició la floración que es la época en que el crecimiento vegetativo del tomate disminuye. Fue cuando se realizó la "cosecha del experimento"; se anotó la longitud final de los tallos, el peso en fresco y el peso en seco (a 38°C durante 48 horas en horno de desecación). Además de esos datos se anotó durante el experimento, el crecimiento diario de los tallos de manera que, por diferencia, se pudo determinar la elongación de los mismos hasta el momento de corte.

Los datos a analizar después del experimento fueron los siguientes: peso fresco; peso seco; longitud total de los tallos; elongación de los tallos durante la época de aplicación de los tratamien-

tos; elongación de los tallos durante los tratamientos en porcentaje de crecimiento total; cantidades de agua consumida por maceta y tratamiento, energía consumida por las plantas durante los tratamientos en ergios por cc por maceta; y energía consumida por maceta en ergios; también se buscó un factor de eficiencia para el consumo de agua que es el siguiente:

$$= \frac{\text{Variable de la planta}}{\text{volumen de agua consumida}} \quad [7]$$

La energía consumida por volumen de agua por maceta está dada por las energías individuales consumidas por capa de suelo que, se obtiene así:

$$E_v = (S_f - S_i) V \quad [8]$$

Donde E_v es la energía utilizada por las plantas, por maceta, para extraer el agua consumida por volumen de agua por maceta; S_f es la succión máxima del tratamiento; S_i es la succión mínima del tratamiento; V es el volumen de agua consumida por maceta durante la aplicación de los tratamientos. La energía consumida por cc por maceta se obtiene dividiendo E_v entre V .

Una vez obtenidos los datos se sometieron al análisis de varianza para separar los efectos y detectar la significancia entre tratamientos. Luego se efectuó el análisis de tendencias para determinar el tipo de curva a que obedece el fenómeno. También se procesaron datos de los lapsos de tiempo entre las aplicaciones de irrigación y las succiones máximas de tratamiento y número de riegos para

poder calcular la succión media para los cultivos, elaborada por Taylor (36, 37) y correlacionar esa media con la respuesta del tomate. Se hizo una modificación a la ecuación de Taylor [16] que consistió en tomar como índice de profundidad el valor en sí, y no el número de profundidades. Tal cosa fue hecha para independizar el cálculo del número de profundidades.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Análisis de varianza de los resultados

Los valores obtenidos al final del experimento son, peso fresco y seco de las partes aéreas de las plantas, elongación de los tallos a partir del primer día de tratamiento de succiones y volúmenes de agua consumidos por cada capa por las plantas. Luego se calculó la energía utilizada por las plantas en la absorción de agua durante la aplicación de los tratamientos y los índices de eficiencia de consumo de agua. Los datos enumerados se sometieron al análisis de varianza para separar efectos y observar significancia a niveles de probabilidad del 1 y 5 por ciento de probabilidad. Los resultados obtenidos de tales análisis son los siguientes:

4.1.1 Análisis de varianza para volúmenes de agua consumidos por tratamiento de succión máxima

FV	GL	SC	CM	Fc	
R	3	950087	316682,66	1,5318	NS
TR	8	12277253	1534656,62	7,4233	**
E	24	4961627	206734,45		
To	36				

Los símbolos son: FV fuente de variación; R repeticiones; TR tratamientos; E error experimental; GL grados de libertad; SC suma de cuadrados; CM cuadrados medios; Fc valor de distribución de F calculado.

lada; NS no significancia; * significativo al 5 por ciento; ** altamente significativo o significativo al nivel del 1 por ciento; (Em, error de muestreo en caso de analizar en base a las dos plantas por maceta). Los resultados indican que los diferentes consumos de agua son efecto de los tratamientos aplicados, o sea, las succiones máximas por maceta.

4.1.2 Análisis de varianza para eficiencia de consumo de agua

La eficiencia del consumo de agua resultó ser significativa al nivel de probabilidad de 5 por ciento según el siguiente análisis:

FV	GL	SC	CM	Fc	
R	3	0,00059	0,00019	1,5291	NS
TR	8	0,00305	0,00038	2,9337	*
E	24	0,00312	0,00013		
Em	36	0,00119			
To	71				

En este caso se agrega Em que equivale a error de muestreo.

4.1.3 Análisis de varianza para energía total consumida en
ergios por maceta

Según el análisis se encontró diferencias significativas al nivel del 5 y 1 por ciento de acuerdo a los siguientes resultados:

FV	GL	SC	CM	Fc	
R	3	1624	541,33	0,4642	NS
TR	8	237976	29744,00	25,5090	***
E	24	27987	1166,12		
To	36				

4.1.4 Análisis de varianza para las elongaciones de los tallos
a partir de la aplicación de los tratamientos

Para este caso las diferencias de elongación fueron también altamente significativas al 5 y 1 por ciento de probabilidad como indican los siguientes resultados:

FV	GL	SC	CM	Fc	
R	3	221,01	73,67	2,1037	NS
TR	8	3492,37	346,54	9,8959	***
Ee	24	840,46	35,19		
Em	36				
To	71				

4.1.5 Análisis de varianza para las respuestas de peso seco de la parte aérea de las plantas

Según el análisis de varianza del peso seco de las partes aéreas de las plantas indica alta significancia según tratamientos. Los resultados son los siguientes:

FV	GL	SC	CM	Fc	
R	3	18,44	6,146	2,3238	NS
TR	8	153,74	19,217	7,2655	**
Ee	24	63,48	2,645		
Em	36				
To	71				

Como se apreció en los análisis de varianza mostrados, no se encontró significancia para las repeticiones en todos los casos estudiados, esto indica que las parcelas fueron lo suficientemente homogéneas como para considerarse de una misma población por tratamiento. En cambio los efectos de los tratamientos son significativos o altamente significativos lo que indica que las diferencias obtenidas en las variables medidas son causadas por los tratamientos de succiones.

4.2 Análisis de tendencia de los resultados

Las sumas de cuadrados obtenidas en el análisis de varianza preliminar descrito anteriormente, se descompusieron en sus componentes lineales y cuadráticas para investigar por la prueba de distribución de F la significancia lineal y cuadrática, dicho análisis indicó significancia para los componentes cuadráticos. Sin embargo en la práctica al aplicar la ecuación de tipo cuadrático a los datos obtenidos en el ensayo se encontró que a succiones mayores de 1,5 bares el modelo cuadrático elevó en exceso los valores de la variable en estudio excepto para los resultados de eficiencia de consumo de agua y energía consumida en el total de la maceta.

Como paso siguiente se probaron otros modelos matemáticos que se pudieran adaptar mejor a los resultados. Se encontró que el modelo geométrico dió altas correlaciones y al aplicar la ecuación a los datos obtenidos en el ensayo, estos se ajustaron mejor a los resultados.

4.2.1 Elongación de los tallos y la succión del suelo

En la fig. 6 se representan los resultados de elongación de los tallos de tomate según los tratamientos de succiones máximas estimadas de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\hat{Y} = 56,70 - 12,97^{x1} - 10,95^{x2}$$

[9]

en que \hat{Y} representa la elongación en centímetros de los tallos durante la época de aplicación de los tratamientos, x_1 y x_2 representan las succiones máximas en la capa superior e inferior respectivamente. Ya se ha comprobado en muchas plantas que la elongación de los vástagos es una función de la succión del agua en el suelo, lo mismo se ha concluido con la producción de cosechas, pero dichos resultados se han asociado con succiones a una sola profundidad o bien como propuso Taylor (36) el uso de medias ponderadas con profundidades y tiempo.

Los resultados del experimento demuestran que las elongaciones son similares cuando ambas capas de suelo se mantienen con la succión máxima de 0,44 bares comparadas con las obtenidas con la combinación de 0,006 y 1,5 bares de succión máxima en cada capa; esto es debido a que las plantas obtienen el agua en mayor cantidad de donde tienen que hacer menos esfuerzo; lo que indica que hay que ser cuidadoso al estimar el estado de humedad del suelo cuando se tienen capas de suelo con diversas succiones, principalmente cuando las diferencias son muy grandes. En el caso del tomate se puede decir que a succiones máximas mayores de 0,44 bares en ambas capas, la elongación de los tallos alcanza menores longitudes en una relación geométrica inversa a las succiones máximas del agua en ambas capas de suelo.

4.2.2 Producción de materia seca según succión

El comportamiento de las plantas de tomate en la producción de materia seca de las partes aéreas, ante las succiones máximas aplicadas como tratamientos en las dos capas de suelo, fue similar al de la elongación de los tallos y obedece al mismo tipo de función:

$$\hat{Y} = 8,24 - 1,34^{x_1} - 1,13^{x_2} \quad [10]$$

\hat{Y} representa la producción de materia seca en gramos, x_1 y x_2 representan las succiones máximas en la capa superior e inferior de suelo respectivamente.

En el gráfico 7 se presentan los valores de peso seco estimados por la ecuación [10]. Como se puede observar en los datos del cuadro 1 del apéndice, las succiones máximas de rendimiento máximo fueron las de 0,44 bares. El rendimiento de materia seca decrece al aumentar la succión en forma rápida entre 1,50 y 2,55 bares y antes y después ese rango de succiones máximas los rendimientos de materia seca disminuyen en forma menos drástica, también se observa que el efecto es más acentuado en la capa inferior ya que la pendiente de la curva disminuye al seguir aumentando la succión en el suelo, este fenómeno no sucedió con las elongaciones de los tallos, más bien al seguir aumentando la succión la tendencia es de crecer la pendiente de la curva. Las observaciones hechas para la elongación de los tallos son valederas para el caso de producción de materia seca. Cabe aclarar que se consideró que las succiones máximas para el mayor desarrollo de las plantas de tomate fueron las menores que

0,44 bar, pero es poco probable que se obtengan mayores producciones de materia seca a 0,006 bares, como muestran los gráficos de los datos estimados por las ecuaciones [9] y [10], en que γ (estimada) aparece mayor que la de 0,44 bares de succión máxima, debido a un pequeño error del modelo matemático empleado, para describir el comportamiento de producción de materia seca por las plantas según succión, porque a succiones tan bajas sería otro factor el que restringiría el crecimiento de las plantas, tal es el exceso de agua que no permitiría la respiración y normal funcionamiento de las raíces.

Como se vió en la literatura revisada, las succiones máximas óptimas encontradas para tomate son mayores que las encontradas en este trabajo. Eso puede atribuirse a diferencia en la variedad empleada en el estudio o bien a las condiciones ambientales donde se desarrolla la planta.

Para el consumo de energía total por succión el análisis de tendencia indica que una función cuadrática como se puede ver en gráfico 8, la ecuación encontrada para estos resultados es la siguiente:

$$\hat{Y}_3 = 1399 + 71,72 x_1 + 42,31 x_2 + 5,27 x_1^2 - 8,73 x_2^2 - 7,5 x_1 x_2 \quad [11]$$

en que \hat{Y}_3 es la energía consumida por maceta x_1 y x_2 son las succiones en la capa superior e inferior respectivamente.

Como se puede apreciar en las curvas de consumo de energía total por maceta por succión, al aumentar la succión la planta tiene

que ejercer una fuerza mayor para absorber un volumen de agua. Al comparar la energía que las plantas consumen a 1,50 bares de succión máxima en la capa superior y 0,006 bares en la capa inferior, con la consumida a 1,5 bares en la capa inferior y 0,006 bares en la capa superior se ve que son diferentes entre sí y mayor la consumida en el último ejemplo. Lo mismo sucede en todos los casos, esto demuestra que para las condiciones en que se efectuó el experimento tuvo mayor importancia la humedad de la capa superior. Lo dicho anteriormente es corroborado por los índices de eficiencia encontrados al dividir la elongación de los tallos entre el volumen de agua consumida y el cociente multiplicados por mil. En el cuadro 2 se presentan los datos obtenidos de la ecuación de tendencias de la eficiencia que a continuación se describe:

$$\hat{y}_2 = 19,72 + 33,20 x_1 + 5,04 x_2 + 2,04 x_1^2 + 1,62 x_2^2 + 2,51 x_1 x_2 \quad [12]$$

Los términos x_1 y x_2 representan las succiones en la capa superior e inferior respectivamente, y representa el valor de la eficiencia. La ecuación descrita anteriormente es una típica cuadrática con índice de asociación (R^2) de un 85,92 por ciento.

Como es de esperarse, las plantas que crecen con succiones máximas altas se ven obligadas a hacer un mejor uso del agua, mientras que las plantas que crecen con succiones máximas más bajas al hacer un menor esfuerzo para obtener un volumen dado de agua, lo usan con menor eficiencia.

Cuadro 2. Eficiencia de consumo de agua por tratamiento de succiones máximas $\left(\frac{\text{peso seco}}{\text{volumen de agua consumido}} \right)$

Bares de succión máxima en la capa inferior	Bares de succión máxima en la capa superior				
	0,006	0,45	1,50	2,55	2,99
0,006	19,77	21,57	29,33	41,50	47,93
0,44	22,25	24,56	33,46	46,78	53,70
1,50	30,90	34,36	46,37	49,04	70,25
2,55	43,15	47,76	62,57	81,14	90,36
2,99	49,32	54,51	70,39	90,13	99,89

Los índices del cuadro 2 tienen un sentido inverso al del desarrollo de las plantas, ya que a mayor eficiencia en el consumo de agua el crecimiento es menor.

4.3 Otras variables independientes para determinar la humedad del suelo en función de la planta

Como otro de los objetivos del trabajo es determinar la forma más adecuada de tratar los datos de humedad del suelo, para asociarlos al desarrollo de las plantas se trató de establecer el grado de correlación entre la producción de materia seca con la energía consumida por capa de suelo, energía total consumida, promedio de succiones máximas y mínimas por capa de suelo, promedio de promedios

de succiones por maceta, promedio de succiones máximas, succiones ponderadas con profundidades y tiempo, succiones ponderadas con la cantidad de agua consumida por la planta y succiones máximas. A continuación se dan los índices de asociación para tres modelos de curva usados y su significancia.

Como se ve en el cuadro 3, el modelo que por lo general ajustó mejor a los datos fue el cuadrático, excepto en el caso de las succiones máximas y succiones máximas promedio por maceta donde el modelo geométrico fue ligeramente mejor que el cuadrático. Todos los datos dieron correlaciones altamente significativas pero se puede decir que los valores que mejor correlacionaron con la producción de materia seca son los de promedios de succiones máximas y mínimas por capa de suelo, le siguió en importancia la energía consumida por capa de suelo. En tercer lugar se encuentran las succiones máximas por capa de suelo. Es notorio que las mejores correlaciones se obtuvieron siempre que se trató independientemente cada capa de suelo, en cambio al promediar los valores de la capa superior e inferior las correlaciones bajas excepto cuando se ponderó con profundidad y tiempo, que ocupa un cuarto lugar en la escala de índices de R^2 .

De manera que la mejor forma de juzgar la humedad del suelo con relación a la planta en la zona radicular, es tratar ya sean las succiones máximas promedio de máximo y mínimo o energía consumida, por capas separadas donde las humedades sean diferentes.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las correlaciones, los datos de producción de materia seca, se ajustan a ecuaciones cuadráticas más que a otro tipo de ecuación. En el caso de succiones máximas se puede tomar para la representación de la correlación, tanto la ecuación cuadrática como la geométrica.

A continuación se dan las ecuaciones cuadráticas de cada una de las variables independientes con la variable dependiente (materia seca en gramos).

a) $\hat{Y} = 6,48 + 0,0146 x_1 + 0,0055 x_2 - 0,000001 x_1^2$ [13]

\hat{Y} = materia seca en gramos

x_1 = Energía en ergios utilizada en la capa superior

x_2 = Energía en ergios utilizada en la capa inferior

b) $\hat{Y} = 7,456 - 2,01 x_1 - 0,387 x_2 - 0,460 x_1^2 - 0,1318 x_2^2 - 0,024 x_1 x_2$ [14]

\hat{Y} = materia seca en gramos

x_1 = Promedio de succiones (máximas y mínima) por capa de suelo superior

x_2 = Promedio de succiones (máxima y mínima) por capa de suelo inferior

c) $\hat{Y} = 6,207 - 0,737 x - 0,857 x^2$ [15]

\hat{Y} = Producción de materia seca en gramos

x = Promedio de promedios de succiones en las macetas

d) $\hat{Y} = 8,25 - 6,815 x - 2,39 x^2$ [16]

\hat{Y} = Producción de materia seca en gramos

x = Succiones máximas promedio por maceta

e) $\hat{Y} = 7,301 - 1,432 x - 0,1135 x^2$ [17]

\hat{Y} = Producción de materia seca en gramos

x = Succiones ponderadas, energía total consumida por maceta entre volúmenes de agua consumidos por maceta

$$f) \hat{Y} = 6,868 - 0,314 x_1 + 0,476 x_2 - 0,274 x_1^2 - 0,162 x_2^2 - 0,090 x_1 x_2$$

[18]

\hat{Y} = Producción de materia seca en gramos

x_1 = Succión ponderada, energía total consumida en la capa superior dividida por volúmenes de agua consumidos en la capa superior

x_2 = Succión ponderada, energía total consumida en la capa inferior dividida por volúmenes de agua consumidos en la capa inferior

$$g) \hat{Y} = 7,793 - 2,254 x + 0,119 x^2$$

[19]

\hat{Y} = Producción de materia seca en gramos

x = Succiones ponderadas con profundidad y lapso de tiempo entre riegos por maceta

5. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos se puede concluir:

1. Se reafirma que el crecimiento de las plantas es una función de la succión del agua en el suelo.
2. Cuando hay condiciones de retención de agua diferentes a diferentes profundidades, en el mismo suelo, la planta obtiene el líquido de donde tiene que ejercer menos energía para conseguirlo.
3. De las succiones máximas para el crecimiento de plantas de tomate donde se obtuvo mejores respuestas son de 0,44 bares en la zona radicular (en las dos capas de suelo).
4. A pesar de ser las macetas un ambiente pequeño para el sistema radicular de las plantas de tomate, se notó que la succión según la profundidad influye en diferente magnitud en el desarrollo de la planta.
5. Aunque la planta tenga una parte de su sistema radicular en una zona con suficiente agua para cubrir sus necesidades, y la otra en una zona seca, sufre detrimento en el crecimiento.
6. Existen otras variables independientes que pueden definir la humedad en el suelo con relación a la planta. De las estudiadas, las que mejor se correlacionan son la energía consumida por estrato de suelo, los promedios de succiones mínimas y máximas por estrato de suelo y las succiones máximas por estrato de suelo.

7. La mejor manera de describir la humedad en el suelo es por capas a diferentes profundidades de acuerdo al desarrollo radicular. En suelos estratificados sería mejor considerar los horizontes naturales.

6. RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo determinar cómo es afectado el crecimiento de las plantas de tomate cuando en el suelo hay diferentes condiciones de succión e investigar si hay otras formas satisfactorias para determinar la humedad del suelo en relación a las plantas además de las succiones máximas.

Para efectuar la idea anteriormente dicha se realizó un ensayo de invernadero en forma tal que se pudieran controlar las succiones máximas y mínimas en dos capas de suelo con bastante exactitud.

Cuando las raíces de las plantas habían pasado de la capa superior a la capa inferior, se consideró el momento adecuado para aplicar los tratamientos de succión. Al comenzar la floración se cosechó el experimento y se investigó la significancia estadística de los efectos por medio del análisis de variancia y para peso seco y elongación de los tallos de las plantas. Se buscó luego la ecuación que mejor ajustó a los datos obtenidos en el invernadero.

Se concluyó que la profundidad y la succión influyen en el crecimiento del tomate; que las plantas toman más agua en las capas de suelo donde está más fácilmente disponible y que hay otras formas además de las succiones máximas para juzgar el estado del agua en el suelo tales como energía consumida en la absorción del agua y los promedios de succiones máximas y mínimas.

7. LITERATURA CITADA

1. ANDERSON, B. C. A method of determining soil-moisture content based on the variation of the electrical capacitance of soil of low frequency, with moisture content. *Soil Science* 56:29-41. 1943.
2. BAVER, L. D. *Soil Physics*. 3a. New York, John Wiley, 1966. pp. 224-290.
3. BERNSTEIN, L. Osmotic adjustment of plants to saline media. *Plant Physiology* 36:22. 1961.
4. BLAKE, G. R. and PAGE, J. B. Direct measurement of gaseous diffusion in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. 13:37-42. 1948.
5. BUCKMAN, H. O. y BRADY, N. C. *Naturaleza y propiedades de los suelos*. Tr. R. Gaylord, UTREA, México, 1966. pp. 169-196.
6. FELDSTEIN, J. and CHILDERS, N. F. Effect of irrigation on fruit size and yield of peaches in Pennsylvania. *American Society of Horticultural Science, Proceedings*, 69:126-130. 1957.
7. FLOKER, W. J. and LUNGLE, J. C. Field application of tensiometer and soil moisture blocks as criteria for irrigation of canning tomatoes. *American Society Horticultural Science Proceedings* 78:450-458. 1961.
8. FORSYTHE, W. M. and VASQUEZ, O. Effect of air drying on the water retention curves of the three volcanic ash soils of Costa Rica. (En elaboración).
9. GATES, C. T. The response of the young tomato plant to a brief period of water shortage. *Australian Journal of Biological Science* 8:196-214. 1955.
10. GRINGRISH, J. R. and RUSSELL, M. B. Effect of soil moisture tension and osmotic stress on root growth. *Soil Science* 84:185. 1957.
11. HAINES, W. G. *Studies in the physical properties of soil*. V. The Hysteresis effect in capillary properties and the modes of moisture associated therewith. *Journal Agricultural Science* 20:97-116. 1930.

12. HALL, A. D. y ROBINSON, G. V. Estudio científico del suelo. 5a. Tr. José García Aguilar. Madrid, 1961. pp. 73-113.
13. HARRIS, F. S. y TURPIN, H. W. Movement and distribution of moisture in the soil. Journal Agronomy Research 1:139-189. 1917.
14. HENDRICKSON, A. H. and VEIHMEYER, F. J. Irrigation experiments with peaches in California. Agronomy Experiment Station. Bulletin 467. 56 p. 1929.
15. HOLMES, J. W., TAYLOR, S. A., RICHARD, S. J. Measurement of soil water. En Irrigation of agricultural lands. Ed. R. C. Dinauer, Nº 11 in the serie Agronomy. American Society of Agronomy 1967. p. 275.
16. HUNTER, A. S. and KELEY, O. J. Extension of plant root into dry soil. Plant Physiology 21:445-451. 1964.
17. KNOX, E. G. y MALDONADO, F. Suelos de cenizas volcánicas. Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. Centro de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica, 1969. pp. A8.4-A8.12.
18. MACK, B. W. y TUTTLE, A. P. The relation among fertilizer treatment soil moisture, organic matter and yield of vegetable crops. Agronomy Journal 24:183-202. 1932.
19. MARRAKER, P. E. y BOTIER, C. E. Availability of soil moisture particularly as affected by depth of the soil of the Kentucky Experiment Station Farm at Lexington. Agronomy Journal 31:653-660. 1939.
20. MARSH, A. W. Questions and answers about tensiometers and their use. University of California. Agricultural Extension Service. Pub. AXT-92. pp. 12. 1963.
21. MILLER, E. C. Plant physiology. Mac Graw-Hill, N.Y. 1938. pp. 120-124.
22. OLSEN, S. R., WATANABE, F. S., and DANIELSON, R. E. Phosphate absorption by corn root as affected by moisture and phosphorus concentration. Soil Science Society of America Proceedings 25:289-294. 1961.
23. PETERS, D. B. Water uptake of corn roots as influence by soil moisture content and soil moisture tension. Soil Science Society of America Proceedings. 21:481-484. 1957.

24. _____., and RUSSELL, M. B. Ion uptake by corn seedlings as affected by temperatures, ion concentration, moisture tension and moisture content. Int. Congress. Soil Science Transactions, 7th. (Madison, Wisconsin, USA) 3:457-466. 1960.
25. _____., _____.. Shoot and root growth as affected by water availability. In Irrigation of Agricultural lands. Madison, Wisconsin. Agronomy No 11 American Society of Agronomy. pp.:386. 1967.
26. RICHARDS, L. A. Method for mounting porous plates used in soil moisture measurements. Agronomy Journal 41:487-490. 1949.
27. _____., y WADLEIGH, C. H. Soil Water and plant growth. Agronomy Vol. 11. Agronomy Academic Press, 1952.
28. _____. Experimental demonstration of the hydraulic criterion for zero flow of water in unsaturated soil. Int. Cong. Soil Sciences Transactions. Amsterdam 1:66-68. 1950.
29. RIOS, M. A. y PEARSON, R. W. The effect of some chemical environmental factors on cotton root behavior. Soil Science Society Proceedings 28:232-235. 1964.
30. ROBINS, J. S. and DOMINGO, C. E. Some effects of severe soil moisture deficit at specific growth stages in corn. International Agronomy 45:618-621. 1953.
31. RUSSELL, M. B. The use of tensiometer for following soil moisture conditions under corn. Agronomy Journal 32: 922-929. 1941.
32. SHOEMAKER, J. S. Vegetable growing. 2nd. ed. Wiley, N. Y., 1953. In Cáceres E. Producción de hortalizas. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas, Lima, Perú. 1966. pp. 26-2.
33. SLATYER, R. O. The influence of progressive increase in total soil moisture stress on transpiration, growth and internal water relationship of plant. Australian Journal Biological Science 10:320-336. 1957.
34. SOIL MOISTURE EQUIPMENT CO. Operation instructions for the Catalog No 2700B, Soil moisture gage. 8 p.

35. STOLZY, L. H. and G. LETEY. Measurement of oxygen diffusion rates with the platinum microelectrode. III Correlation of plant response to soil oxygen diffusion rates. *Hilgardia* 35:567-576. 1964.
36. TAYLOR, S. A. Estimating soil moisture tension in the root zone of growing crops. *Soil Science* 73:331-339. 1952.
37. _____. Use of mean soil moisture tension to evaluate the effect of soil moisture on crops yield. *Soil Science* 74: 217-226. 1952.
38. TUCKER, M. y VAN SEELHORST, C. Der einfluss welchen der wassergehalt und der reichum des bodens auf die ausbildung der wurzein und der oberindischer organe der hofelpflanze ausuber. *F. J. Landw* 46:52-63. 1898. En HAGAN, R. M. et al. *Irrigation of Agricultural Land*. Shoot and root growth as affected by water availability. *American Society of Agronomy*. 1967. p. 377.
39. VOLK, M. G. Significance of moisture traslocation from soil zones of low moisture tension by plant roots. *Agronomy Journal* 39:93-106. 1948.
40. WADLEIGH, C. H. Integrated soil moisture stress upon a root system in a large container of saline soil. *Soil Science* 61:225. 1946.
41. _____., and AYERS, A. D. Growth and biochemical composition of bean plants as conditioned by soil moisture tension and salt concentration. *Plant Physiology* 20:106-132. 1954.
42. WORK, P. and CAREW, J. *Vegetable production and marketing*. 2nd. ed. Cáceres, E. *Producción de hortalizas*. IICA, Lima, Perú. 1966.

FIGURAS

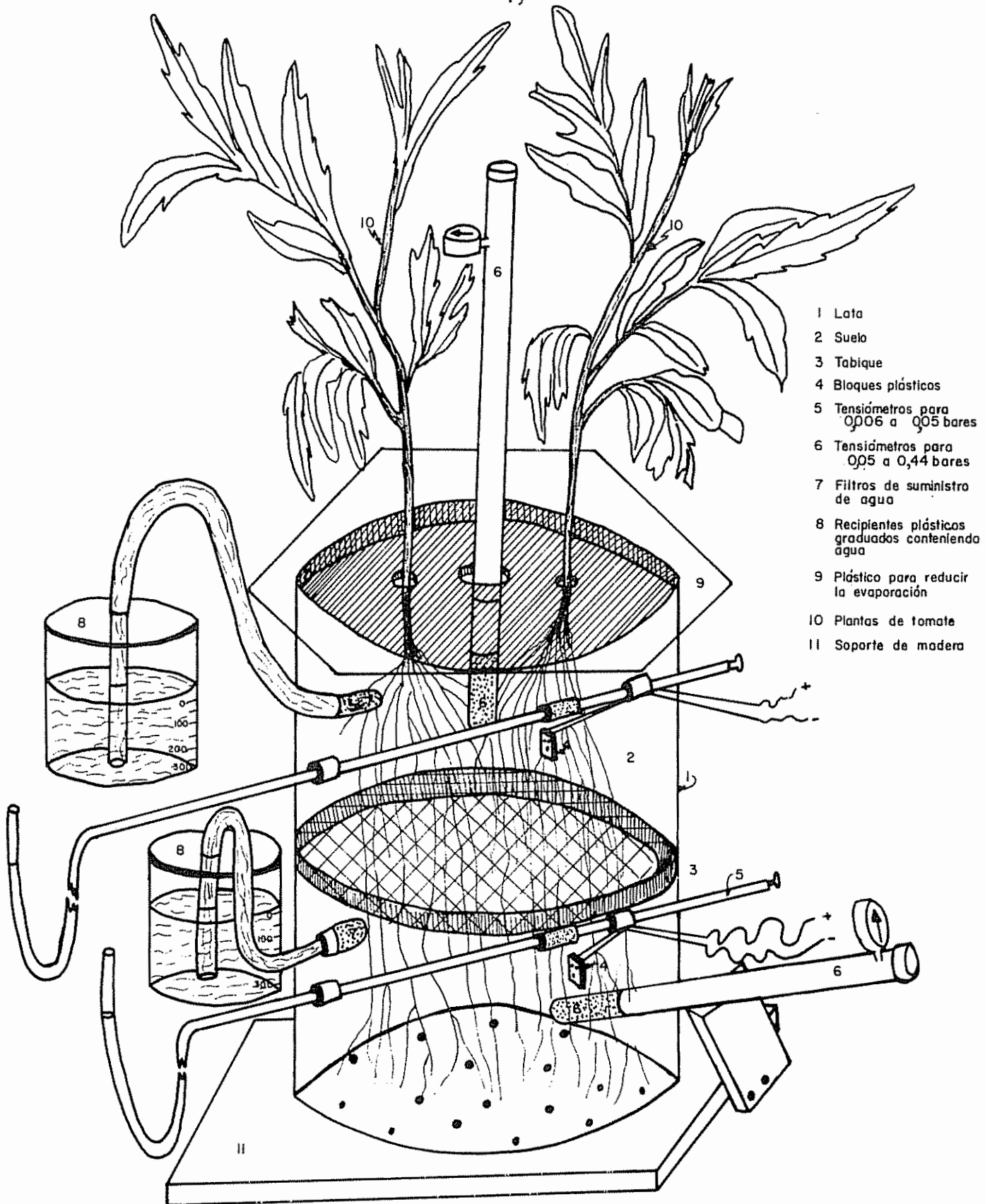


Fig 1 Modelo de maceta en caso hipotélico de instalación con todos los aparatos

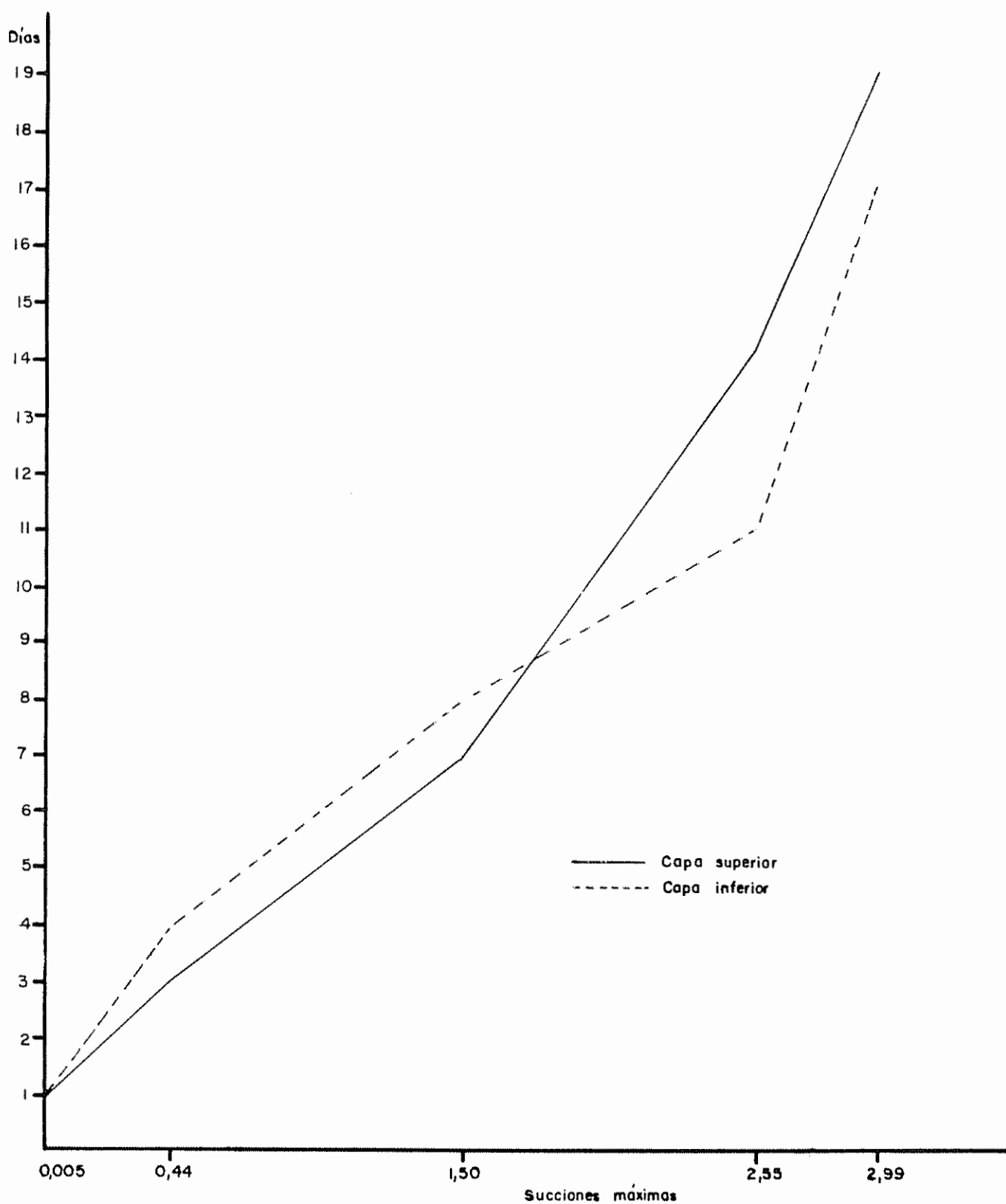


Fig. 3 Frecuencia de riego para succiones máximas por capa de suelo en base de los promedios de los tratamientos

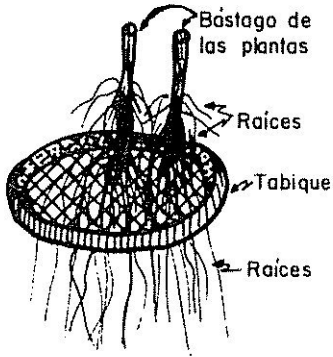


Fig. 2A Tabique trasado por las raíces de las plantas

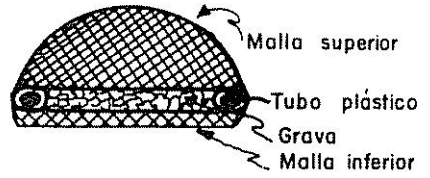


Fig 2B Corte transversal del tabique para separación de las dos capas de suelo

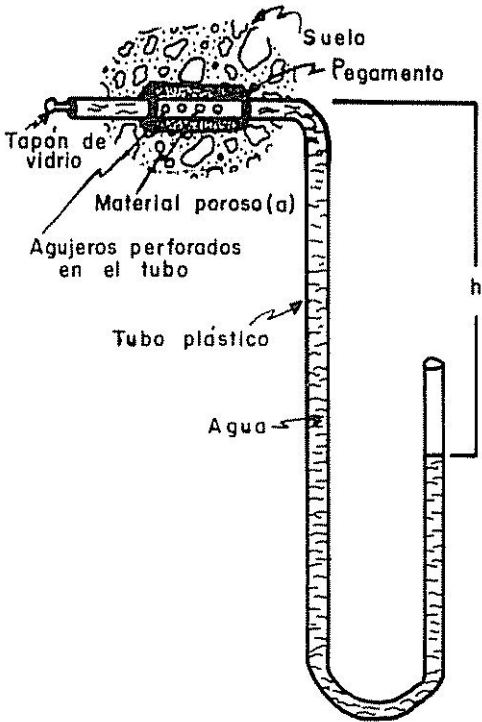


Fig. 3A Corte longitudinal de un tensiómetro fabricación manual

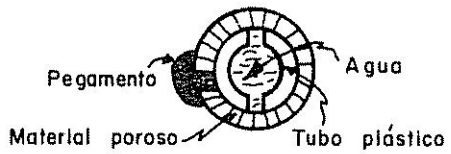


Fig 3B Corte transversal de la zona porosa (a) del tensiómetro de la figura 3A

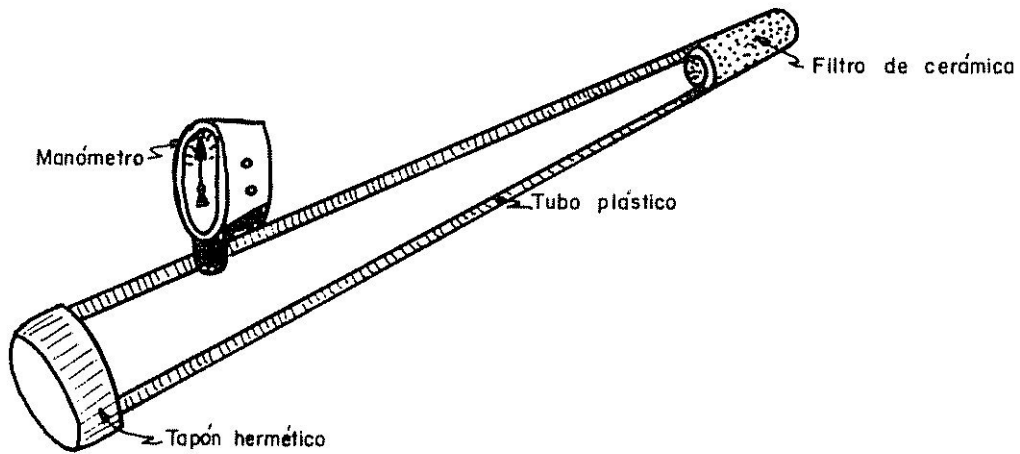


Fig. 4 Tensiómetro

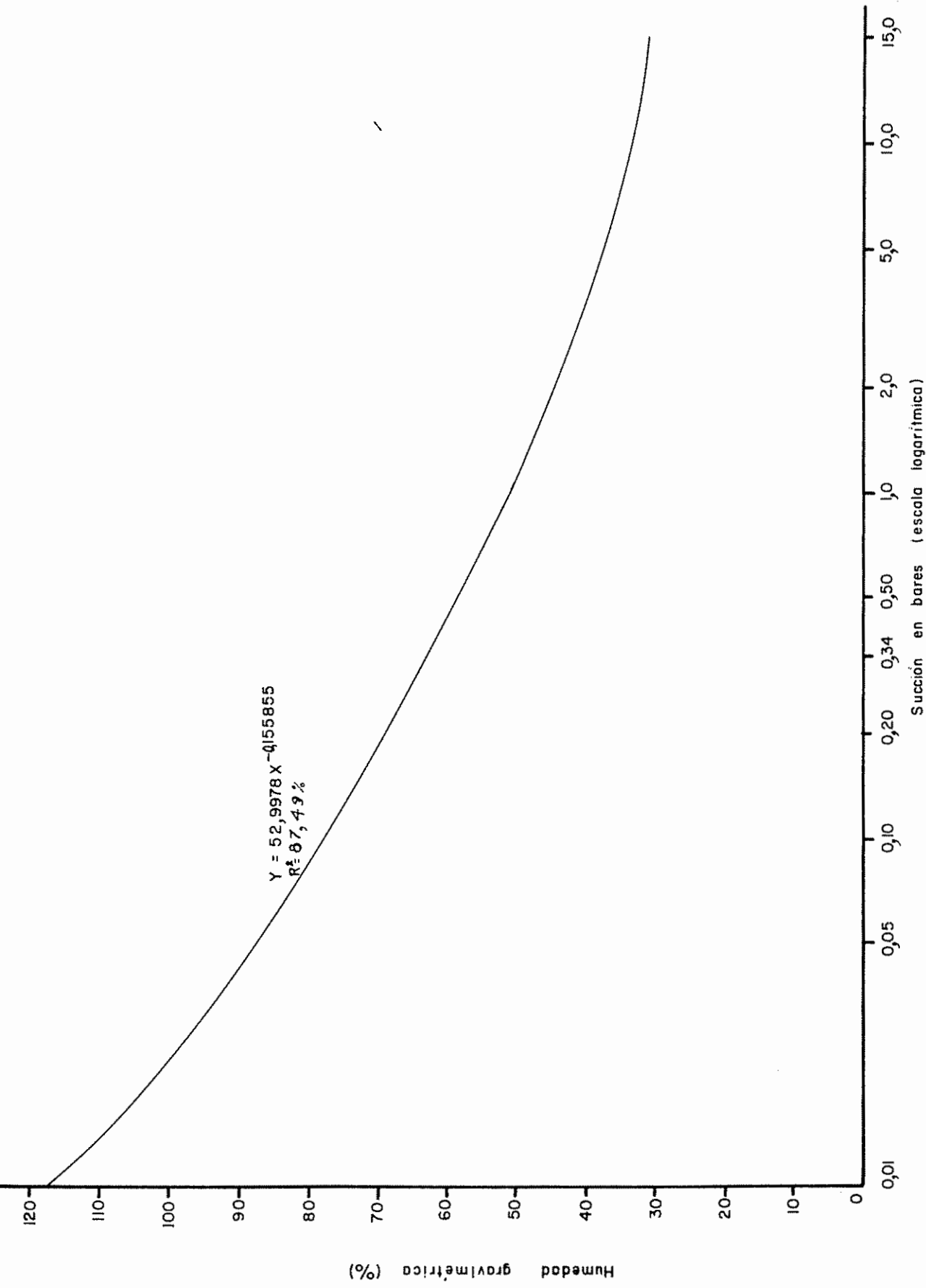


Fig. 5A Curva de la succión de la humedad de la humedad para Birrisito Ap, obtenida con muestras disturbadas y secadas al aire a/ a/ Forsythe, W. M. and Vásquez, O.
 Effect of air-drying on the water retention curves of the volcanic ash soil of Costa Rica

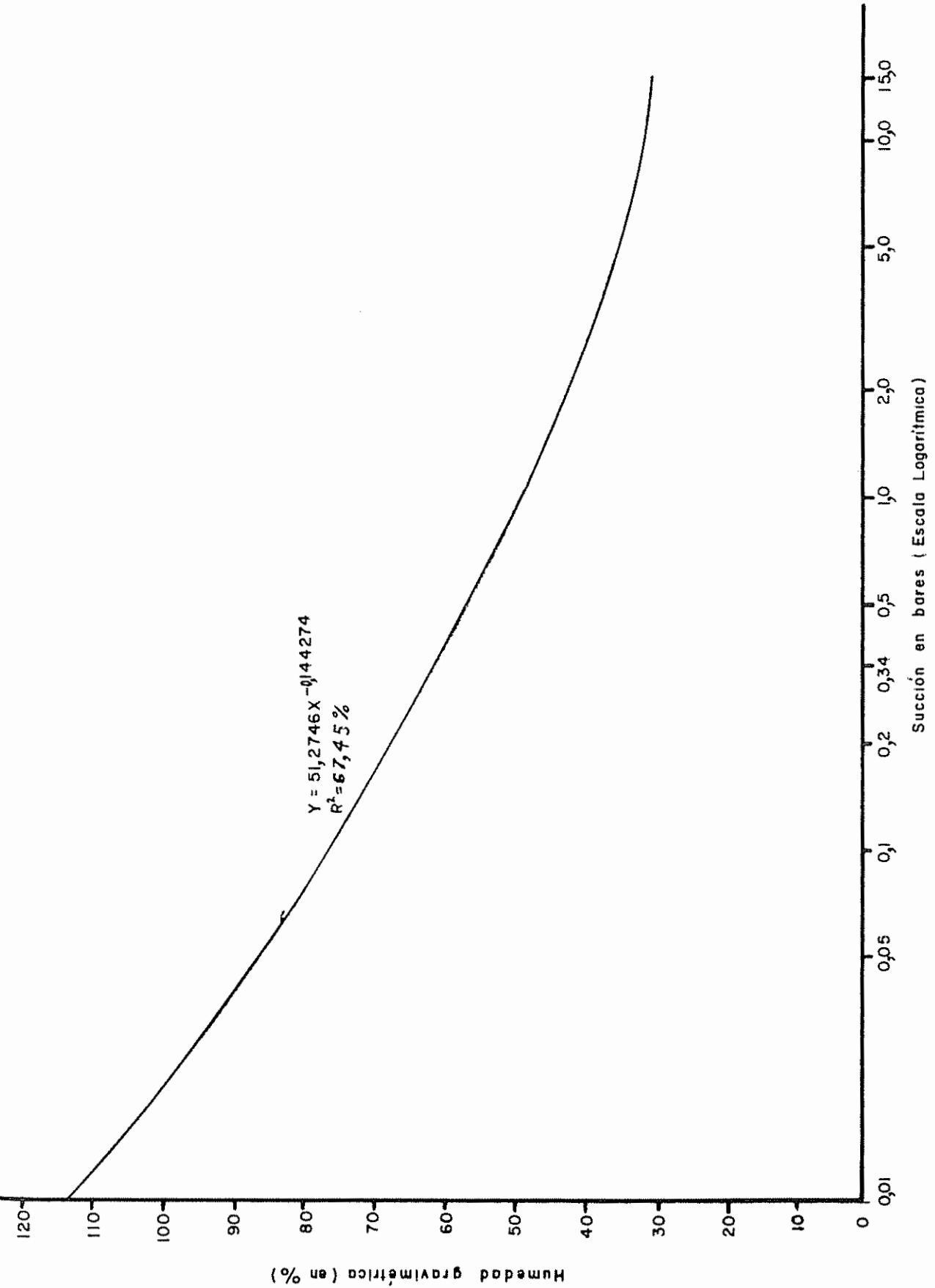


Fig. 5B Curva de la succión de la humedad para Birrisito A12, obtenida con muestras disturbadas y secadas al aire a/
a/Forsythe, W.M. and Vásquez, O.
Effect of air-drying on the water retention curves of the volcanic ash soil of Costa Rica

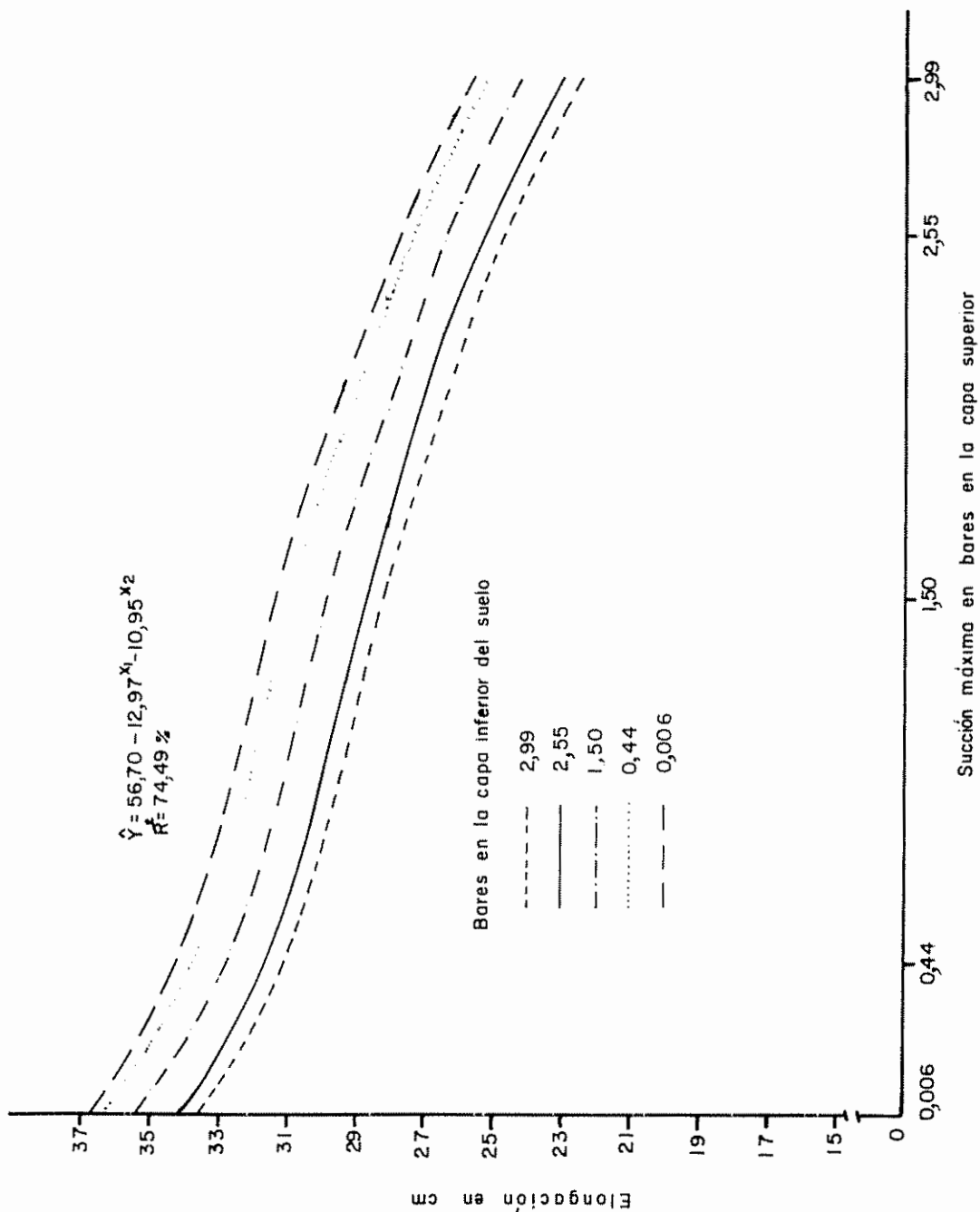


Fig. 6 Elongación de los tallos de tomate según succiones máximas en la capa superior e inferior del suelo

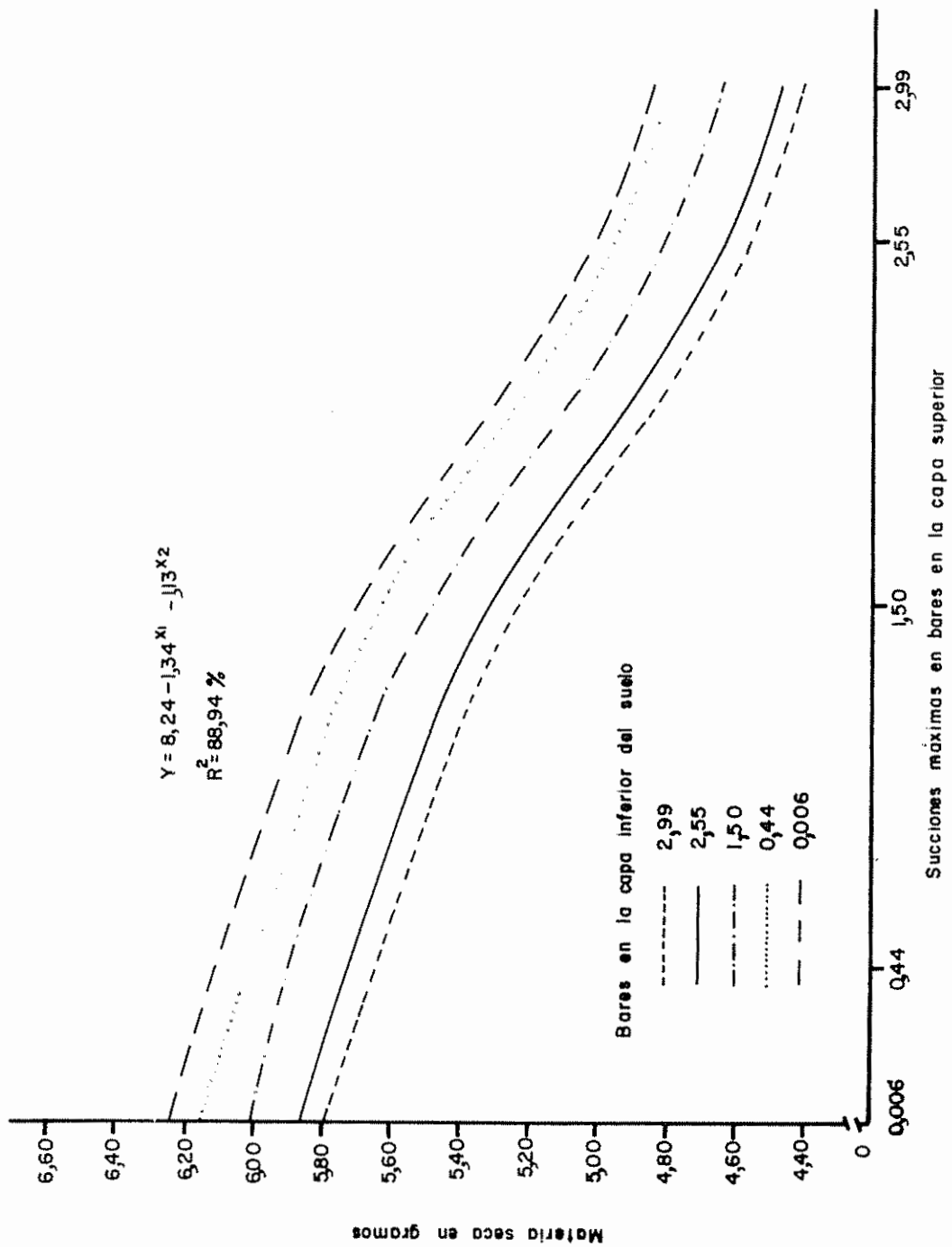


Fig. 7 Producción de materia seca por succiones máximas en las capas superior e inferior del suelo

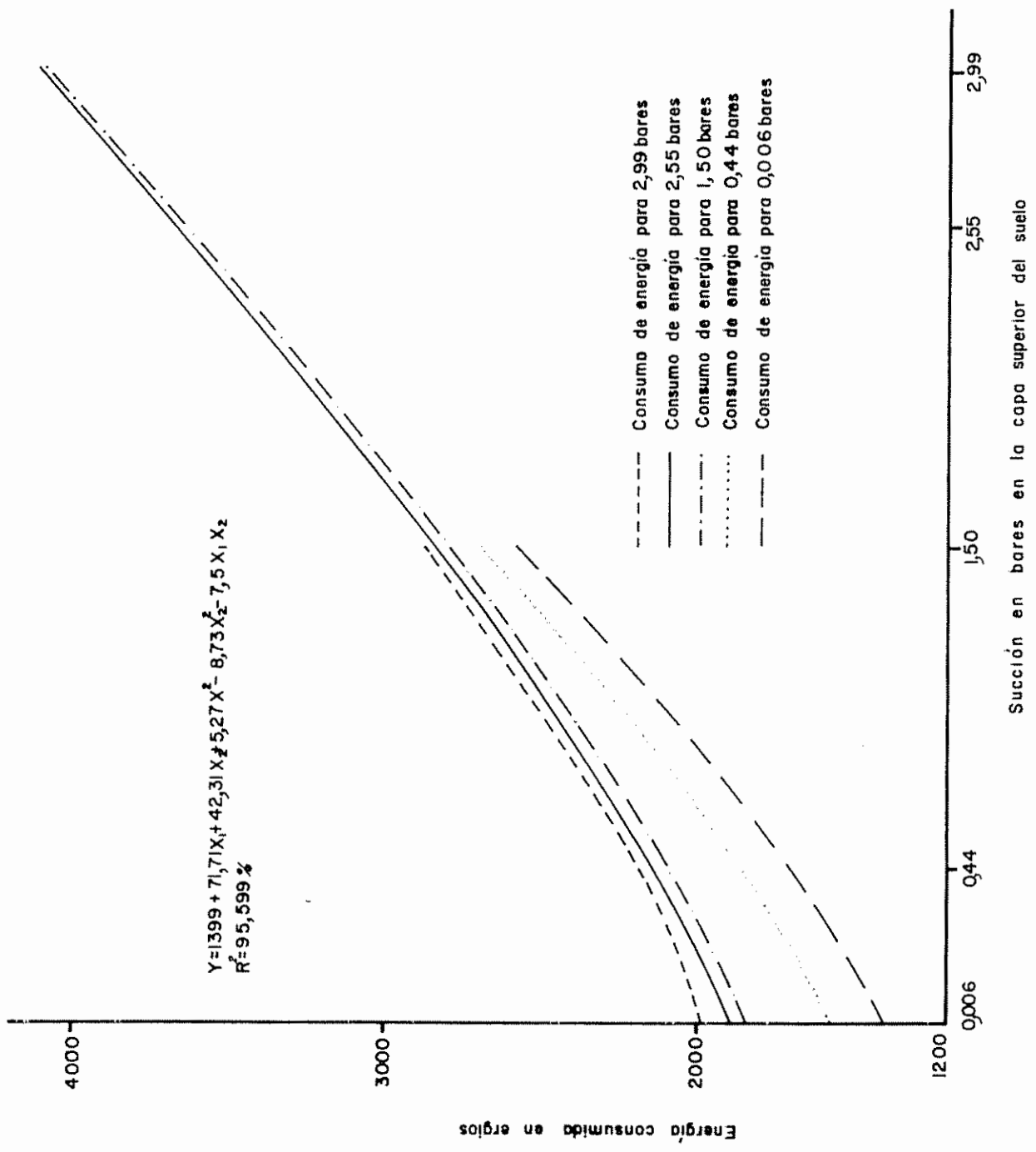


Fig. 8 Curva de consumo de energía total por maceta, en ergios según succiones

A P E N D I C E

Se ha elaborado un apéndice para dar mayor información sobre los resultados del experimento.

A. Evaporación en la superficie del suelo

Como se observó que el agua se consumía ~~mas~~ rápidamente en las capas superiores de las macetas, se llevó a cabo un ensayo con macetas sin plantas pero con las demás instalaciones para verificar si en realidad el consumo excesivo se debía en parte a la evaporación en la superficie del suelo. Se observó que en las macetas aun con el plástico había evaporación. Se encontró la ecuación para evaporación en las condiciones del experimento y así poder descontar esa agua evaporada a la consumida por las plantas.

La ecuación de evaporación con succión se representa en el gráfico No. 8. La relación evaporación tiempo se representa en el gráfico No. 9.

B. Se incluye la tabla de resultados sin procesar de algunas variables medidas.

C. Gráficos de evaporación según tiempo y succión en las macetas parcialmente tapadas con plástico transparente y delgado tipo polietileno (fig. 3 apéndice), además los datos de temperaturas máximas y mínimas del ambiente y del suelo en las dos capas, durante los tratamientos.

Cuadro 1. (Apéndice) Variables medidas y succiones máximas

Tratamiento de succiones máximas (bares)		Volúmenes netos de agua consumidos en cc.		Elongación de los tallos a partir del 12 riego (cm)		Peso seco en gramos de la parte aérea de las plantas		Valores de los promedios de succión ponderada con profund. absoluta y tiempo (bares)
capa sup.	capa inf.	capa sup.	capa inf.	capa sup.	capa inf.	capa sup.	capa inf.	
1,50	1,50	811 971 1211 1041	1460 1250 600 625	23,2 23,8 18,6 16,9	16,0 17,6 5,9 19,9	6,3 5,6 5,2 5,9	4,3 6,2 0,3 7,2	0,90
1,50	0,006	621 1101 756 371	2055 2545 1860 2045	24,9 25,6 32,4 32,9	23,5 19,4 9,1 23,1	6,7 5,7 5,8 6,1	6,6 6,1 6,6 4,1	0,04
0,44	0,44	1184 1516 1005 1856	1485 1410 2280 1460	52,2 12,3 29,9 36,7	44,5 23,6 39,7 41,3	0,3 10,0 7,6 6,3	9,5 5,3 7,6 7,3	0,26
0,006	1,50	2761 1636 1701 2001	510 1150 350 990	22,6 29,5 34,9 33,5	17,4 20,5 32,6 30,5	8,1 5,2 6,5 8,5	7,0 4,9 5,3	0,26
0,44	2,55	1715 2326 1124 1749	610 650 630 540	25,2 31,0 34,7 37,7	31,9 24,6 31,8 30,0	6,5 5,3 7,9 9,8	5,0 7,1 4,8 4,8	0,57
1,50	2,99	1366 891 587 711	860 1000 350 350	21,8 16,3 15,8 14,0	3,0 20,0 14,5 9,8	5,4 6,2 3,7 0,3	6,5 0,2 4,5 4,1	1,57
2,55	2,55	301 664 747 726	1070 350 810 570	34,4 1,9 10,1 24,2	31,5 4,3 21,7 10,4	0,4 7,4 0,2 0,3	6,6 2,5 4,8 0,3	1,40
2,99	1,50	1051 791 324 557	890 940 720 1455	4,4 28,4 19,4 22,4	16,0 15,5 6,5 25,3	0,6 7,7 5,8 6,0	0,3 0,3 0,3 7,2	1,46
2,55	0,44	637 827 621 791	1850 1040 2425 1710	5,2 28,8 30,7 4,2	19,9 15,7 5,6 7,9	0,2 8,9 8,1 0,2	5,5 5,7 0,4 0,8	0,42

Cuadro 2. (Apéndice) Temperaturas máximas y mínimas en maceta y ambiente durante la aplicación de tratamientos en el experimento.

Día	Ambiente -----				Capa superior de la maceta				Capa inferior de la maceta			
	Máximas		Mínimas		Máximas		Mínimas		Máximas		Mínimas	
	Hora	TCº	Hora	TCº	Hora	TCº	Hora	TCº	Hora	TCº	Hora	TCº
1	2 pm	26,7	7am	22,8	-	-	-	-	-	-	-	-
2	2 pm	35,6	7am	22,8	-	-	-	-	-	-	-	-
3	2 pm	29,4	7am	22,8	-	-	-	-	-	-	-	-
4	2 pm	30,3	7am	23,9	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2 pm	31,0	7am	22,8	-	-	-	-	-	-	-	-
6	2 pm	31,0	7am	20,6	-	-	-	-	-	-	-	-
7	2 pm	26,7	7am	21,6	-	-	-	-	-	-	-	-
8	2 pm	32,2	7am	21,1	-	-	-	-	-	-	-	-
9	2 pm	32,8	7am	20,6	4 pm	29,4	7am	21,1	4 pm	31,6	7am	22,2
10	2 pm	32,2	7am	20,6	2 pm	35,0	7am	20,0	2 pm	35,0	7am	20,0
11	2 pm	31,0	7am	21,1	1 pm	37,8	7am	17,8	1 pm	36,6	7am	29,9
12	2 pm	32,2	7am	21,6	1 pm	38,3	6½am	20,0	1 pm	38,3	6½am	22,2
13	2 pm	31,0	7am	20,6	12m	28,4	7am	21,1	12 m	28,4	5am	29,9
14	2 pm	34,4	7am	20,6	2 pm	38,9	6am	17,8	2 pm	38,9	6am	20,0
15	2 pm	33,3	7am	20,6	1 pm	37,8	5am	18,3	1 pm	37,8	5am	18,3
16	2 pm	37,2	7am	20,6	11am	33,3	5am	17,8	11am	33,3	5am	20,6
17	2 pm	37,8	7am	25,6	2 pm	38,9	6am	18,9	2 pm	38,9	6am	21,1
18	2 pm	37,8	7am	25,0	1 pm	39,4	6am	18,3	1 pm	38,9	6am	21,1
19	2 pm	37,8	7am	22,8	2 pm	37,8	6am	18,9	2 pm	37,8	6am	21,6
20	2 pm	29,4	7am	22,8	2 pm	36,6	6am	17,8	2 pm	36,6	6am	20,0
21	2 pm	32,2	7am	20,6	1 pm	33,3	7am	19,4	1 pm	32,2	7am	21,6
22	2 pm	36,6	7am	20,0	2 pm	37,8	6am	18,9	2 pm	37,8	6am	21,6

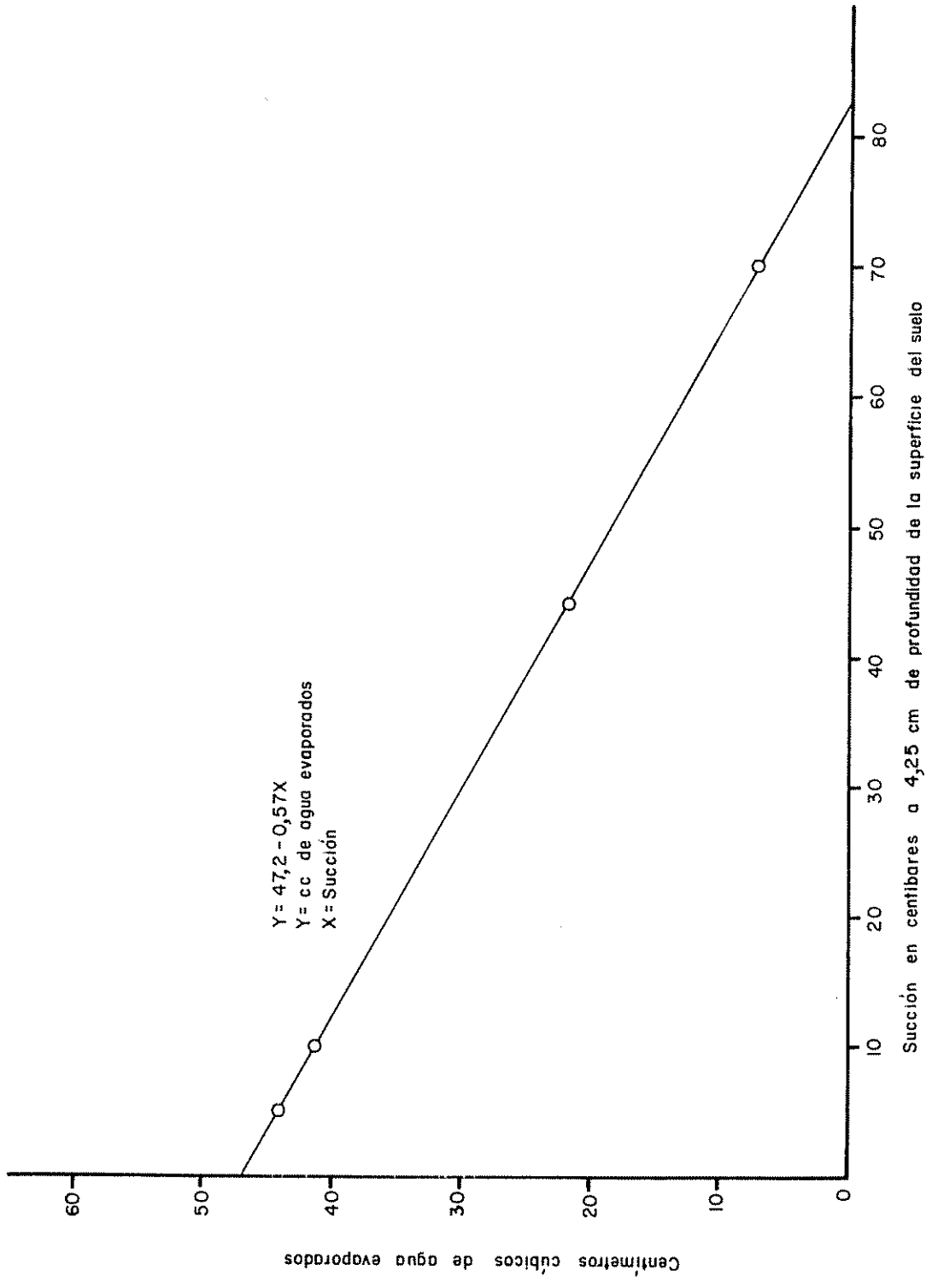


Fig 1 (apéndice) Evaporación según succión del suelo en macetas del experimento

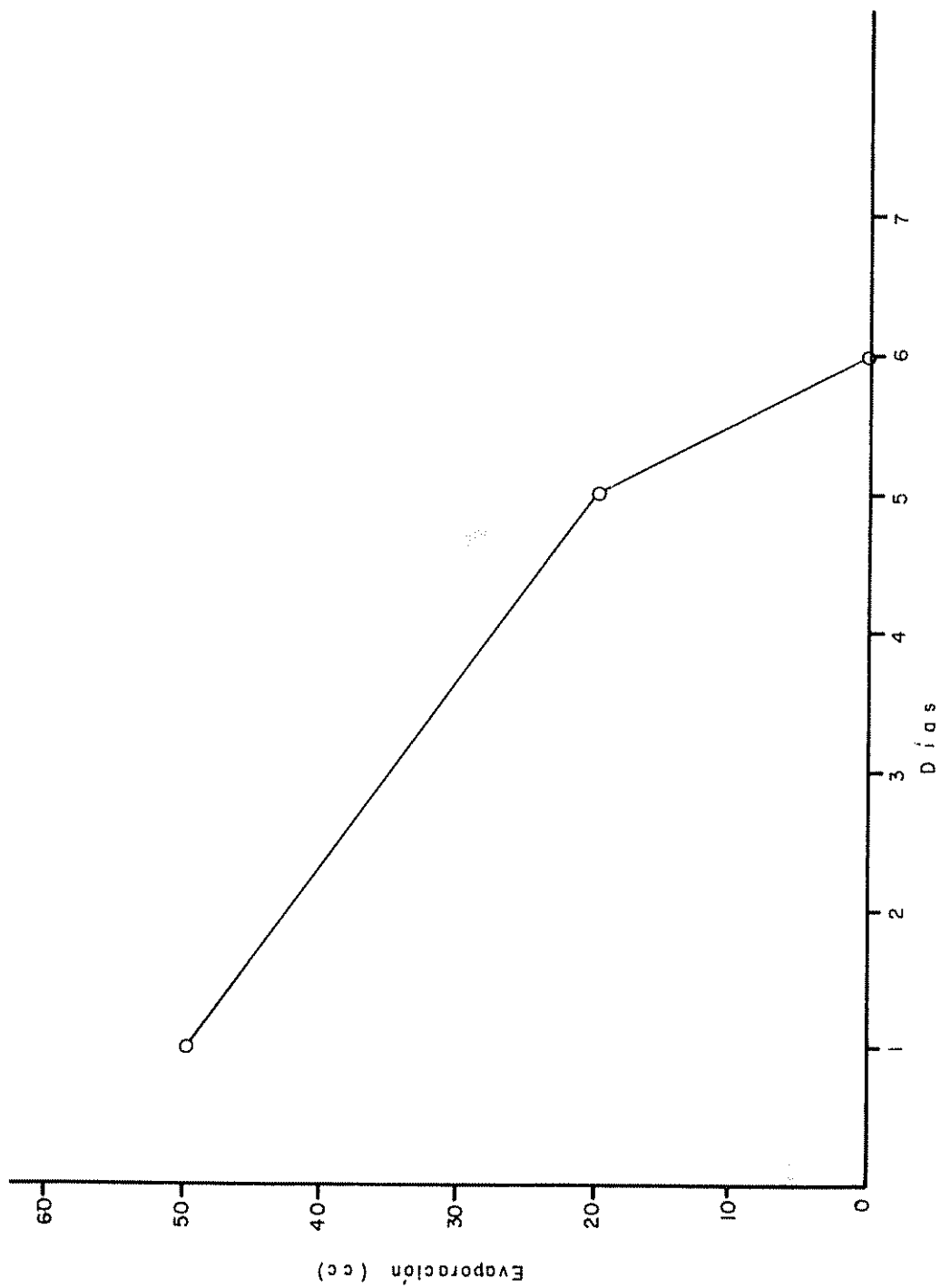


Fig. 2 (apéndice) Evaporación en centímetros cúbicos por día en suelo de macetas del experimento