



**UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMIA**

**CARACTERIZACION DE LOS BULBOS DE MOJADO EN RIEGO POR  
GOTEO PARA DIFERENTES CAUDALES Y TIEMPOS DE RIEGO EN  
SUELOS DE LA ZONA FRUTICOLA SUR.**

Por

FACULTAD DE AGRONOMIA

INSTITUTO URUGUAYO DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS, EDUCACION Y  
TECNOLOGIA

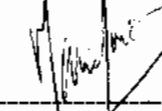
**María Helena GUERRA BERNADÁ  
Estela Miriam PERAZA CURBELO**

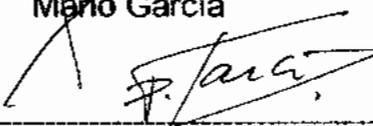
TESIS presentada como uno de los  
requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Agrónomo. (Orientación  
Ganadera - Agrícola y Producción  
Vegetal Intensiva)

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
1998**

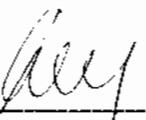
Tesis aprobada por:

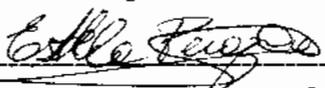
Director:   
Pablo Duran

  
Mario Garcia

  
Fernando Garcia

Fecha: \_\_\_\_\_

Autor:   
Maria Helena Guerra Bernada

  
Estela Miriam Peraza Curbelo

## AGRADECIMIENTOS

- A nuestros padres, hermanos y amigos
- Al director de la presente tesis Ing. Agr. Pablo Duran y a todos los integrantes de la Cátedra de Hidrología, por la orientación, apoyo y dedicación brindada.
- Al Ing. Agr. Alfredo Silva de la Cátedra de Edafología, por su colaboración en el trabajo de campo y laboratorio.
- Al Ing. Agr. Ibraim Ford por el envío de material bibliográfico desde México.
- Al personal de la biblioteca de la Facultad de Agronomía y de INIA Las Brujas.
- A todo el personal del Centro Regional Sur (C.R.S).

Al Ing. Agr. Juan C. Guerra, (M.Sc.)  
por haberme enseñado esta hermosa  
profesión.

Gracias Papá

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES .....	VII
1. <u>INTRODUCCION</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1 <u>CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL RIEGO POR GOTEO</u> .....	2
2.2 <u>MOVIMIENTO DEL AGUA A PARTIR DE UN PUNTO</u> .....	3
2.2.1 <u>Tipo de movimiento</u> .....	3
2.2.2 <u>Factores que afectan el patrón de mojado</u> .....	7
2.2.2.1 <u>Características del suelo</u> .....	7
2.2.2.2 <u>Variables de riego</u> .....	12
2.3 <u>GEOMETRÍA DEL BULBO DE MOJADO</u> .....	14
2.3.1 <u>Área de Mojado</u> .....	14
2.3.1.1 <u>Ecuaciones matemáticas que la describen</u> ...	14
2.3.1.2 <u>Efecto de la tasa de descarga</u> .....	18
2.3.1.3 <u>Efecto de la frecuencia de riego</u> .....	19
2.3.2 <u>Volumen de Mojado</u> .....	21
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	30
3.1 <u>CARACTERIZACION DE LA PARCELA</u> .....	30
3.2 <u>DISEÑO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO A CAMPO</u> .....	32
3.3 <u>DISPOSITIVO DE GOTEO</u> .....	32
3.3.1 <u>Descripción del dispositivo de goteo</u> .....	32
3.3.2 <u>Calibración del dispositivo de goteo</u> .....	35
3.4 <u>DETERMINACIONES</u> .....	36
3.4.1 <u>Agua en el suelo previo al riego</u> .....	36
3.4.2 <u>Dimensiones del bulbo de mojado</u> .....	36
3.4.2.1 <u>Diámetro húmedo en superficie</u> .....	36
3.4.2.2 <u>Forma del bulbo</u> .....	37

4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	40
4.1 RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS.....	40
4.1.1 <u>Regulación del caudal por pérdida de carga</u> .....	40
4.1.2 <u>Regulación del caudal por el método Access Frames. LTD</u> <u>(F.A.O, Riego por goteo)</u> .....	42
4.1.3 <u>Regulación del caudal por "válvula"</u> .....	42
4.2 FORMA DEL BULBO.....	43
4.2.1 <u>Diámetro de mojado superficial</u> .....	43
4.2.2 <u>Profundidad de mojado</u> .....	47
4.2.3 <u>Ajuste de metodologías teóricas</u> .....	54
4.2.3.1 Ajuste de metodología propuesta por Goldberg,(1976).....	54
4.2.3.2 Ajuste de metodología propuesta por Schuarztman y Zur,(1986).....	55
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	68
6. <u>RESUMEN</u> .....	70
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	72
9. <u>ANEXO</u> .....	76

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro N°	Página
2.1. (a,b,c) Datos de la prueba de campo: profundidad (P) y diámetro (D) e infiltración básica (I <sub>b</sub> ) del bulbo húmedo .....	28
3.1. Descripción del perfil.....	31
4.1. (a,b) Cálculo de longitud del microtubo usando la fórmula de Darcy.....	41
4.2. (a,b,c) Diámetros promedios .....	43
4.3. Diámetros obtenidos por ecuación de regresión .....	46
4.4. Comparación de diámetros (cm) en el día del riego y a las 24 horas) .....	47
4.5. Diámetros obtenidos por la fórmula de Goldberg ...	54
4.6. Agua a agregar para llegar a CC (capacidad de campo) (11-03-97) .....	59
4.7. Volumen de suelo mojado en m <sup>3</sup> (11-03-97).....	59
4.8. Agua a agregar para llegar a CC (capacidad de campo) (19-03-97) .....	62
4.9. Volumen de suelo mojado en m <sup>3</sup> (19-03-97).....	62
4.10. Agua a agregar para llegar a CC (capacidad de campo) (16-03-97) .....	65
4.11. Volumen de suelo mojado en m <sup>3</sup> (16-03-97).....	65

Figura N°		Página
2.1.	Movimiento del flujo del agua debajo un gotero.....	4
2.2.	Geometría de flujo: (a) punto o línea de goteo; (b) disco o área de goteo; (c) formación en dos dimensiones de la línea de goteo con delimitación de la zona radicular; (d) punto de goteo en tres dimensiones con delimitación de la zona radicular	6
2.3.	Esquema del perímetro superficial de mojado obtenido por fotografías tomadas luego de aplicación de 4 L en el tratamiento diario; 9 horas después de comenzado el tratamiento semanal de 84 L y 24 horas después de comenzado el tratamiento semanal de 84 L.....	20
2.4.	Modelo de una elipse truncada.....	22
2.5.	Evolución del frente de mojado bajo un gotero; (a) para un caudal de 0.61 l/hs y (b) para un caudal de 0.28 l/hs .....	24
2.6. (a)	Distribución del agua en el perfil del suelo; suelos pesados y medios .....	25
2.6. (b)	Distribución del agua en el perfil del suelo; suelos arenosos .....	25
2.7.	Patrón de mojado para igual volumen de aplicación de agua, para tres tasas .....	27
3.1.	Válvula para regular el caudal en los microtubos ...	34
3.2.	Determinación de la resistencia a la penetración con agujas.....	37
3.3.	Determinación del límite entre húmedo y seco al tacto .....	38

3.4.	Determinación de la profundidad máxima del bulbo .....	39
4.1.	Esquema de una elipse truncada.....	55

Gráficos N°		Página
2.1.	Humedad en el suelo: A= sistema tradicional; B= Sistema por goteo .....	2
2.2 .	Movimiento del agua en tres niveles de humedad (22, 25, 30 H%V) en un suelo de textura fina (35% Ac, 52% L) y con un caudal de 2 l/hs .....	8
2.3.	Frente de mojado a partir de un contenido de agua inicial uniforme .....	9
2.4.	Frente de mojado en función del tiempo de infiltración y cantidad de agua aplicada para dos suelos: (a) Gilat Loam, q=4 L/hs; (b) Gilat Loam, q=20 L/hs; (c) Nahal Sinai, q=4 L/hs; (d) Nahal Sinai, q=20 L/hs; (•) punto de goteo .....	13
2.5.	Valores de la superficie del suelo de Sc/Ss, como una función del ratio ( $\delta$ ) dimensional y "a" de Bresler.....	17
3.1.	Comportamiento hidráulico del suelo.....	31
4.1.(a, b)	Variación del diámetro en función del caudal (L/hs) y tiempo de riego (hs) .....	44
4.1.(c)	Variación del diámetro en función del caudal (L/hs) y tiempo de riego (hs) .....	45
4.2. (a)	Humedad del suelo a CC, antes y después del goteo: 2 horas (20-03-97) .....	49

4.2. (b)	Humedad del suelo a CC, antes y después del goteo: 4 horas (20-03-97) .....	49
4.2. (c)	Humedad del suelo a CC, antes y después del goteo: 6 horas (20-03-97) .....	50
4.3. (a)	Humedad del suelo a CC, antes y después del goteo: 2 horas (17-04-97) .....	51
4.3. (b)	Humedad del suelo a CC, antes y después del goteo: 4 horas (17-04-97) .....	52
4.3. (c)	Humedad del suelo a CC, antes y después del goteo: 6 horas (17-04-97) .....	53
4.4 (a, b).	Forma del bulbo de mojado (11-03-97) .....	59
4.4 (c,d,e,f).	Forma del bulbo de mojado (11-03-97) .....	60
4.4 (g,h,i).	Forma del bulbo de mojado (11-03-97) .....	61
4.5 (a, b).	Forma del bulbo de mojado (19-03-97) .....	62
4.5 (c,d,e,f).	Forma del bulbo de mojado (19-03-97) .....	63
4.5 (g,h,i).	Forma del bulbo de mojado (19-03-97) .....	64
4.6 (a, b).	Forma del bulbo de mojado (16-04-97) .....	65
4.6 (c,d,e,f).	Forma del bulbo de mojado (16-04-97) .....	66
4.6 (g,h,i).	Forma del bulbo de mojado (16-04-97) .....	67

## ANEXO

Cuadro N°		Página
1.	Promedio de dos diámetros perpendiculares para cada gotero .....	79
2.	Humedad (H%V) del suelo previo al riego.....	81
3.	Humedad del suelo (H%V) a CC, antes y después del riego para las diferentes profundidades (20-03-97) .....	82
4.	Humedad del suelo (H%V) a CC, antes y después del riego para las diferentes profundidades (17-04-97)).....	83
5.	Dimensiones de las elipses (11-03-97).....	85
6.	Dimensiones de las elipses (19-03-97).....	86
7.	Dimensiones de las elipses (16-04-97).....	87

Figura N°		Página
1.	Ubicación del dispositivo de goteo en la parcela.....	77
2.	Sistema de goteo Access Frames LTD (citado por F.A.O) .....	78

Gráfico N°		Página
1.	Coeficiente de determinación entre diámetros medidos a campo y estimados por la ecuación de regresión .....	80
2.	Coeficiente de determinación entre diámetros medidos a campo y estimados por la ecuación de Goldberg, 1976 .....	80
Fotos N°		Página
1.	Dispositivo de goteo.....	93
2.	Cabezal del dispositivo de goteo .....	93
3.	Ejemplo del área de mojado para 2 horas de riego y un caudal de 2 litros/hora.....	94

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la eficiencia de riego y reducción del stress hídrico son algunos de los factores que han contribuido al incremento de la utilización del riego por goteo durante los últimos años.

El riego por goteo mantiene altos potenciales de agua en el suelo en la zona radicular los cuales incrementan la disponibilidad de agua a la planta, su germinación, crecimiento y rendimiento.

El volumen de suelo mojado bajo un gotero contiene la cantidad de agua mínima requerida por una planta para su óptimo desarrollo bajo determinadas condiciones ambientales. Dicho volumen de mojado es primariamente una función de la textura del suelo, tasa de aplicación y total de volumen de agua aplicada. Este debe ser el primer conocimiento para determinar el número total de emisores necesarios en un cultivo y lograr de esta forma un uso eficiente del agua disponible para el riego.

Este sistema de riego fue desarrollado principalmente para tipos de suelos livianos en zonas áridas y semiáridas. Contrariamente los datos experimentales para texturas finas son casi nulos.

El objetivo de éste trabajo es describir un experimento a campo de riego por goteo sobre un suelo característico de la zona frutícola sur del Uruguay, que intente describir el volumen y forma del bulbo de mojado bajo un gotero, para diferentes caudales y tiempos de riego.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL RIEGO POR GOTEO

El riego por goteo es una técnica mediante la cual el agua se pone a disposición directa en la zona radicular, gracias a un emisor especialmente diseñado para erogar caudales reducidos. Este emisor permite una difusión diferencial tridimensional del agua, manteniendo bajos niveles de tensión suelo-agua.

Por lo tanto este sistema permite mantener un nivel adecuado de humedad que determina el rápido desarrollo de raíces dentro de dicha zona. Este nivel varía entre capacidad de campo y el nivel de saturación como lo muestra el gráfico 2.1.

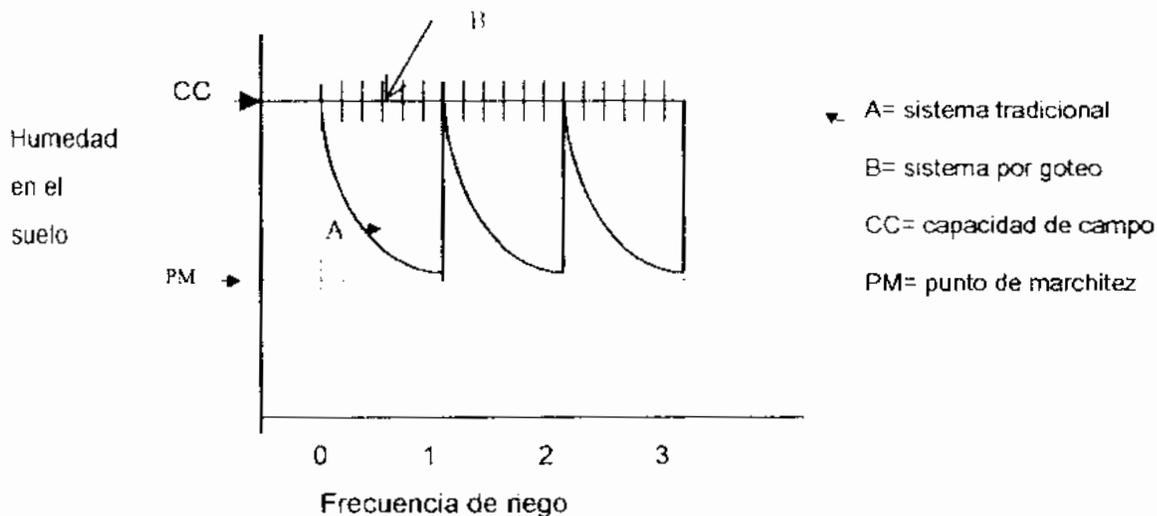


Gráfico 2.1 Humedad en el suelo: A= sistema tradicional; B= sistema por goteo  
(Adaptado de Negueroles, Uriu, 1974)

Los riegos son lo suficientemente frecuentes para renovar inmediatamente la humedad de la zona del suelo agotada, o al menos satisfacer en lo inmediato las necesidades del consumo periódico, alcanzándose un alto nivel de agua disponible y de elementos nutritivos requeridos por la planta.

El riego por goteo tiene importancia especial por cuanto permite la infiltración directa del agua en el suelo combinada con una expansión lateral superficial sumamente limitada de forma que se evitan las pérdidas por evaporación, percolación, y/o escurrimiento, o en todo caso resultan insignificantes.

Este sistema de riego presenta una elevada eficiencia potencial en la utilización del agua. Según Nakayama et al. (1986), eficiencia de aplicación entre un 90 y 100 % son alcanzadas en estos sistemas. Lo que si es seguro que dicha eficiencia supera el rango de 50%-70% que es lo que presentan los sistemas de riego convencionales, como ser riego por surco o aspersión.

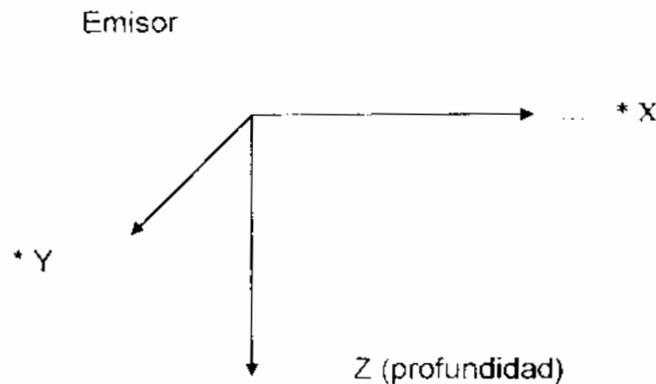
## 2.2 MOVIMIENTO DEL AGUA A PARTIR DE UN PUNTO

### 2.2.1 Tipo de movimiento

En suelos insaturado, el movimiento del agua es variable durante el riego. Por décadas numerosos autores han estudiado este movimiento y han tratado de explicarlo mediante modelos matemáticos (Omary 1992).

Brandt et al. (1971), considera que el agua que eroga un gotero se mueve en forma tridimensional en suelos estratificados, proponiendo modelos matemáticos que lo explican. Bresler (1971) comparando los patrones de mojado delineado por los modelos matemáticos de Brandt (1971), con sus resultados de campo concluye que a pesar de las diferencias dichos modelos matemáticos serian adecuados para una aplicación práctica.

Lafolie I (1989), define que matemáticamente, el movimiento del agua en riego por goteo es un flujo tridimensional tanto en condiciones saturadas como insaturadas. Agregando que existe una línea o banda de separación entre la zona saturada e insaturada. La figura 2.1 muestra las coordenadas del movimiento.



\* X e Y describen el movimiento en superficie

Figura 2.1: Movimiento del flujo de agua bajo un gotero.

(citado por Di Lorenzi, Llanes, 1995)

Muchos investigadores (Wooding, 1968; Philip, 1971; Root, 1971; Brandt et al, 1971; Bresler et al, 1971; Worrick, 1974; Toghavi et al, 1984; Zazueta, 1985) han presentado modelos para determinar el flujo desde un punto de goteo. Estos modelos son bastante complicados y requieren gran cantidad de datos de suelo, los cuales limitarían su utilidad en el proceso de diseño. Además la habilidad de un modelo matemático para simular un proceso físico depende no solo de cuan bien las ecuaciones describan estos procesos, sino también cuan exactos son determinados los parámetros.

Para Bucks et al (1982), el movimiento del agua vertical y horizontal desde un gotero para suelos desnudos es como la figura 2.2a en donde el patrón de flujo es de simetría axial. En una línea de porta goteros el movimiento del agua es en dos dimensiones, donde la línea de superposición es perpendicular al plano x-z (siendo x la línea porta goteros y z la profundidad de mojado). Cuando el agua es adicionada en la superficie del suelo un área finita se vuelve mojada como en la figura 2.2b. El tamaño del área sería grande para suelos de baja infiltración y altas tasa de aplicación, y sería muy chicas para altas tasa de infiltración y lentas tasa de aplicación. La zona de crecimiento radicular se describe en la figura 2.2c y 2.2d para una línea de goteo y un punto de goteo respectivamente. El agua en la capa subsuperficial sería limitada por una zona radicular con pequeñas actividades a profundidad.

Entonces el movimiento del agua bajo un emisor tiene un movimiento tridimensional. En una línea de goteo la superposición de áreas de mojado determina que el movimiento sea en dos dimensiones. El crecimiento radicular seguiría dicho patrones de movimiento.

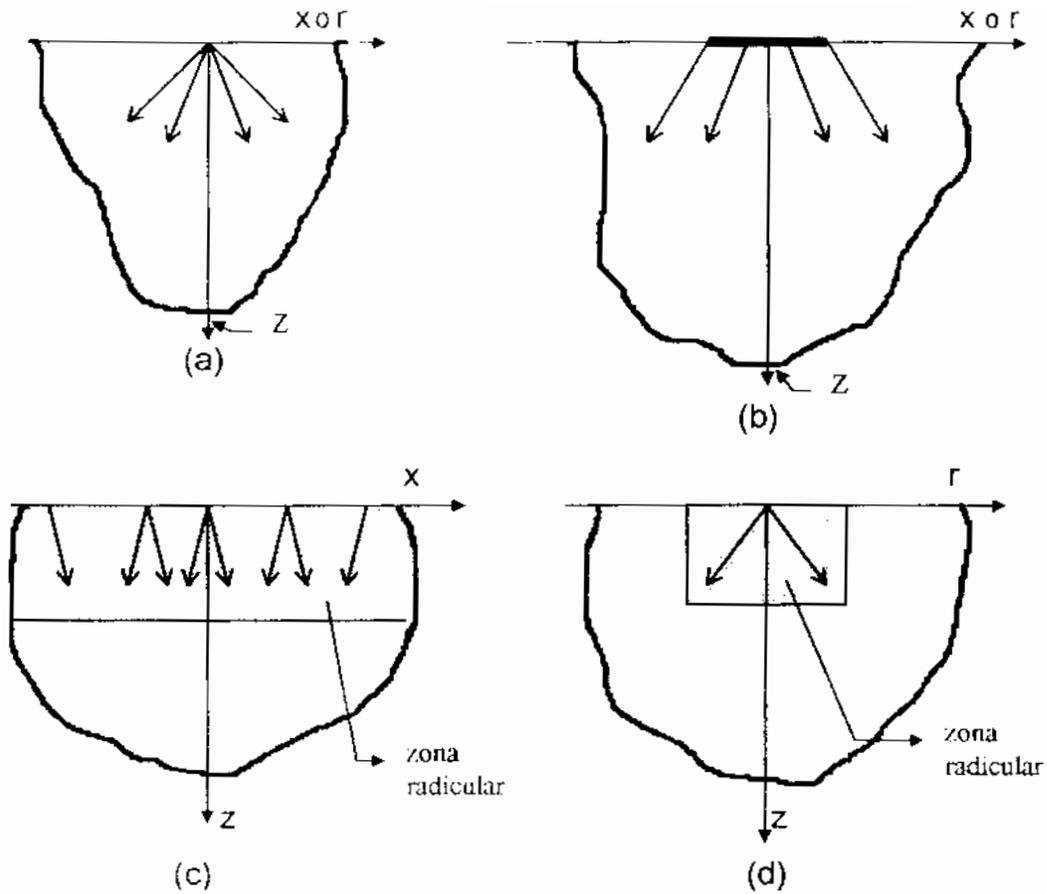


FIGURA 2.2: Geometría de flujo: (a) punto o línea de goteo; (b) disco o área de goteo; (c) formación en dos dimensiones de la línea de goteo con delimitación de la zona radicular; (d) punto de goteo en tres dimensiones con delimitación de la zona radicular. (Bucks, Nakayama, Warrick, 1982).

## 2.2.2 Factores que afectan el patrón de mojado

### 2.2.2.1 Características del suelo

La humedad inicial del suelo incide sobre los componentes horizontal y vertical del movimiento del agua en el mismo.

Cabibel (1991) trabajando en un suelo de textura fina (35% arcilla y 52% de limo) y con un caudal de 2 l/h, presenta resultados a tres niveles de humedad inicial de suelo, 22%, 25% y 30% de agua en volumen (gráfico 2.2). Estos muestran que a mayor contenido inicial de agua en el suelo, el movimiento horizontal de la misma es proporcionalmente mayor que el vertical, además de mojar un mayor volumen ( $m^3$ ) de suelo.

Dos fuerzas son responsables de la penetración del agua en el suelo: gradiente de potencial del agua en el suelo y la fuerza gravitatoria. Cuando el frente de mojado se aleja desde el charco superficial la fuerza conductora de gradiente de potencial se reduce. Como resultado la tasa de infiltración decrece y se acerca al valor  $K_s$  (conductividad hidráulica de saturación) (Goldberg, D. et al, 1976).

El mismo autor señala que las medidas de agua del suelo previo al riego muestra que el contenido de agua se incrementa con la profundidad. Para una profundidad de 40 a 45 cm, el contenido de agua residual se parece al del suelo regado. Como consecuencia, a profundidad no hay un gradiente de tensión de agua hacia abajo y por lo tanto hay una distribución lateral del agua.

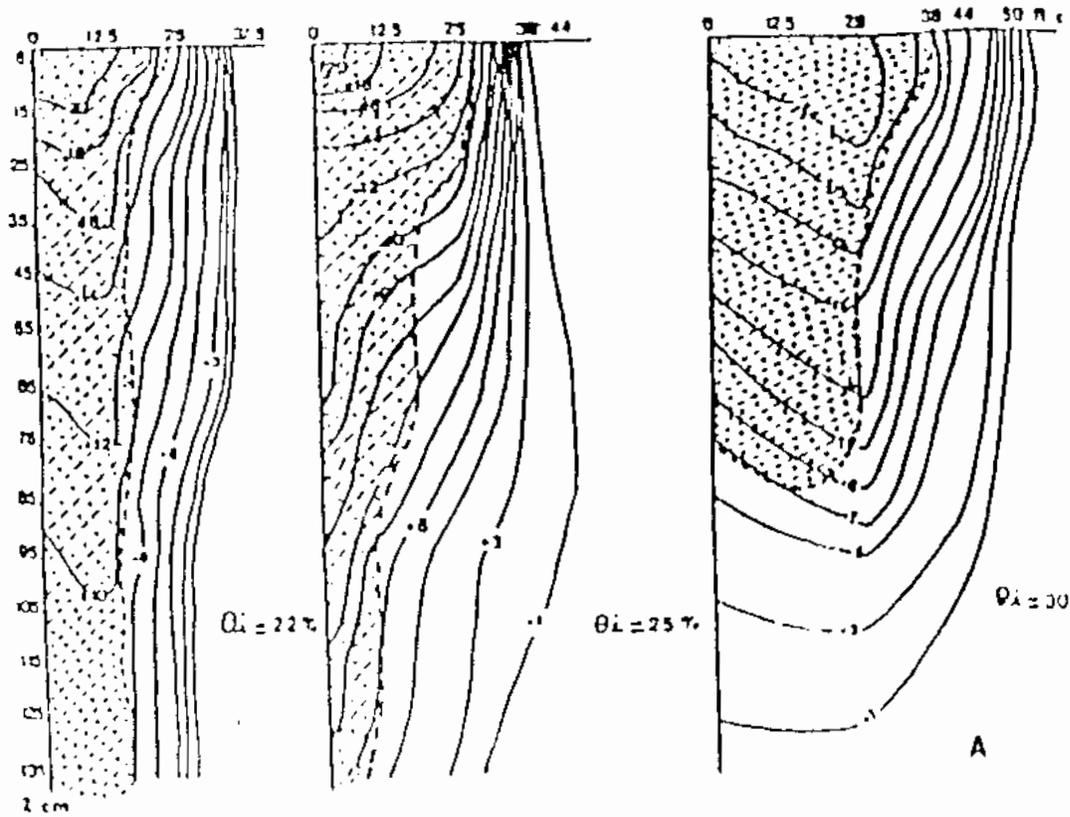


GRÁFICO 2.2: Movimiento del agua a tres niveles iniciales de humedad (22, 25, 30% de agua en volumen) en un suelo de textura fina (35% arcilla, 52% de limo) y con un caudal de 2l/hs. (Cabibel 1991, citado por Di Lorenzi, Llanes, 1995).

Según Omary (1992), el movimiento del agua de riego para un contenido de agua inicial uniforme tiene aproximadamente la misma tasa horizontal y vertical antes que se encuentre con un horizonte subsuperficial arcilloso, la cual tiene una muy baja conductividad hidráulica comparada con la capa superior. Luego de esto, el movimiento es en su mayoría horizontal, (ver gráfico 2.3).

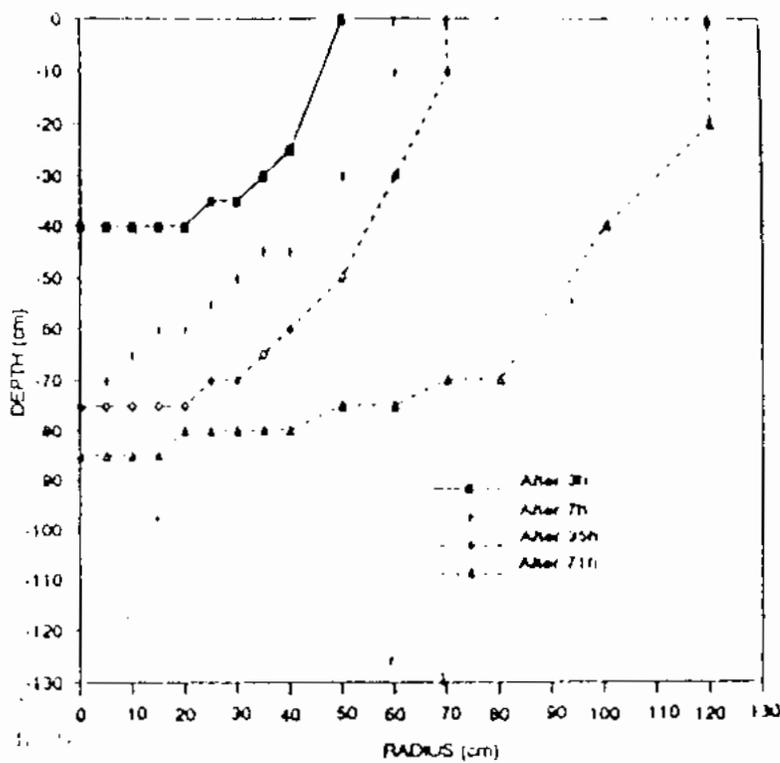


Gráfico 2.3: Frente de mojado a partir de un contenido de agua inicial uniforme.  
(Omary, 1992)

El Uruguay, posee suelos altamente diferenciado (Duran, A. 1991), con horizontes argilúvicos enriquecidos en arcillas de origen iluvial (horizonte B1) subsuperficiales de baja conductividad hidráulica respecto a los horizontes superficiales.

El agua se mueve a través del perfil del suelo desde el emisor de goteo hasta que la tasa de infiltración del área mojada coincide con la tasa de descarga del emisor. Mas allá del charco de agua libre el movimiento del agua es por flujo insaturado (Clothier, B. et al, 1985).

El movimiento del agua en el suelo bajo el gotero ocurre en respuesta a una atracción capilar, "x" dimensional y un movimiento hacia abajo como resultado de la gravedad. La textura del suelo o más específicamente la geometría de los poros del suelo determina la relativa importancia de las fuerzas de gravedad y capilaridad. De este modo la distribución del agua de riego desde el gotero es determinada por las propiedades física del suelo (Clothier, B. et al.1985).

D. Goldberg, et al (1976), marcan la importancia que tiene el cambio de la estructura del suelo bajo el emisor. Según estos autores el área que rodea el gotero es saturada durante el período de riego, la penetración del agua dentro de la capa superior del suelo ocurre inicialmente entre los agregados, con el curso del tiempo tiene lugar una atenuación del movimiento del agua, los agregados son parcialmente destruidos y el flujo de agua ahora ocurre a través de los capilares. Este fenómeno se dará antes o después en el tiempo variando con la estabilidad de los agregados en la capa superficial y/o el contenido de arcilla en la misma.

Autores como Howell, et al (1980) marcan la importancia de la heterogeneidad del suelo en el movimiento de agua. El estratificado del suelo retarda el movimiento del agua. Cuando el agua se encuentra con la zona de transición entre horizontes tiende a ocurrir un movimiento lateral sobre dicha zona hasta que la presión disminuye suficientemente para permitir una importante penetración dentro del siguiente horizonte.

Cuando la capa superior es "gruesa" y le sigue una capa de textura "fina" el desplazamiento ocurre primariamente debido a la baja conductividad hidráulica de la capa fina, siendo el resultado del desplazamiento mas horizontal y menos vertical.

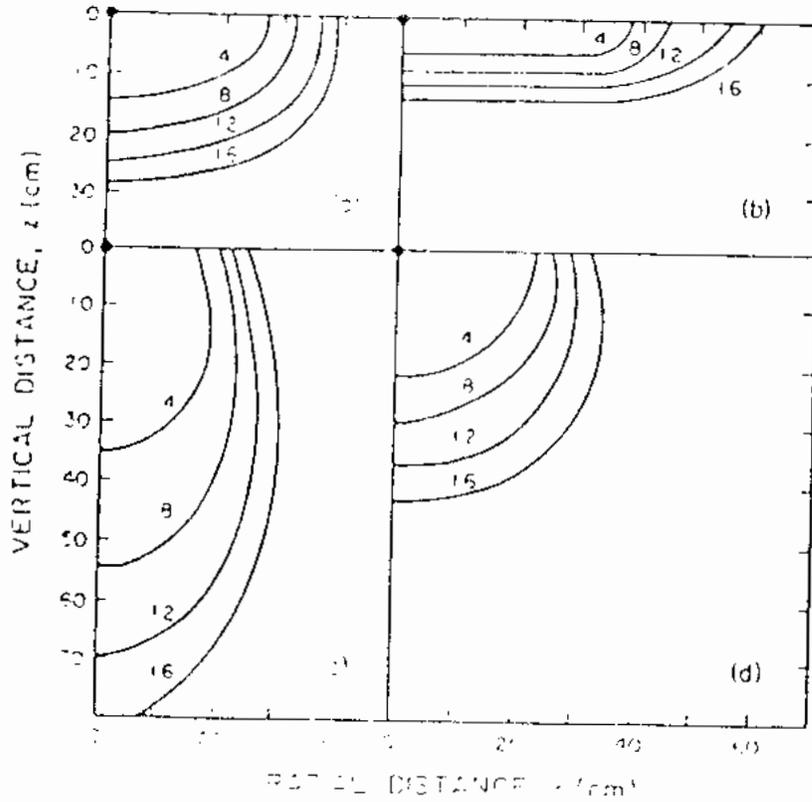
El agua almacenada en el suelo desde el lugar de goteo dependerá de la tasa de riego, distancia de los goteros, evaporación del agua del suelo, características de infiltración del suelo, microtopografía del lugar de riego, de las características hídricas del suelo, del patrón de conducción de agua por las raíces y la textura. Siendo los parámetros mas importantes, el contenido de agua inicial y la textura, (Rolston, D.E. et al, 1991).

D. Goldberg et al, (1976), coincide en la influencia de dichos factores, agregando la frecuencia de riego y marcando como más importante la estructura y la textura.

#### 2.2.2.2 Variables de riego

Bresler (1978), trabajando en un suelo liviano (Nahal Sinai Sand) y otro de textura media (Gilat Loam), para dos tasa de descarga, 4 l/h y 20 l/h , encontró que aumentando el caudal (l/h) y disminuyendo la conductividad hidráulica, el componente horizontal del movimiento del agua era más importante, disminuyendo el vertical. Obviamente la profundidad de mojado es mayor en la arena debido a la habilidad de esta para transmitir fácilmente el agua en flujo saturado y a su baja capacidad de retención de agua, lo contrario ocurre en el suelo medio que muestra un movimiento mas extendido sobre la superficie. También el patrón de mojado más ancho fue observado con la mayor tasa de aplicación para ambos suelos, (gráfico 2.4).

El efecto del caudal estudiado por Brandt et al (1971), utilizando modelos matemáticos ha sido confirmado en varias experiencias de campo como las de Bresler (1977) y Cabibel (1991). Estos modelos señalan la mayor profundidad del componente vertical del movimiento del agua y una menor del movimiento horizontal, frente a la disminución del caudal para un mismo suelo.



FACULTAD DE AGRICULTURA  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGRICULTURA Y PESQUERA  
 UNAM

Gráfico 2.4: Frente de mojado en función del tiempo de infiltración y cantidad de agua aplicada (esto último indicado con números sobre cada curva, en litros) para dos suelos: (a) Gilat Loam,  $q=4$  l/hs; (b) Gilat Loam,  $q=20$  l/hs; (c) Nahal Sinai sand,  $q=4$  l/hs; (d) Nahal Sinai sand,  $q=20$  l/hs; (•) punto de goteo. (Bresler, 1978; citado por Bucks, Nakayama, Warrick, 1982).

Raats (1974), citado por Black (1976) encontró que esto solo es cierto bajo condiciones de conductividad hidráulica saturada. En casos contrarios donde las fuerzas gravitatorias son mínimas, la forma del patrón de mojado reflejará gradiente de potenciales de succión de matriz.

Cuando existe una capa subsuperficial media arcillosa (horizonte Bt) impermeable el frente de mojado se desplaza más en dirección horizontal que vertical, y ésta es más marcada y más probable cuanto mayor es la tasa de aplicación.

La frecuencia y el tiempo de riego también afectan el patrón de movimiento del agua. La influencia de estas variables en el movimiento del agua se describen relacionadas al área y volumen de mojado en el siguiente punto.

## 2.3 GEOMETRÍA DEL BULBO DE MOJADO

### 2.3.1 Área de mojado

#### 2.3.1.1 Ecuaciones matemáticas que la describen

Dasberg y Bresler (1985), propusieron un procedimiento de diseño para determinar el espaciamiento entre emisores basados en soluciones asimétricas de dos dimensiones de ecuaciones de flujo de agua con simetría radial.

La ecuación de flujo de agua en dos dimensiones es igual a:

$$Pu = \frac{-2I(\alpha \pi) + \left[ \left( 4I(\alpha^2 \pi^2) + (1000 \cdot Q / (\pi \cdot K_s)) \right)^{0.5} \right]}{2}$$

Pu: Radio de la zona saturada del punto de goteo (cm)

Q: Tasa de descarga del emisor (l/h)

$\alpha$ : una constante que expresa la importancia relativa de la gravedad y capilaridad para el movimiento de agua en el suelo en estudio (l/cm)

$K_s$ : Conductividad hidráulica de saturación

Para obtener radio de zona de mojado se multiplica  $Pu \cdot \delta$  donde  $\delta$  se obtiene del gráfico 2.5. Para entrar al gráfico se debe hallar  $Sc/Ss = \exp^{\alpha \cdot hc}$  y  $a = \alpha \cdot Pu / 2$  donde: Sc es potencial de flujo mátrico con un contenido de agua crítico (cm), Ss es potencial de flujo mátrico de saturación (cm); hc es potencial de agua en el suelo a un contenido crítico de agua (cm).

Los valores de  $K_s$  y  $\alpha$  presentan aproximadamente cuarenta valores distintos para Israel, suelos arenosos (sandy loam soil) y muy pocos de esos valores representan suelo más pesados o estratificados.

Goldberg, et al (1976) describe el desplazamiento del agua mediante una ecuación empírica. Basados en datos experimentales el área de mojado del suelo es una función de la descarga del gotero y el total del agua aplicada. Donde la ecuación es la siguiente:

$$D = a \cdot Q^{1/2} + b \cdot q \cdot Q^{1/2} + c = (a + bq)Q^{1/2} + c$$

donde: D= diám. (cm); q= descarga en (l/h); Q= agua aplicada en (l).

Los coeficientes a, b y c varían según el tipo de suelo.

Para un suelo de textura media los valores serían:

$$D = (0.11 \cdot q + 7.2) \cdot Q^{1/2} + 35 \quad r^2 = 86.2$$

y para un suelo de textura pesada sería :

$$D = (0.21 \cdot q + 2.54) \cdot Q^{1/2} + 28.6 \quad r^2 = 80.6$$

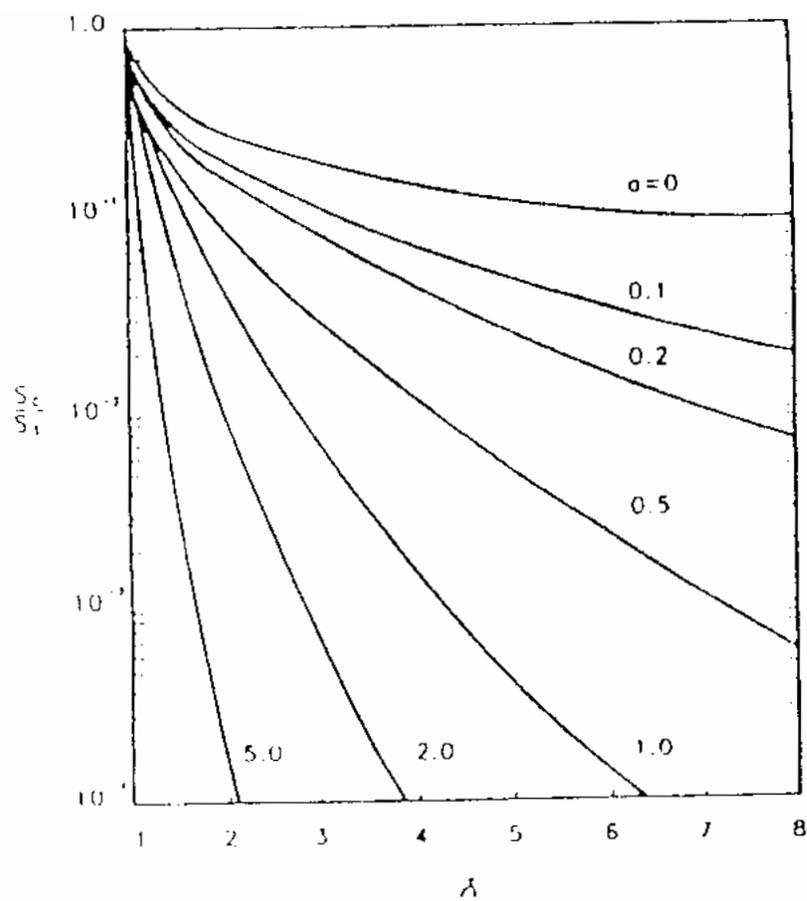


Gráfico 2.5: Valores de la superficie del suelo de  $S_c/S_s$ , como una función del ratio ( $\delta$ ) dimensional y "a" de Bresler (1978) (citado por Risse, Chesness, 1989)

### 2.3.1.2 Efecto de la tasa de descarga

Para Goldberg et al,(1976) la tasa de descarga del gotero generalmente excede la capacidad de infiltración del suelo debajo de este, consecuentemente un charco de agua se desarrolla bajo el gotero, el tamaño de esta área depende de la relación de la tasa de descarga y la tasa de infiltración del suelo, siendo  $\pi \cdot r^2 = q/l$ , donde  $q$ =tasa de descarga  $\text{cm}^3/\text{min}$ ;  $l$ =capacidad de infiltración  $\text{cm}/\text{min}$  y  $r$ =radio del charco de agua  $\text{cm}$ .

De acuerdo con esta ecuación un incremento en la descarga de los goteros o una disminución en la tasa de infiltración incrementaría el diámetro del charco.

Risse et al (1989) realizaron un trabajo de campo para ajustar la fórmula modificada de Bresler. Los resultados muestran que el promedio del radio de mojado para 3,78 l/h fue de 37,1 cm mientras que el promedio para 7,57 l/h fue de 35,3 cm. La diferencia entre éstos promedios de radio de mojado fue estadísticamente no significativa al 5%. Aunque no se midió, si se observó alguna diferencia en la profundidad de mojado de los dos tratamientos, con 3,78 l/h el suelo mojado fue bastante pequeño a profundidad con respecto a 7,57 l/h. El tratamiento de 7,57 l/h también mostró un marcado desplazamiento horizontal en el frente de mojado sobre el horizonte Bt. Dicho movimiento podría haber sido causado por una tasa de infiltración de agua sobre el horizonte Bt que excedería la conductividad hidráulica a través del horizonte.

Al comparar los valores de campo con los predichos con la fórmula modificada de Bresler se obtienen buenas correlaciones para caudales bajos (3.78 l/h), no siendo así para mayores caudales (7.57 l/h). En los resultados 5 de 8 valores para 3.78 l/h muestran menos del 6 % de desviación en los valores medidos. Los resultados comparativos indican que no hay diferencia significativa entre valores predichos y observados para 3.78 l/h. Los tratamientos de 7.57 l/h predichos y los observados no se ajustan tan bien como los de 3.78 l/h, pero a su vez los de 7.57 l/h medidos tienen menos variación entre sí (dispersión) que los de 3.78 l/h y los valores predichos son mayores que los observados.

#### 2.3.1.3 Efecto de la frecuencia de riego

Jurí, W.A. et al (1977) realizaron un estudio de campo tomando en cuenta frecuencia de riego y área de mojado

Los tratamientos fueron los siguientes: Un tratamiento consistía en tres riegos por día, el otro un riego por semana. en ambos casos se aplicó la misma cantidad de agua total de 84 L por semana a un caudal de 4 l/h.

Los resultados muestran que el agua se mueve mas lateralmente en los riegos semanales. A medida que aumentan los tiempos entre los riegos el movimiento lateral es mayor y hay mayor acumulación de agua a distancia con respecto al centro del gotero. El diámetro para los riegos diarios fue más pequeño que cuando se aplicó toda el agua en una vez (ver figura 2.3).

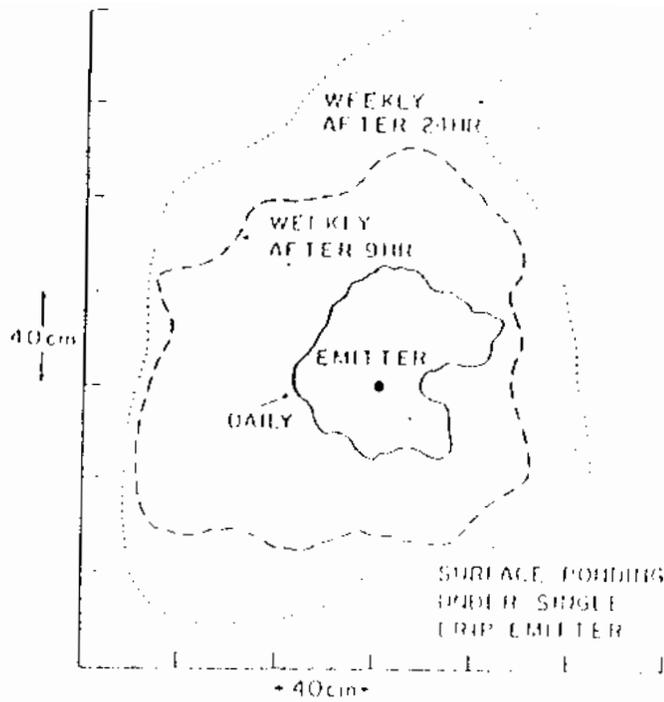


Figura 2.3: Esquema del perímetro superficial de mojado obtenido por fotografías tomadas luego de la aplicación de 4 litros en el tratamiento diario, 9 horas después de comenzado el tratamiento semanal de 84 litros y 24 horas después de comenzado el tratamiento semanal de 84 litros. (Jury, Earl, 1977).

### 2.3.2 Volumen de mojado

Schwartzman, et al (1986), asumen una elipse truncada para representar la geometría del volumen de mojado bajo un emisor (ver figura 2.4). Las dimensiones del volumen de mojado bajo un gotero son ancho y profundidad dependiendo de, las propiedades hidráulicas del suelo, de la descarga de los emisores y de la cantidad de agua aplicada. Los límites de volumen de suelo mojado son razonablemente bien definidos y están rodeados de suelo seco. La distribución del contenido de agua no es uniforme; este decrece con la distancia radial desde el punto de goteo.

Estos autores estudiaron la geometría del volumen de suelo mojado bajo riego por goteo y desarrollaron una serie de ecuaciones empíricas que relacionan el ancho y profundidad del volumen de mojado, con la descarga del emisor, conductividad hidráulica de saturación del suelo y el volumen de suelo mojado. Usando sus ecuaciones han mostrado que la relación ancho/profundidad del volumen de suelo mojado, en flujo saturado, tendería a decrecer, con un incremento en la conductividad hidráulica del suelo. Un incremento en la lámina de aplicación también decrecería la relación ancho/profundidad. Esto es especialmente significativo en suelo de textura liviana. Incrementando la descarga del emisor aumentaría la relación ancho/profundidad con un efecto más pronunciado en suelos de texturas mediana a pesada.

Se calcularon un número de posibilidades de relaciones ancho/profundidad y solo entonces seleccionaron las posibles combinaciones de espaciamiento y descarga de emisores que satisfagan la posible combinación ancho/profundidad. Para la serie de valores estudiados por los autores la profundidad  $h$  es igual a 20 cm.

Se asume el volumen de una elipse truncada como:

$$V = (\pi/12) * d^2 * \{2z + h - [h^3 / (2-h)^2]\}$$

donde  $d$ =diámetro

$z$ =profundidad

$h$ =20 cm

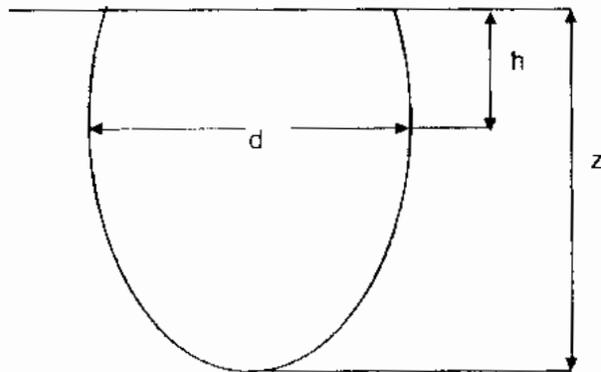


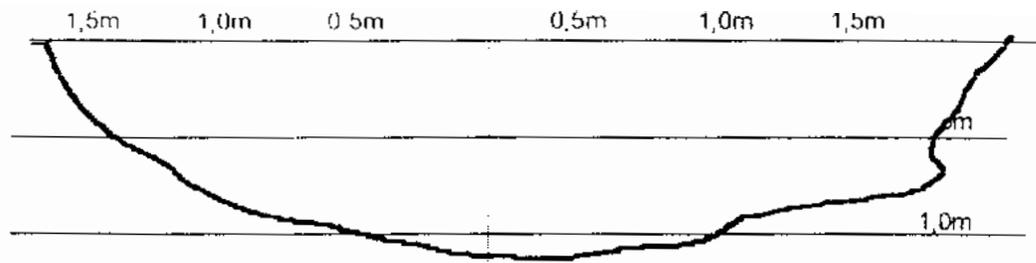
Figura 2.4: Modelo de una elipse truncada. (Schwartzman, Zur, 1986)

Para los mismos autores la estimación del volumen requerido de mojado, específicamente en condiciones de campo, está representado por el pico máximo de consumo del cultivo y por la variable capacidad de almacenaje de agua del suelo. El valor de volumen de mojado del suelo puede ser entonces modificado por cambios en los valores de umbral de riego y del intervalo de riego basados en la sensibilidad del cultivo, experiencia local y práctica de manejo. La influencia de la variable capacidad de campo del suelo sobre volumen de mojado es obvia, bajo un consumo máximo de agua, dado por el cultivo, los requerimientos de un suelo arenoso son mucho mayores en volumen de suelo mojado que un suelo arcilloso para satisfacer la evapotranspiración del cultivo.

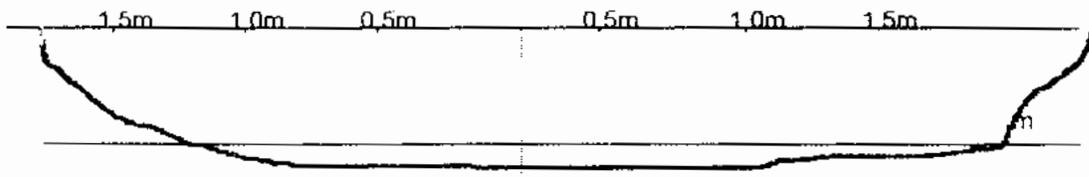
FAO, (Riego por Goteo, 1974) llevo a cabo un estudio sobre la formación del bulbo, en un suelo franco arcilloso. El estudio consistió en la distribución del agua de modo continuo por goteadores durante tres semanas, a dos intensidades de caudal: 0.48 l/h y 0.84 l/h. La humedad se midió en muestras de suelo tomadas de secciones del perfil.

En el caso de un caudal de 0.48 l/h el diámetro humectado es de 3m en la superficie y de 0.8m a una profundidad de 0.5m. Para 0.84 l/h el diámetro mojado es de 4m en la superficie y 2.8m a una profundidad de 1.4m.

Para el mismo suelo, con caudales de 0.61 l/h y 0.28 l/h también se observó que la humedad se extendía bastante ampliamente en la superficie pero que había poca infiltración a profundidad para el caudal mas bajo (ver figura 2.5).



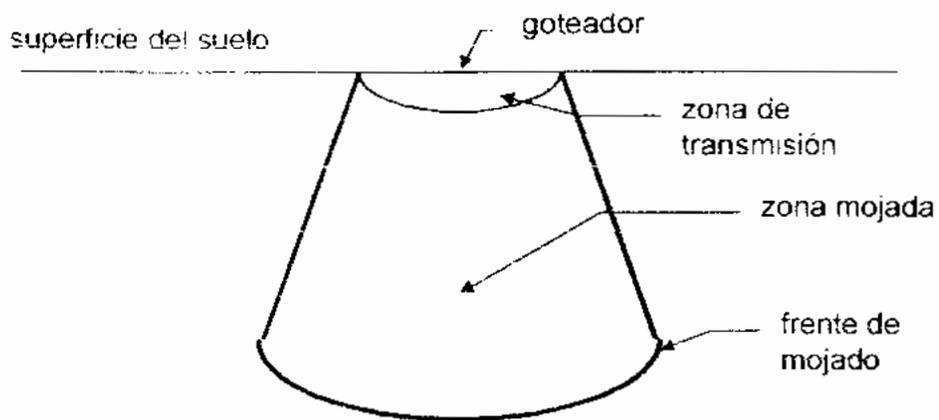
(a)



(b)

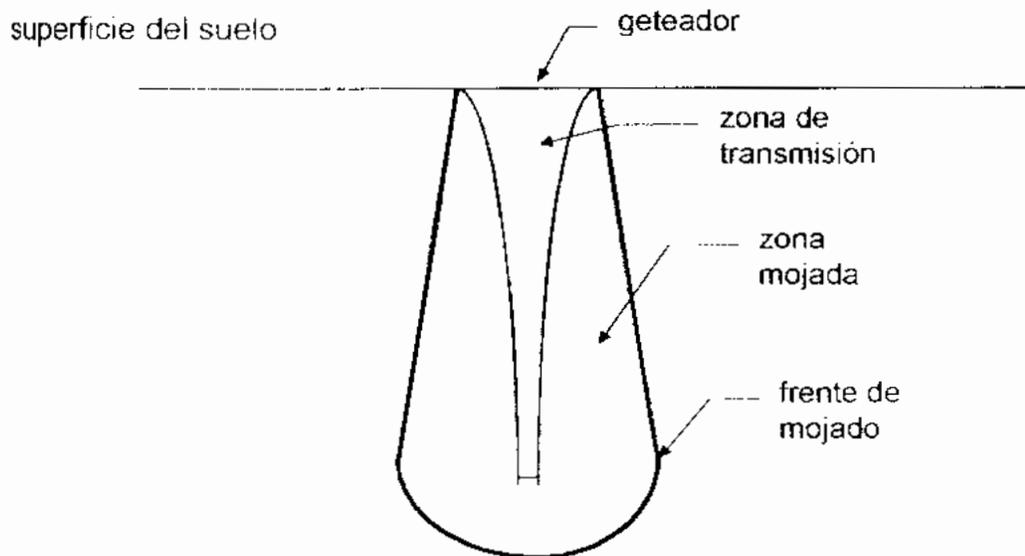
FIGURA 2.5: Evolución del frente de mojado bajo un gotero; (a) para un caudal de 0,61 l/hs y (b) para un caudal de 0,28 l/hs. (FAO, Riego por Goteo, 1974)

Según la FAO (Riego por Goteo, 1974) bajo cada gotero se desarrolla un volumen mojado cuya forma se aproxima a la de un cono truncado con una base convexa donde la superficie del terreno coincide con la cara truncada (ver figura 2.6). Los factores más importante que afectan la forma, pendiente y profundidad del "cono" (bulbo) son el caudal del manantial único y puntual, el tipo de suelo y el grado de evapotranspiración. En un lapso dado cuanto mayor sea el caudal, más profunda será la penetración y más ancho el flujo lateral. A la vez, cuanto más fina sea la textura, más extensa y superficial será la distribución del agua



(a)

Figura 2.6a: Distribución del agua en el perfil del suelo; suelos pesados y medios  
(FAO, Riego por Goteo, 1974)



(b)

Figura 2.6b: Distribución del agua en el perfil del suelo ; suelos arenosos.  
(FAO, Riego por Goteo, 1974)

Howell et al (1980) consideran el volumen de mojado del suelo próximo a una semi-esfera, asumiendo que el volumen de suelo es mojado desde un contenido de agua inicial a uno final, entonces el radio de mojado de la semi-esfera es:  $r=3 \cdot q \cdot t / [2 \cdot \pi \cdot (\theta_f - \theta_i)]^{1/3}$  donde:  $q$ =tasa de aplicación en  $m^3/h$

$t$ =tiempo de aplicación en h

$r$ =radio en m

$\theta_f$ =contenido agua final

$\theta_i$ =contenido agua inicial.

Roth, 1974 midió el patrón de mojado en un suelo arenoso del Sur Oeste de Arizona . Se usaron 3 tasas de aplicaron de agua de 3.8, 7.6 y 15.2 l/h siendo la misma cantidad de agua al final de 12, 6 y 3 horas respectivamente y en cada caso el contenido de agua inicial era 3% por debajo de capacidad de campo.

Los resultados se muestran en la figura 2.7 Preferentemente fue una semi-esfera, sin embargo el volumen de mojado fue elongado en la dirección vertical. En la mayor tasa de aplicación el tamaño fue influenciado por la gravedad y como resultado la más chica en área de mojado. Esto es el resultado para un suelo uniforme.

En el caso de un suelo estratificado donde existe un horizonte de textura mas fina que el horizonte superficial el avance del frente de mojado es similar al de la figura 2.7 hasta que se encuentra con dicha capa de transición. A partir de ese momento ocurre un movimiento lateral sobre el horizonte subsuperficial hasta que el potencial se reduce lo suficiente para permitir la penetración del agua.

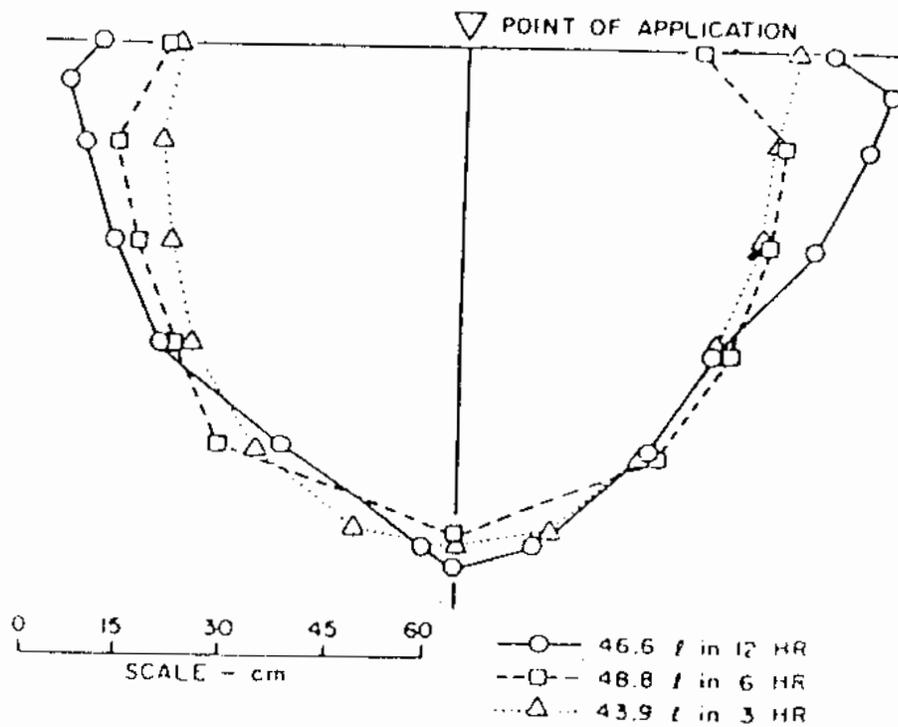


Figura 2.7. Patrón de mojado para igual volumen de aplicación de agua, para tres tasa. (Roth, 1974; citado por Howell et al. 1980)

Ledesma et al. (1995) tratan de desarrollar ecuaciones empíricas para predecir el movimiento del agua en el suelo, aplicando riego por goteo, a partir de datos de campo llevada a cabo en tres tipos de suelos, arcilloso, arenoso y franco y aplicando caudales de 2 y 4 l/h.

En el cuadro 2.1 se presentan los datos de profundidad y diámetro del bulbo húmedo a través del tiempo, obtenido para cada uno de los suelos y para los caudales aplicados.

CUADRO N° 2.1 (a, b y c) Datos de la prueba de campo: profundidad (P) , diámetro (D) e Infiltración Básica (I<sub>b</sub>) del bulbo húmedo.( Adaptado de Ledesma y Martínez, 1995).

Cuadro 2.1 a

Suelo arcilloso (I <sub>b</sub> = 4,8 cm/h)				
Tiempo	2 l/h		4 l/h	
(h)	P (m)	D (m)	P (m)	D (m)
2	0,303	0,333	0,330	0,430
4,5	0,320	0,455	0,565	0,489
6	0,415	0,500	0,547	0,520

Cuadro 2.1 b

Suelo franco (I <sub>b</sub> = 3,0 cm/h)				
Tiempo	2 l/h		4 l/h	
(h)	P (m)	D (m)	P (m)	D (m)
2	0,250	0,385	0,330	0,390
4,5	0,313	0,550	0,425	0,518
6	0,330	0,565	0,575	0,530

Cuadro 2.1 c

Suelo arenoso (I <sub>b</sub> = 2,0 cm/h)				
Tiempo	2 l/h		4 l/h	
(h)	P (m)	D (m)	P (m)	D (m)
2	0,240	0,425	0,290	0,520
4,5	0,370	0,615	0,450	0,745
6	0,420	0,650	0,490	0,800

La infiltración básica según las pruebas de campo resulto contradictoria; 4.8 cm/h para suelo arcilloso, 2 cm/h para arenoso. Sin embargo esto puede explicarse con lo que dicen algunos autores: Pizarro (1990); cuando el potencial mátrico se aproxima a cero el efecto de la estructura domina sobre la textura, y López et. al (1992); el movimiento del agua en el suelo no depende tanto de la textura como de la estructura de éste.

Los datos de campo tal como se observan en el cuadro 2.1 resultaron congruentes con los valores de infiltración básica de cada uno de los suelos.

Se obtuvieron ecuaciones empíricas a partir de los valores de regresión de las pruebas de campo. Estos modelos fueron para la profundidad (P) y el radio (R) en función del tiempo:

$$P = K_p * t^{N_p}$$

$$R = K_r * t^{N_r} \quad \text{donde } K_p = q * (I_b)^{1/2}$$

$$N_p = 2/3 * (q^{1/3} * I_b^{1/4})$$

$$K_r = 5/2 * (q * I_b)^{2/5}$$

$$N_r = 1/2 * (q^{1/5} * I_b^{1/2})$$

siendo q = tasa de aplicación l/h;

$I_b$  = infiltración básica cm/h

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA PARCELA

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Centro Regional Sur (C.R.S), Camino Folle, Km 35, Juanicó, en el período febrero - abril de 1997.

Según la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay 1:1000000 DSF, (MGAP, 1976) la parcela en estudio se ubicaría en la unidad cartográfica Tala-Rodríguez, con laderas medianas, ligeramente convexa, pendiente general entre 3 y 4%, pendiente local 1,5%. El suelo se clasifica como Brunosol Eutrico Tipico, LAc (ver cuadro 3.1). La capacidad de campo del suelo para los horizontes A, Bt y C es de 40.46, 47.8 y 42.76 en H%V a -0.1 bar respectivamente, (gráfico 3.1). La densidad aparente para los mismos horizontes es 1.45, 1.51 y 1.55.

La superficie de la parcela es de 330 m<sup>2</sup>, la misma estaba sin vegetación con un laboreo primario que consistió en una arada de cincel 10 días antes de comenzado el ensayo.

Cuadro 3.1 Descripción del perfil. Fuente : Ing. Agr. Alfredo Silva (Facultad de Agronomía 1997)

Profundidad (cm)	Horizonte	Descripción
0-28	A	Pardo oscuro (10YR3/2); FrAcL; bloques subangulares medios y friables moderados; raíces abundantes.
28-55	Bt1	Pardo muy oscuro (10YR2/1), textura FrAcL; bloques subangulares medio y finos, moderados, con raíces abundantes, moteados amarillentos pequeños y pocos (arena de cuarzo y óxido), transición clara a gradual.
55-80	Bt2	Pardo oscuro(10YR3/2) textura AcL; bloques angulares fuertes, horizonte pesado, pardo oscuro, transición gradual.
80-93	Bc	Pardo amarillento oscuro (10YR4/6), FrAcL pesado, presencia de carbonatos, transición clara.
mas de 93	Ck	horizonte con concreciones de CaCO <sub>3</sub> pequeños y abundantes, también con CaCO <sub>3</sub> en masa, pulverulentas

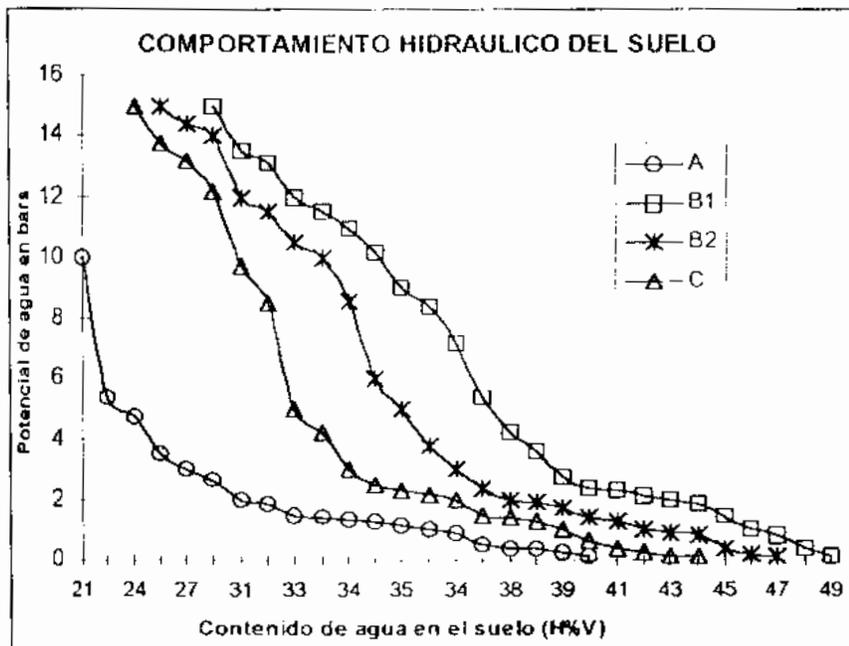


Gráfico 3.1 Comportamiento Hidráulico del Suelo

### 3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO A CAMPO

Se realizaron tres experimentos correspondientes a tres tiempos de goteo (2, 4 y 6 horas de riego). El diseño experimental adoptado fue de bloques completos al azar con tres tratamientos (2, 4 y 8 litros por hora). Este se realizó en tres fechas 11/03/97, 19/03/97 y 16/04/97 constituyendo un total de 9 experimentos (Anexo, fig. 1).

Para el análisis estadístico se realizó el estudio de homogeneidad de varianza entre los experimentos, resultando que la varianza del error entre los 9 experimentos y la varianza del error entre los bloques no presenta diferencias, por lo que se analizaron los datos en forma conjunta.

El análisis se realizó con el paquete estadístico SAS, (Statiscal Analysis Sistem), 1996.

### 3.3 DISPOSITIVO DE GOTEO

#### 3.3.1 Descripción del dispositivo de goteo

El dispositivo de goteo consta de un tanque de 5000 L. que aporta agua a un tanque de 200 L. manteniendo una carga constante en el mismo de 0.8 m durante todo el período de riego. Para evitar la sobrecarga se realiza un desagüe en la parte superior del tanque (altura de carga a 0.8 m), que consiste en una salida de tanque de ½ pulgada a la cual se le conectó una manguera de polietileno de 13 mm. En la parte inferior del tanque de 200 L se realiza un orificio donde se coloca una salida de tanque de 1 ½ pulgadas, a esta salida se le une un caño de PVC de 20 cm por medio de una unión doble.

A la salida del caño se le une una T con rosca interna de 1½ pulgada y a cada lado de esta se une otra T por medio de enterroscas. Con esto se obtiene cuatro salidas a las cuales se le acoplan válvulas de esfera por medio de enterroscas iguales a las mencionadas anteriormente, para permitir la salida de agua. Para el diámetro de salida de 1½ pulgada, un caudal máximo de 168 l/h (caudal total en la primeras 2 h de riego con las cuatro válvulas abiertas) y tomando el coeficiente de rugosidad  $C=140$ , la pérdida de carga por fricción es casi despreciable para la fórmula de Hazen-Williams. En la salida de cada válvula se acoplan reducciones de ½ pulgada donde se conectan las mangueras que llevan los goteros.

Cada manguera de 13 mm de diámetro tiene una longitud total de 33 m, donde a partir de los primeros 6 m, se ubican los goteros a una distancia de 3 m entre cada uno, para evitar el contacto entre las áreas de mojado contiguas. El final de la manguera se cierra con un cierre standard de línea de goteo. Se toma un diámetro de 13 mm para minimizar la pérdida de carga por fricción, siendo para un caudal de 42 l/h (en cada manguera) y un coeficiente de rugosidad  $C=140$  de 0.1 m cada 100 metros de tubería. Por lo cual para 33 m de tubería la pérdida de carga es de 0.03 m según la fórmula de Hazen - Williams, siendo este valor despreciable.

El gotero consta de un microtubo de 1/8" de diámetro externo de 20 cm de longitud, insertados a presión en la manguera.

Para regular el caudal de salida en los microtubos se utiliza una "válvula", confeccionado con una regleta de conexión eléctrica (figura 3.1). La misma consiste de un cilindro metálico dentro del cual pasa el microtubo y por medio de dos tornillos que entran por el costado del cilindro se logra presionar el microtubo. De esta forma se logra disminuir el diámetro obteniéndose los caudales de interés.

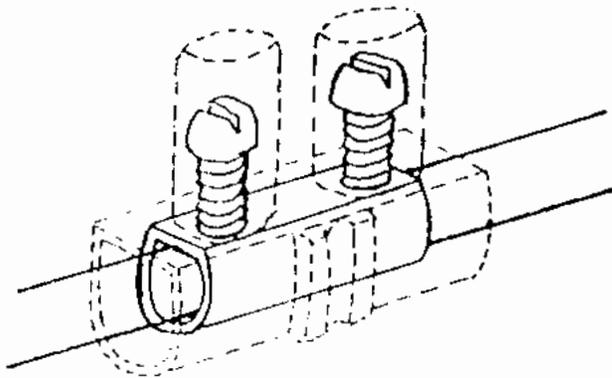


Figura 3.1 Válvula para regular el caudal en los microtubos (regleta: material de uso eléctrico)

El tanque de riego se ubica en un extremo de la parcela y las mangueras perpendiculares a la pendiente. De esta manera se logra mantener todo el largo de la manguera con una carga de 0.8 m evitando la diferencia de presión entre los goteros.

### 3.3.2 Calibración del dispositivo de goteo.

El uso de microtubos como goteros se debe a que se trabaja con una baja carga para la cual no hay goteros estándar en plaza.

Antes de llegar al diseño final del dispositivo de goteo se hicieron diferentes pruebas para lograr los caudales establecidos de forma practica y sencilla.

En primera instancia se busca regular el caudal por medio de la pérdida de carga por fricción variando el diámetro y la longitud de los microtubos. Se trabaja con un diámetro externo de 3/16" (4,74mm), 1/8" (3,2mm), con diámetros internos de 1/8" (3,2mm), 1.2/16" (1,9mm) y 0.9/16" (1,4mm) respectivamente, para igual diámetro externo en los dos últimos casos, la diferencia del diámetro interno estaba dado por el espesor de la pared. Para cada diámetro se utilizan longitudes entre 0.4 m y 1 m.

Los caudales de 8 l/h y 4 l/h no se logran obtener con longitudes menores a 1 m para un diámetro interno de 1.2/16" (1,9mm). Con el microtubo de diámetro interno de 0.9/16" (1,4mm) los caudales de 8 l/h y 4 l/h se logran con longitudes de 40 cm y 80 cm respectivamente. Para lograr el caudal de 2 l/h se necesita una longitud mayor a 1 m del microtubo de menor diámetro, por lo cual se prueba un sistema de goteo para bajas presiones, (citado por FAO; Riego por Goteo, 1974). El mismo consiste en un microtubo en donde en uno de los extremos se coloca un tornillo, cumpliendo la función de válvula reguladora del caudal por ofrecer cierta resistencia al agua en la salida del mismo. Para este sistema se trabaja con el diámetro interno de 1/8" (3,2mm) y un tornillo de 1/2" de longitud (Anexo, figura 2).

Finalmente la mejor forma de lograr los caudales requeridos fue mediante la válvula descrita en el punto 3.3.1.

### 3.4 DETERMINACIONES

#### 3.4.1 Agua en el suelo previo al riego

Estas medidas se obtienen usando la metodología gravimétrica. Para ello se tomaron muestras de suelo en ocho puntos al azar dentro de la parcela de riego utilizando un taladro de mecha. En cada punto se toma una muestra de cada horizonte, de aproximadamente 200 gr. Dicha muestras se colocan en cápsulas herméticas para evitar la pérdida de humedad, secándose en estufa a 100°C durante 48 h. De esta forma se obtiene el porcentaje de humedad en peso:  $H\%P = (\text{peso húmedo} - \text{peso seco} / \text{peso seco}) * 100$ . Los datos de la curva de tensión (gráfico 3.1), se obtuvieron usando los extractores de presión (olla de Richard).

#### 3.4.2 Dimensiones del bulbo de mojado

##### 3.4.2.1 Diámetro Húmedo en superficie.

El diámetro del área de mojado bajo cada gotero es el promedio de dos diámetros perpendiculares medidos inmediatamente de cortado el riego.

También se midieron los diámetros a la 24 h con el mismo criterio que para el día del riego.

### 3.4.2.2 Forma del bulbo

#### Resistencia a la Penetración

Para describir la forma del bulbo en el subsuelo se usaron agujas (varillas de hierro de 6 mm) que se clavaron en la zona recientemente mojada, perpendicular a la superficie, en el centro del área de mojado y a ambos lados a 10 cm y a 20 cm y también a 30° y 60° con respecto a la superficie.

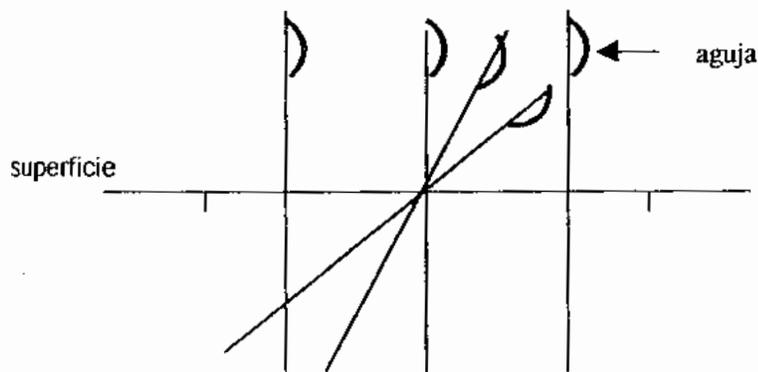


Figura 3.2 Determinación de la resistencia a la penetración con agujas

Las varillas penetrarían fácilmente en el perfil del suelo hasta llegar a la zona seca, la cual presentaría mayor dificultad de penetración. Dichos límites representarían el movimiento del agua de riego en el perfil, por consiguiente se determinaría la forma del bulbo.

Con el mismo objetivo se utiliza un taladro de mecha. Las medidas en este caso se toman perpendicular a la superficie en el centro del área de mojado y a 10 cm a cada lado, a diferentes profundidades hasta llegar al límite entre la zona húmeda y seca, esta diferencia se estima al tacto.

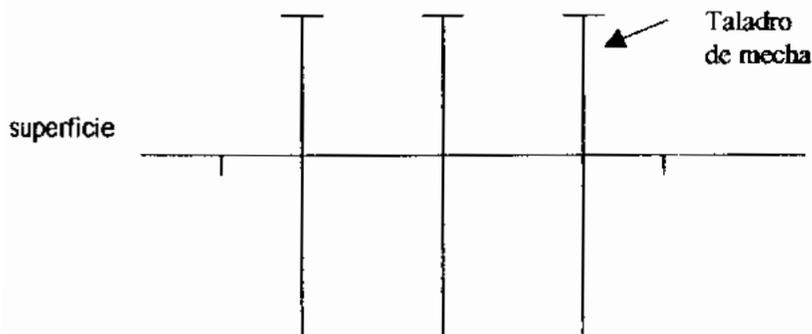


Figura 3.3 Determinación del límite entre húmedo y seco al tacto

### Profundidad del bulbo

En este caso la medida de la profundidad del bulbo de mojado se realiza usando la metodología gravimétrica. Se toman muestras con un taladro de mecha en el centro del área de mojado, a partir del los 20 cm desde la superficie (asumiendo el horizonte superficial saturado). En el ensayo del 20/03/97 los rangos de profundidades en las cuales se tomaron muestras fueron de 20 a 35 cm, 35 a 50 cm y 50 a 70 cm y para el ensayo del 17/04/97 las profundidades fueron de 20 a 35 cm, 35 a 50 cm, 50 a 65 cm y 65 a 80 cm.

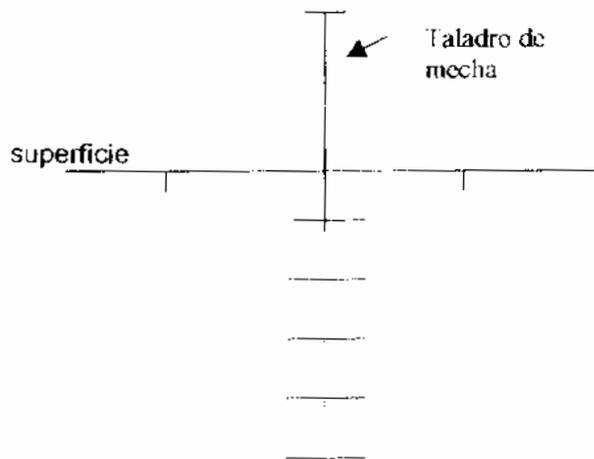


Figura 3.4 Determinación de la profundidad máxima del bulbo con análisis gravimétrico

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 RESULTADOS DE LAS METODOLOGÍAS PROPUESTAS

#### 4.1.1 Regulación del caudal por pérdida de carga

El inconveniente que se presenta utilizando esta metodología es la dificultad de regular en forma práctica las variaciones que se observan de los caudales durante el riego y cuando se traslada el dispositivo de goteo.

A continuación se presentan los resultados utilizando la fórmula de Darcy para el cálculo de pérdida de carga (cuadro 4.1 a y b). Con esto se demuestra lo poco práctico de usar la longitud del microtubo como pérdida de carga por fricción para regular el caudal.

Cálculo de longitudes y pérdidas de carga según la fórmula de Darcy:

$$H_f = (f \cdot l \cdot v^2) / (d \cdot 2 \cdot g)$$

$h_f$ : pérdida de carga por fricción igual a carga existente en el dispositivo = 0.80 m.

$l$ : longitud en m = es el valor a hallar

$v^2$ : velocidad calculado a partir de la relación caudal  $m^3/s$  y área de la sección de los microtubos.

$d$ : diámetro interno del microtubo en m

$g$ : aceleración gravitacional ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$f$ : coeficiente de fricción. Para régimen laminar  $f=64/Re$ .

$Re$ : Número de Reynolds =  $v(m/s) \cdot d(m)/\nu(m^2/s)$

Según diagrama de Moody con valores de  $Re$  hasta 4000 se está en la zona de régimen de flujo laminar.

$\nu$  = viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura

$\nu = \{40 / (t \text{ } ^\circ\text{C} + 20)\} \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)} = 0,80 \cdot 10^{-6}$

$t \text{ } ^\circ\text{C}$  del agua = a  $30 \text{ } ^\circ\text{C}$

Cuadro 4.1a Cálculo de longitud usando la fórmula de Darcy

Diámetro (m)	Caudal (m <sup>3</sup> / s)	Sección (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Re	Coef. fricción	Longitud (m)
<b>0.0014</b>	5.5*10 <sup>-7</sup> (2 l/h)	1.54*10 <sup>-6</sup>	0.357	624.75	0.102	<b>1.69</b>
	1.1*10 <sup>-6</sup> (4 l/h)		0.714	1249.5	0.05	<b>0.862</b>
	2.2*10 <sup>-6</sup> (8 l/h)		1.43	2502.5	0.026	<b>0.41</b>

Cuadro 4.1b Cálculo de longitud usando la fórmula de Darcy

Diámetro (m)	Caudal (m <sup>3</sup> / s)	Sección (m <sup>2</sup> )	Velocidad (m/s)	Re	Coef. fricción	Longitud (m)
<b>0.0019</b>	5.5*10 <sup>-7</sup> (2 l/h)	2.84*10 <sup>-6</sup>	0.194	460.75	0.14	<b>5.66</b>
	1.1*10 <sup>-6</sup> (4 l/h)		0.387	919	0.07	<b>2.84</b>
	2.2*10 <sup>-6</sup> (8 l/h)		0.775	1840.6	0.035	<b>1.42</b>

Como se observa en los cuadros para un mismo diámetro a mayor caudal el largo de microtubo es menor, cuando aumentamos el diámetro esta diferencia en longitud es más acentuada. El largo del microtubo para el mayor caudal y el menor diámetro fue de 0,41 m y para el resto las longitudes eran mayores a 1 m. El trabajar con esta metodología hace que para la instalación de un dispositivo de goteo sean muchos metros de microtubos a utilizar, lo que determinó ser poco practico para usarlo en condiciones de campo.

#### 4.1.2 Regulación del caudal por el método Access Frames LTD (F.A.O, Riego por Goteo)

Dicho sistema se utilizó para obtener el caudal de 2 l/h. El inconveniente es que presentó poca precisión para regular el caudal. Con este método se observaron a lo largo del tiempo variaciones del caudal.

Estas variaciones fueron causadas porque el tornillo se insertaba en la pared del microtubo cortándolo y por estar poco atornillado para lograr el caudal de 2 l/h.

#### 4.1.3 Regulación del caudal por "válvula"

Regular el caudal con una válvula (figura 3.1) es lo que dio resultado, por lo cual se utiliza para este ensayo. Las ventajas que el mismo presenta son: adaptarse a la baja presión con la que se cuenta, la facilidad de regular todos los caudales con el mismo método y mostrar seguridad de mantener durante todo el período de riego el caudal constante.

## 4.2 FORMA DEL BULBO

### 4.2.1 Diámetro de mojado superficial

Los diámetros para el menor caudal y tiempo de riego varían en un rango de 26 cm a 34 cm, siendo para el mayor caudal y tiempo de riego entre 49 cm y 62 cm (cuadros 4.2a, b, c).

Cuadro 4.2a Diámetros promedios

11/03/97	Caudal l/h		
H	2	4	8
2	33,8	39,2	48
4	35,2	36,2	46,7
6	41,8	46,3	61,7

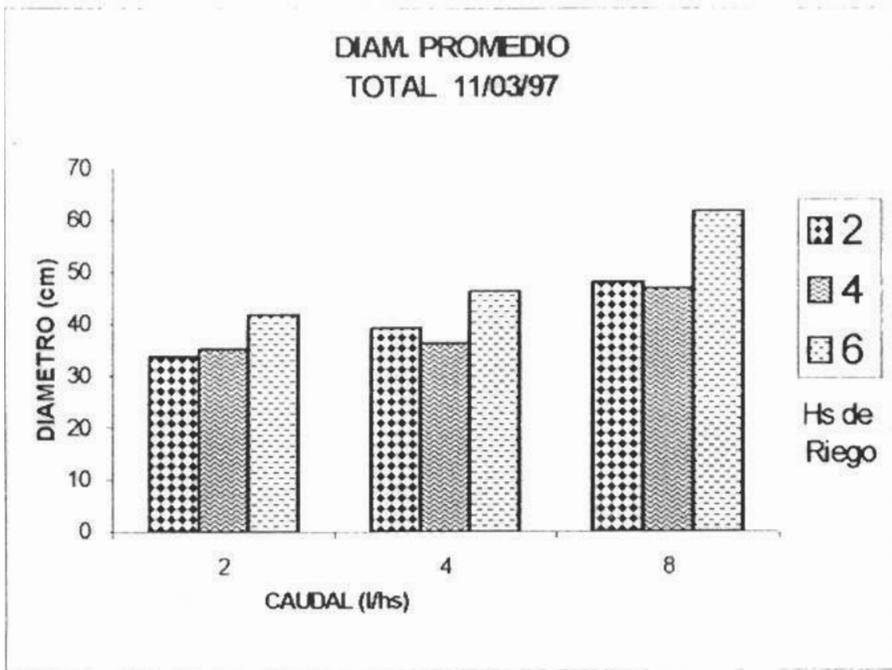
Cuadro 4.2b Diámetros promedios

19/03/97	Caudal l/h		
H	2	4	8
2	26,3	33,8	32,3
4	32,8	40,5	45,5
6	36,3	38,7	49

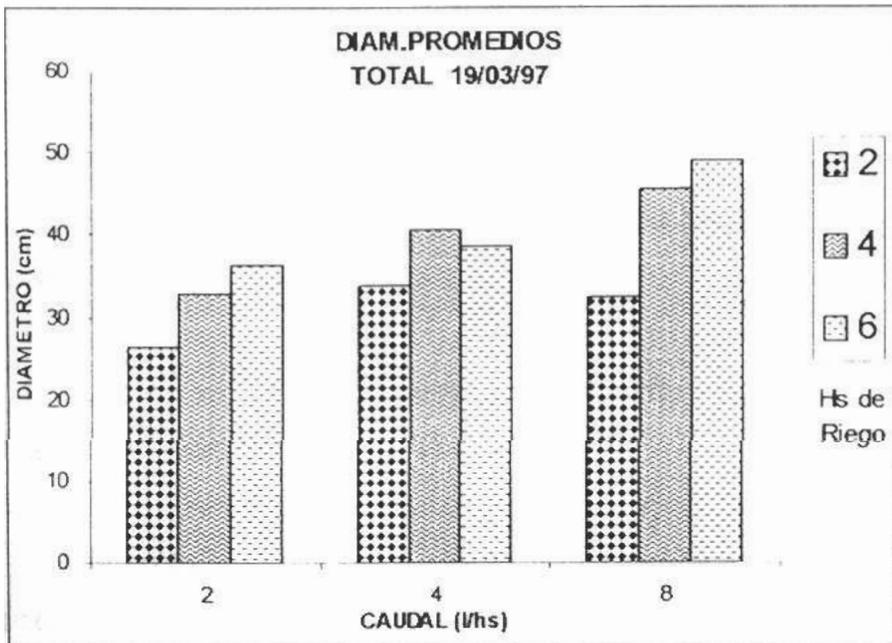
Cuadro 4.2c Diámetros promedios

16/04/97	Caudal l/h		
H	2	4	8
2	29,33	43,5	49
4	37,17	43,5	55,17
6	38,67	56,5	57,8

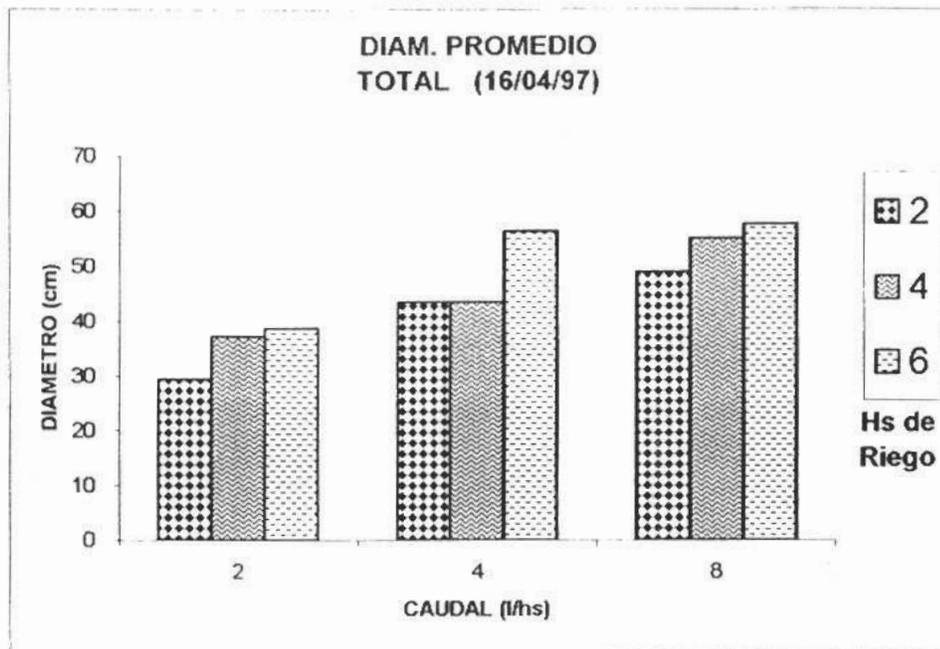
Como se observa en los gráficos 4.1a, b, c para todos los ensayos al aumentar el caudal y el tiempo de riego los diámetros promedio de mojado bajo cada gotero tienden a ser mayores.



Gráfica. 4.1a



Gráfica 4.1b



Gráfica. 4.1c

Gráficos 4.1a, b y c: Variación del diámetro en función del caudal (l/h) y tiempo de riego (h)

Quando se analiza estadísticamente la influencia del caudal los diámetros promedios, se observa que en todos los casos hay diferencias entre ellos ( $p=0.0001$ ).

Quando se toma en cuenta el tiempo de riego hay diferencia entre los diámetros promedios ( $p=0.0001$ ).

Tomando en cuenta el efecto fecha también hay diferencias entre los diámetros promedios ( $p=0.0015$ ).

El análisis de regresión de los diámetros promedios en función del caudal y tiempo de riego da como resultado la siguiente ecuación:

$$D = 21.3 + 2.6q(l/h) + 2.2t(h);$$

$$R^2=0.53$$

siendo D= diámetro (cm); q= caudal (l/h); t= tiempo de riego (h).

En el cuadro 4.3 se muestran los resultados de diámetros calculados por la ecuación de regresión, los cuales se comparan con los datos obtenidos a campo (cuadros 4.2 a, b y c).

Cuadro 4.3 Diámetros obtenido por ecuación de regresión

HS	Caudal (l/h)		
	2	4	8
2	30.9	36.1	46.5
4	35.3	40.5	50.9
6	39.7	44.9	55.3

El análisis comparativo se realiza tomando el diámetro medido a campo como porcentaje del diámetro obtenido por la ecuación de regresión. Dichos porcentajes no difieren estadísticamente ( $p \geq 0,20$ ) cuando se toman en cuenta los efectos caudal, tiempo de riego y las interacciones. Sí existe diferencia entre los porcentajes cuando se comparan las fechas ( $p=0,0017$ ).

Dentro del efecto "fecha" existirían factores de variación no identificados que estarían influenciando en dicho comportamiento. De todos modos se puede decir que a pesar de la baja correlación que muestra el análisis de regresión, para el suelo estudiado sería un buen estimador del diámetro de mojado.

Los diámetros a las 24 h no se midieron en todas las fechas, dado que el 19-03-97 se mide el día del riego y a las 24 h donde no se observaron diferencias ( $p > 0,21$ ).

Cuadro 4.4 Comparación de diámetros (cm) día del riego y a las 24 h

T. riego (h)	Bloque	19-03-97			20-03-97		
		2 l/h	4 l/h	8 l/h	2 l/h	4 l/h	8 l/h
2	A	26	42.5	39	25	42.5	40
	B	29	30	50	28	36.5	57.5
	C	24	29	40	27.5	27.5	43.5
4	A	43	43.5	41.5	40	42	37.5
	B	32.5	44	46	27.5	42	44
	C	23	34	49	24	34	52.5
6	A	37	30.5	54.5	39	31	55
	B	37	45	45	35	46.5	47.5
	C	37	40.5	47.5	33	35	50

#### 4.2.2 Profundidad de mojado

La metodología de las agujas para describir la forma del bulbo de mojado presentó inconvenientes dados por la presencia de un horizonte Bt que imponía resistencia a la penetración de las agujas. Esta resistencia no se podía distinguir de la resistencia que se impondría al pasar de húmedo a seco. Como para los diferentes caudales y tiempo de riego se obtuvieron medidas similares, se asumió que los datos no eran representativos de la forma del bulbo.

Cuando se uso el taladro de mecha para medir la diferencia de humedad al tacto previo al riego y finalizado el mismo, esta fue poco perceptible, entonces dicha metodología no se consideró precisa para describir la forma del bulbo.

El método gravimétrico fue el que presentó resultados más consistentes con respecto a los métodos mencionados anteriormente, por lo que se analizan los resultados más a profundidad.

Los datos que se analizan a continuación para cada fecha son los resultados del promedio de las tres repeticiones de los caudales (2, 4 y 8 l/h) en cada experimento (2, 4 y 6 h de riego), conjuntamente con la humedad previa al goteo y la humedad a CC (capacidad de campo).

El 20/03/97 la humedad previa al goteo se encontraba 25% por debajo de CC (CC equivalente a 100%) en el horizonte Bt1 (de 20 a 50 cm) y un 19% por debajo, en el horizonte Bt2 (de 50 a 70 cm).

Los resultados de esta fecha fueron muy variables y no marcaron ningún patrón de comportamiento que pudieran explicar las relaciones existentes entre los tratamientos y la profundidad de mojado (gráficos 4.2a,b y c).

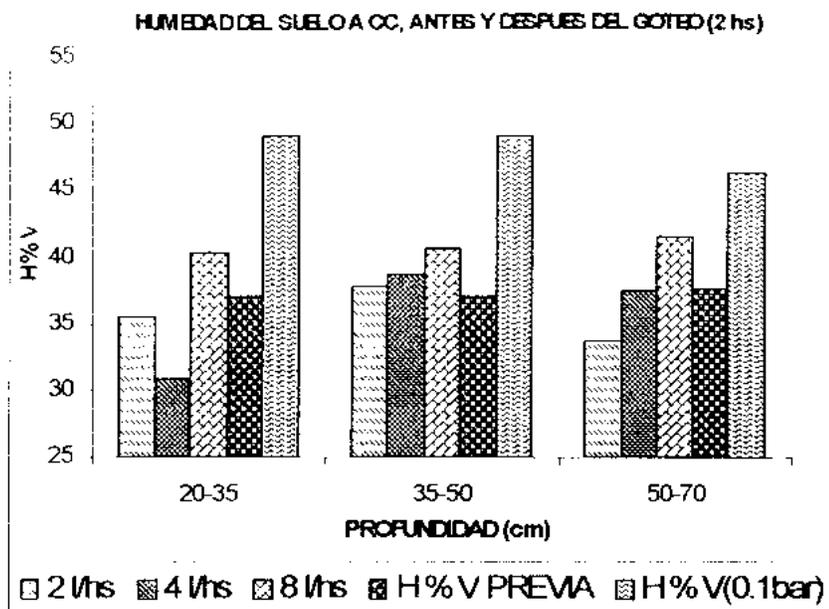


Gráfico 4.2a (20/03/97)

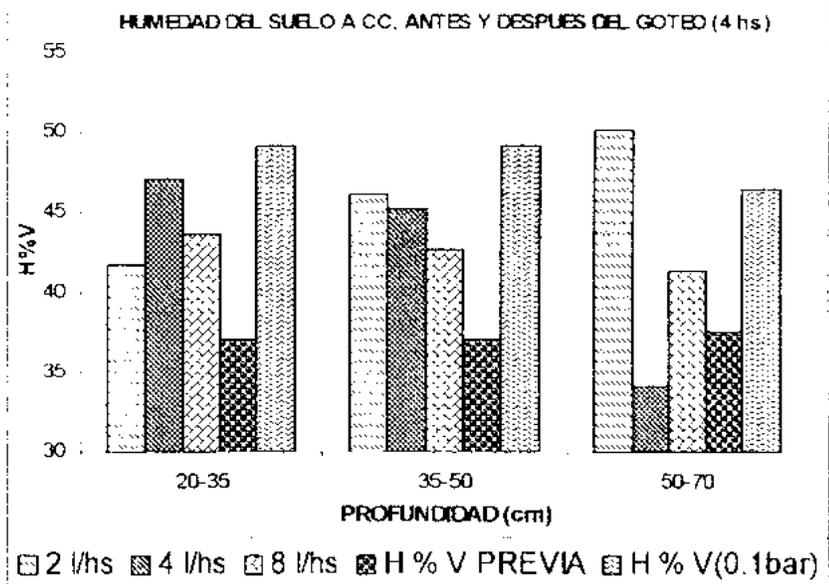
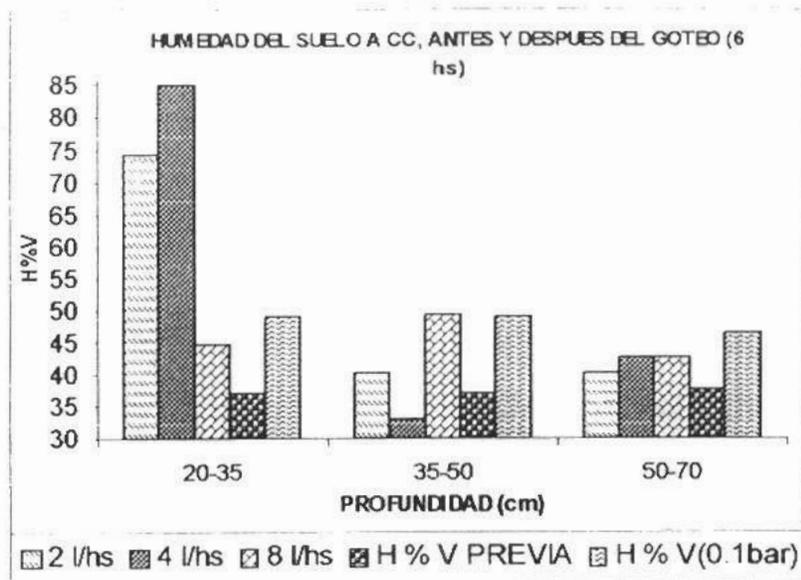


Gráfico 4.2b (20/03/97)



El 17/04/97 la humedad previa al goteo se encontraba 23% por debajo de CC (CC equivalente a 100%) en el horizonte Bt1 (de 20 a 50 cm) y un 10% por debajo, en el horizonte Bt2 (de 50 a 80 cm).

Regando durante 2 horas nunca se llegó a CC (humedad a CC equivalente a 100%) para 2 l/h y en los restantes caudales se aproximó en el entorno del 1% en las mayores profundidades. Para todos los caudales hasta los 50 cm de profundidad la humedad de riego fue siempre mayor a la humedad previa (humedad previa equivalente a 100%), siendo un 7% mayor entre 20 y 35 cm de profundidad para un caudal de 2 l/h y 26% mayor entre 35 y 50 cm para 4 l/h. A mayor profundidad el único que marcó diferencia es el caudal de 8 l/h con un 12% más entre 50 y 65 cm y 9% más entre 65 y 80 cm (gráfico 4.3a).

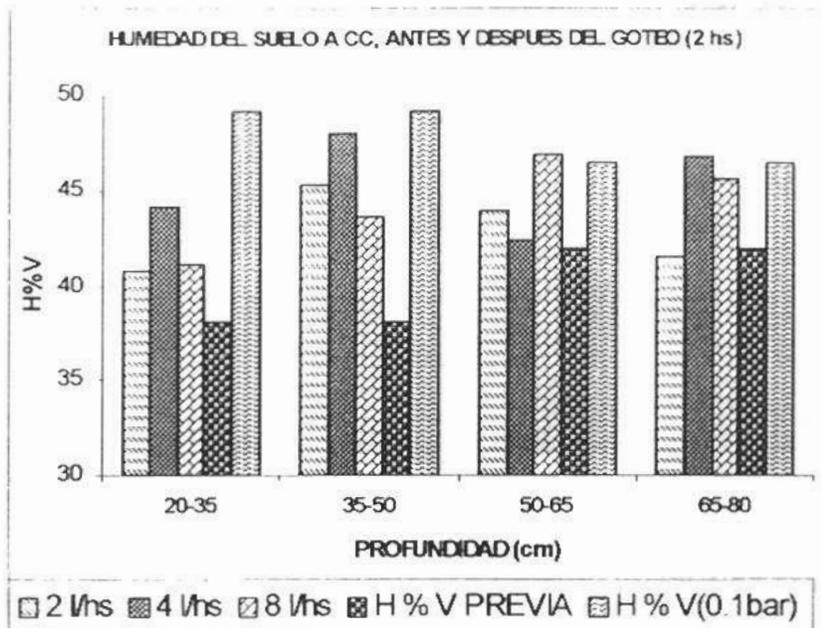


Gráfico 4.3a (17/04/97)

Con 4 horas de riego se observó que para todos los caudales entre 50 y 65 cm de profundidad la humedad de riego fue la más cercana a CC (humedad a CC equivalente a 100%) comparado con los otros estratos del perfil del suelo. Por lo tanto para todos los caudales no se llegó nunca a CC, estando el valor más cercano 2% por debajo de CC para un caudal de 2 l/h y una profundidad de 50 a 65 cm y el valor más alejado en el entorno de 14% por debajo de CC para 4 l/h a una profundidad de 20 a 35 cm. Comparando humedad de riego con respecto a humedad previa (humedad previa equivalente a 100%), para todos los caudales, hasta 65 cm de profundidad la humedad de riego supera a la humedad previa, siendo la diferencia mínima de un 4%. Entre 65 y 80 cm de profundidad la humedad de riego es entre 3 y 4% mayor que la humedad previa para 2 y 4 l/h. Para 8 l/h la humedad del riego está 1% por debajo de humedad previa (gráfico 4.3b)

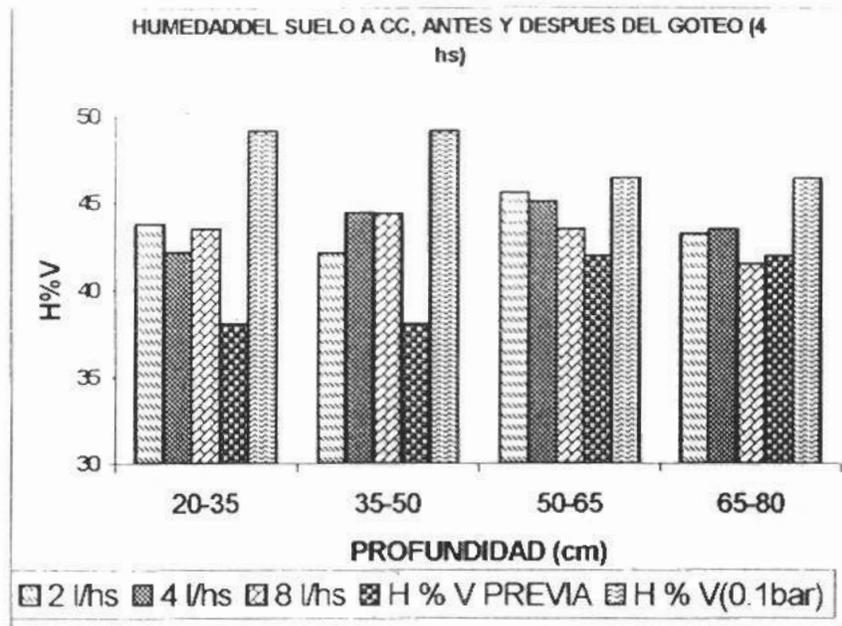


Gráfico 4.3b (17/04/97)

Con 6 horas de riego, para todos los caudales la humedad de riego es siempre menor a CC (humedad a CC equivalente a 100%), siendo el valor más cercano 2% por debajo de CC para 4 y 8 l/h entre los 50 y 65 cm de profundidad y el valor más alejado 16% por debajo para 4 l/h entre 20 y 35 cm. La humedad de riego siempre fue mayor a la humedad previa (humedad previa equivalente a 100%), siendo 2% mayor para 2 l/h de 50 a 80 cm y 21% mayor para 4 l/h de 35 a 50 cm. (gráfico 4.3c).

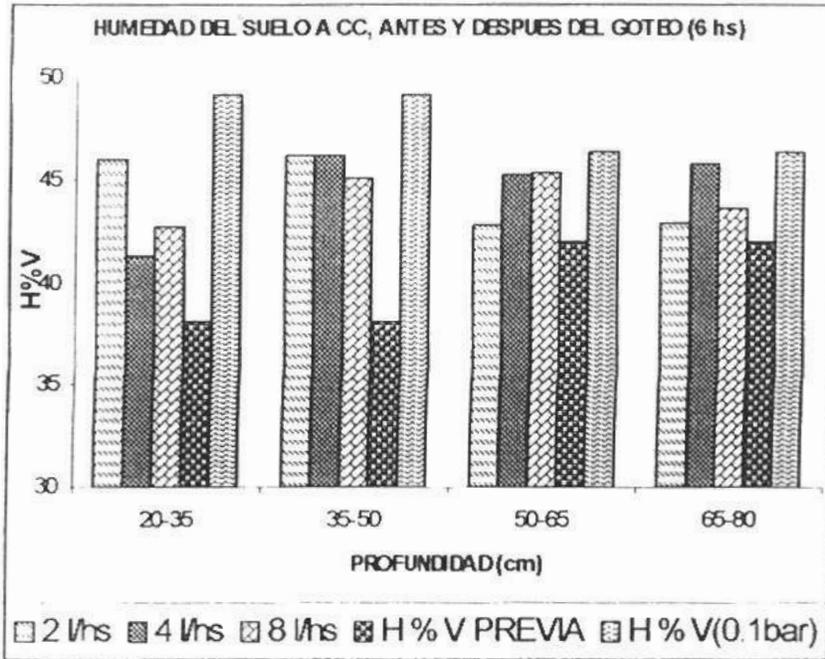


Gráfico 4.3c (17/04/97)

### 4.2.3 Ajuste de metodologías teóricas

#### 4.2.3.1 Ajuste de metodología propuesta por Goldberg,(1976)

Con respecto al área de mojado se intenta ajustar la fórmula empírica de Goldberg siendo  $D = a \cdot Q^{1/2} + b \cdot q \cdot Q^{1/2} + c = (a + bq)Q^{1/2} + c$  donde: D=diám. (cm), q= descarga en (l/h); Q= agua aplicada en (l). Los coeficientes a, b y c varían según el tipo de suelo.

Para un suelo medio los valores serían:

$$D = (0.11 \cdot q + 7.2) \cdot Q^{1/2} + 35 \quad r^2 = 86.2$$

y para un suelo pesado sería:

$$D = (0.21 \cdot q + 2.54) \cdot Q^{1/2} + 28.6 \quad r^2 = 80.6$$

En el cuadro 4.5 se muestran los resultados de diámetros calculados por la fórmula de Goldberg para suelo pesados, los cuales se comparan con los datos obtenidos a campo (cuadros 4.2a, b y c).

Cuadro 4.5 Diámetros obtenidos por fórmula de Goldberg

H	caudal (l/h)		
	2	4	8
2	34.52	38.16	45.48
4	36.97	42.12	52.47
6	38.85	45.16	57.84

El análisis comparativo se realiza tomando el diámetro medido a campo como porcentaje del diámetro obtenido por la fórmula. Dichos porcentajes no difieren estadísticamente ( $p \geq 0,20$ ) cuando se toman en cuenta los efectos caudal, tiempo de riego y las interacciones. Sí existe diferencia entre los porcentajes cuando se comparan las fechas ( $p=0,0017$ ).

#### 4.2.3.2 Ajuste de metodología propuesta por Schwartzman y Zur.

Para Schwartzman y Zur la distribución espacial del agua bajo un gotero tiene una forma que se asemeja a una elipse truncada. El volumen (V) de dicha elipse es el siguiente:

$$V = \pi \cdot a^2 / 3 \cdot [2 \cdot b + 3B - (B^3/b^2)]$$

Para este ensayo no se cuenta con los valores de los parámetros a (radio menor), b (radio mayor), B (distancia entre la sección y el radio menor) y P (profundidad máxima desde la sección), (figura 4.1).

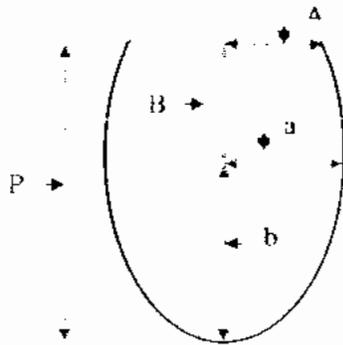


Figura 4.1: Esquema de una elipse truncada

Sabiendo que  $b = P - B$  y  $a = A \cdot (P - B) / [(P - B)^2 - B^2]^{1/2}$  sustituyendo en la fórmula se obtiene:

$$V = \pi \cdot A^2 / 3 \cdot (P^2 - 2 \cdot P \cdot B) \cdot [2 \cdot (P - B)^3 + 3 \cdot B \cdot (P - B)^2 - B^3]$$

A (radio de la sección = radio del área de mojado)

El volumen de suelo mojado en  $m^3$  es un dato estimable. A partir de la diferencia de los valores de H%V antes del riego y la medida de los valores de H%V a capacidad de campo (-0.1 bar), se obtiene H%V a agregar, que es igual a L de agua cada  $0.1 m^3$  de suelo (cuadros 4.6, 4.8 y 4.10).

Con la cantidad de agua total aplicada mojamos "x" volumen de suelo (cuadros 4.7, 4.9 y 4.11). Este último valor es el volumen (V) de la elipse truncada y a partir de éste se hallan los parámetros que faltan. Utilizando una planilla electrónica se planteó la ecuación de volumen de la elipse truncada con los siguientes parámetros: A, B, coef.  $\eta$  y P (Anexo, cuadros 5a, b, c; 6a, b, c y 7a, b, c).

$$P = \text{coef.}\eta * B$$

Siendo B la profundidad hasta donde el agua se mueve más en dirección horizontal, profundidad en la cual se encuentra el diámetro mayor horizontal de la elipse. Siendo dicha profundidad para los estudios de Schwartzman y Zur. (1986) de 20 cm.

El coeficiente  $\eta$  para formar una elipse debe ser mayor a 2. Teniendo fijo dicho coeficiente se varía la profundidad B, tomando como base el valor mencionado anteriormente. Como resultado los volúmenes que se obtienen son mucho mayores a los preestablecidos; para llegar a ese volumen, la profundidad B disminuye muy por debajo de la profundidad esperada para la cantidad de agua aplicada. Lo mismo sucede cuando el coef.  $\eta$  es igual a 4.

Variando el coef.  $\eta$ , entre 2.1 y 4, se encuentra un punto de inflexión en el valor  $\eta=3$ . Con este el volumen disminuye obteniéndose el valor establecido y el valor de profundidad B está más acorde a lo esperado.

Los resultados para el 11/03/97 donde la humedad inicial promedio del perfil es 37,2 H%V, cuando se riega 2 h, a un caudal de 2 l/h la profundidad máxima a la cual llega el agua es de 0,234 m (gráfico 4.4a). Teniendo en cuenta que la profundidad del horizonte A es de 0,28 m, todo el volumen de agua agregada se estaría ubicando dentro del mismo. Para la misma cantidad de horas de riego, con un caudal de 8 l/h se estaría llegando a los 0,459 m, mojando todo el horizonte A y los primeros 0,18 m del horizonte Bt1 (gráfico 4.4c).

Regando 6 h y con un caudal de 2 l/h, se estaría llegando a una profundidad de 0,45 m por lo que se estaría mojando hasta 0,17 m del horizonte Bt1 (gráfico 4.4g). Con la misma cantidad de horas de riego y con un caudal de 8 l/h se estaría mojando el horizonte A, Bt1 y Bt2 (gráfico 4.4i).

Para el 19/03/97 con una humedad inicial promedio de 30,77 H%V, para 2 h de riego y un caudal de 2 l/h la profundidad alcanzada sería de 0,18 m (gráfico 4.5a) y para 8 l/h sería de 0,504 m (gráfico 4.5c). Para 6 h de riego con un caudal de 2 l/h se llega a una profundidad de 0,3 m donde solo se estaría mojando el horizonte A (gráfico 4.5g) y para 8 l/h se llega a una profundidad de 0,66 m donde se estaría mojando todo el horizonte Bt1 los primeros 0,11 m del horizonte Bt2 (gráfico 4.5i).

El 16/04/97 donde la humedad inicial promedio es de 31,87 H%V, con 2 h de riego y un caudal de 2 l/h la profundidad a la cual se estaría llegando es de 0,168 m (gráfico 4.6a) y con 8 l/h se estaría llegando a una profundidad de 0,24 m (gráfico 4.6c), estando en ambos casos el volumen ubicado dentro del horizonte A. Para 6 h de riego y con un caudal de 2 l/h la profundidad a la que se llegaría es de 0,291 m donde la mayor parte del volumen se ubicaría dentro del horizonte A (gráfico 4.6g). Aplicando un caudal de 8 l/h la profundidad que se alcanzaría es de 0,519 m, en este caso se estaría mojando el horizonte Bt1 (gráfico 4.6i).

El 17/04/97 el agua de riego, como muestran los gráficos 4.3 a, b y c, es siempre mayor al agua previa hasta los 50 cm de profundidad. Comparando éstos datos con la profundidad de mojado que se obtiene con el modelo de la elipse truncada se observa que la profundidad del modelo es menor a 50 cm. Por ejemplo para el caudal de 8 l/h y 6 horas de riego, el modelo estima una profundidad máxima de mojado de 52 cm, siendo para el resto de los tratamientos menores a 40 cm.

Esta diferencia en las profundidades de mojado entre el modelo y las estimadas a campo puede deberse, a que el agua retenida a C.C a una tensión de  $-0.1$  bar obtenida con la olla de Richard, no sería el valor real, sino menor. De este modo la misma cantidad de agua agregada se ubicaría en un volumen menor de poros o sea se mojaría un mayor volumen de suelo, lo que explicaría la mayor profundidad alcanzada a campo que en el modelo.

Por lo tanto con estos resultados no se puede decir que el modelo de la elipse truncada se ajuste o no a los datos de campo

Cuadro 4.6 Agua a agregar para llegar a CC (11-03-97)

HORIZONTE	prom.H%p	D <sub>Ap</sub>	H%V	H%V(0,1bar)	H%V a agregar
A	18.38	1.42	26.06	40.46	14.40
B	26.57	1.51	40.02	47.80	7.78
C	29.35	1.55	45.60	42.76	-2.84
<b>TOT. H%V</b>					<b>19.34</b>

Cuadro 4.7 Volumen de suelo mojado en m<sup>3</sup> (11-03-97)

Caudal l/h	H <sub>2</sub> O a agreg. V/100dm <sup>3</sup> suel.	2h. H <sub>2</sub> O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )	4 h. H <sub>2</sub> O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )	6h. H <sub>2</sub> O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )
2	19.34	4	<b>0.021</b>	8	<b>0.041</b>	12	<b>0.062</b>
4	19.34	8	<b>0.041</b>	16	<b>0.083</b>	24	<b>0.124</b>
8	19.34	16	<b>0.083</b>	32	<b>0.165</b>	48	<b>0.248</b>

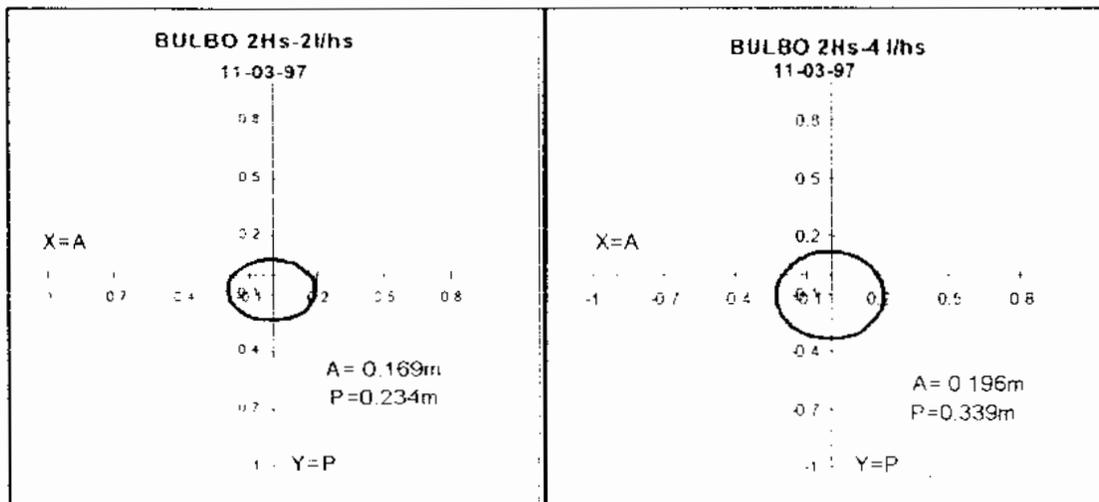


Gráfico 4.4a. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.4b. Forma del bulbo de mojado

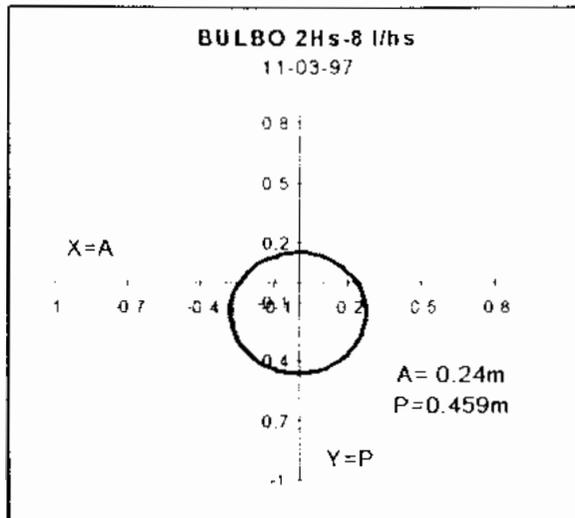


Gráfico 4.4c. Forma del bulbo de mojado

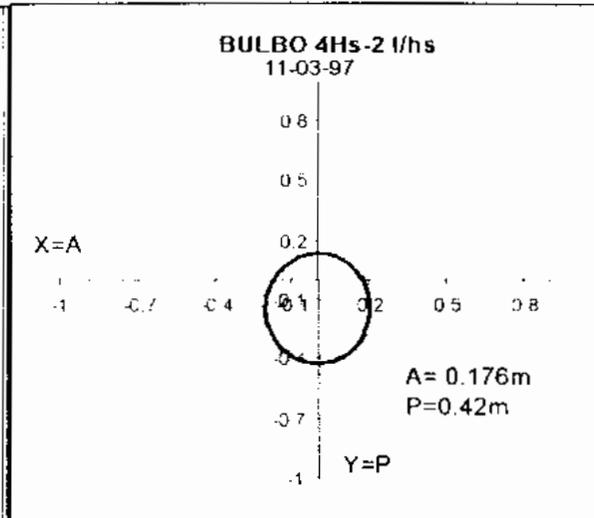


Gráfico 4.4d. Forma del bulbo de mojado

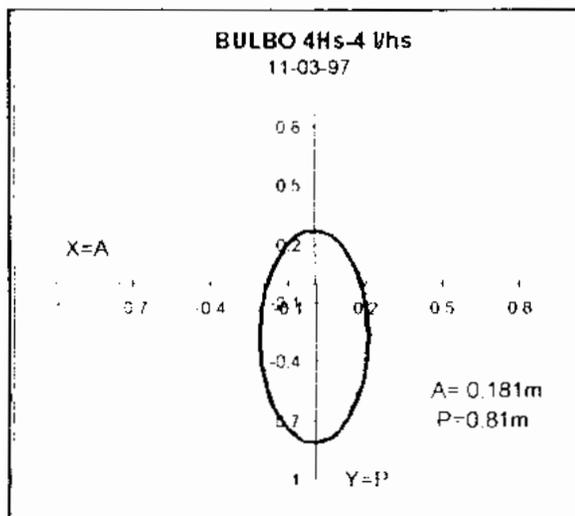


Gráfico 4.4e. Forma del bulbo de mojado

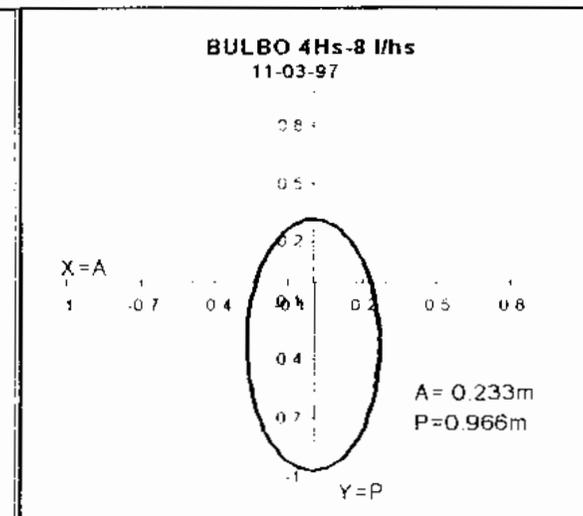


Gráfico 4.4f. Forma del bulbo de mojado

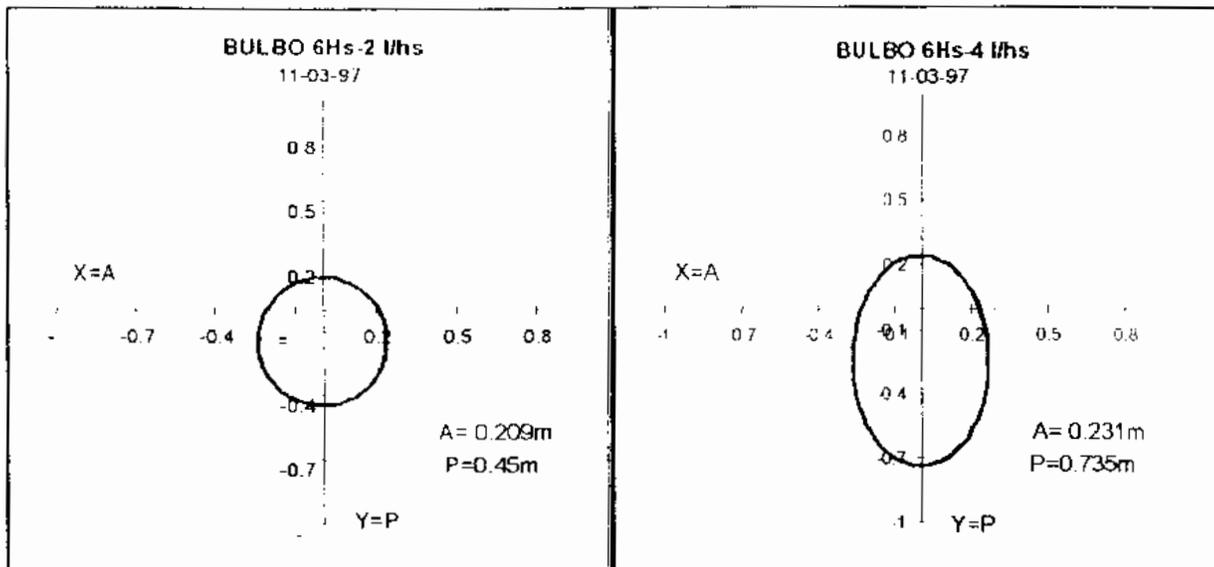


Gráfico 4.4g. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.4h. Forma del bulbo de mojado

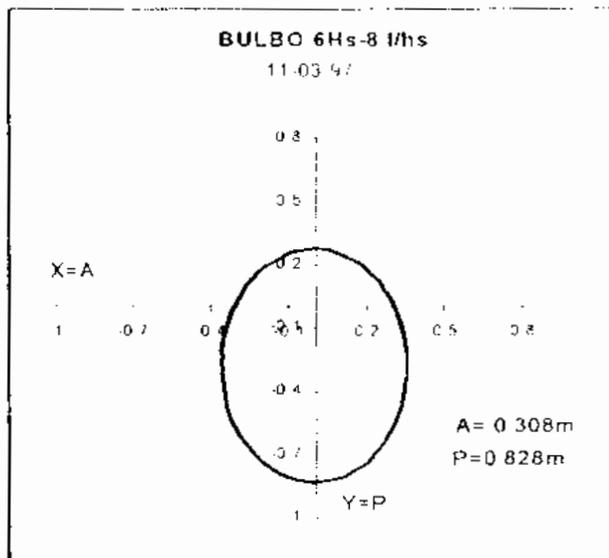


Gráfico 4.4i. Forma del bulbo de mojado

Cuadro 4.8 Agua a agregar para llegar a CC (19-03-97)

HORIZONTE	prom.H%p	D <sub>Ap</sub>	H%V	H%V(0,1bar)	H%V a agregar
A	11.77	1.42	16.69	40.46	23.77
B	24.71	1.51	37.22	47.80	10.58
C	24.73	1.55	38.42	42.76	4.34
<b>TOT. H%V</b>					<b>38.69</b>

Cuadro 4.9 Volumen de suelo mojado en m<sup>3</sup> (19-03-97)

Caudal l/h	H <sub>2</sub> O a agreg. l/100dm <sup>3</sup> suel.	2h. H <sub>2</sub> O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )	4h. H <sub>2</sub> O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )	6h. H <sub>2</sub> O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )
2	38.69	4	<b>0.010</b>	8	<b>0.021</b>	12	<b>0.031</b>
4	38.69	8	<b>0.021</b>	16	<b>0.041</b>	24	<b>0.062</b>
8	38.69	16	<b>0.041</b>	32	<b>0.083</b>	48	<b>0.124</b>

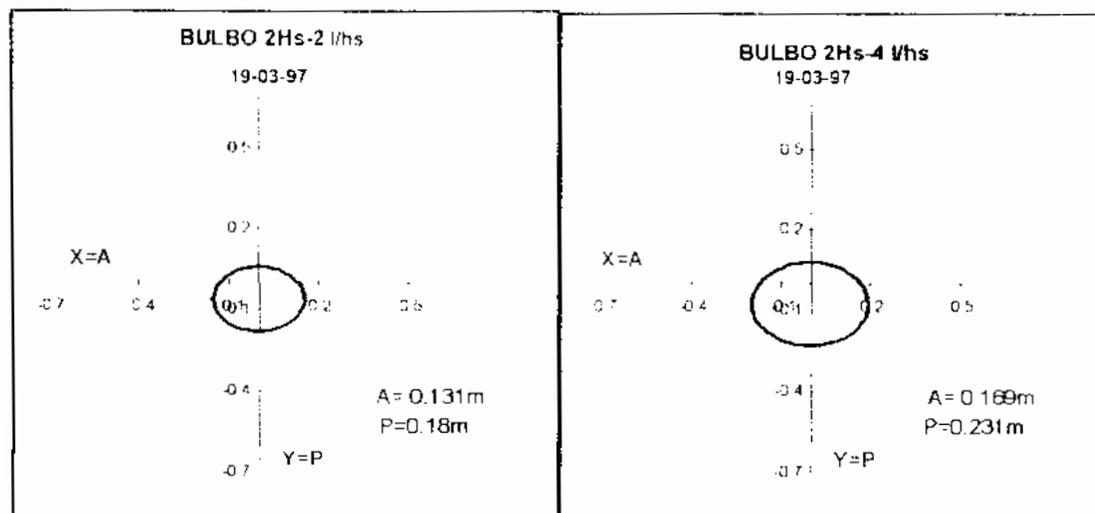


Gráfico 4.5a. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.5b. Forma del bulbo de mojado

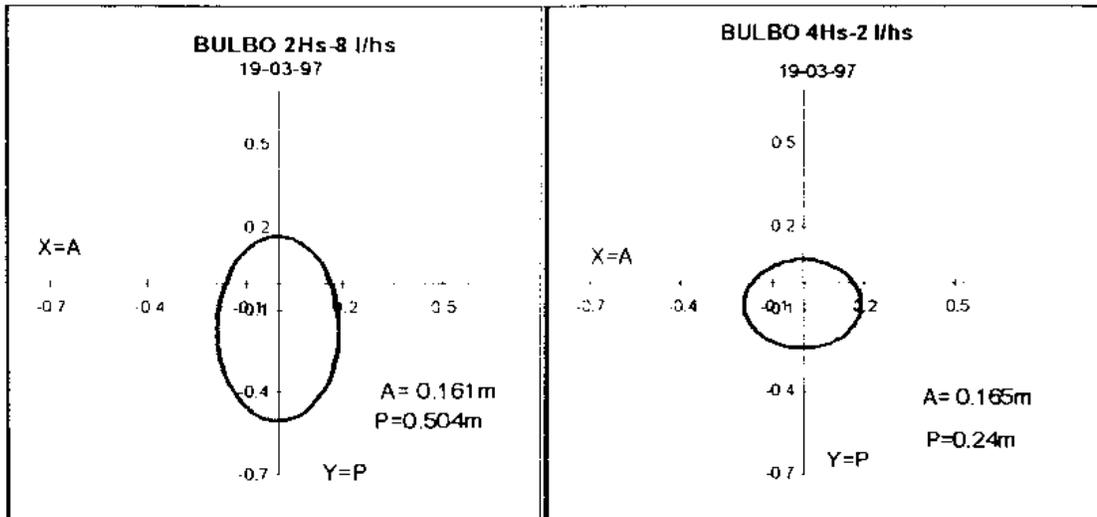


Gráfico 4.5c. Forma del bulbo de mojado      Gráfico 4.5d. Forma del bulbo de mojado

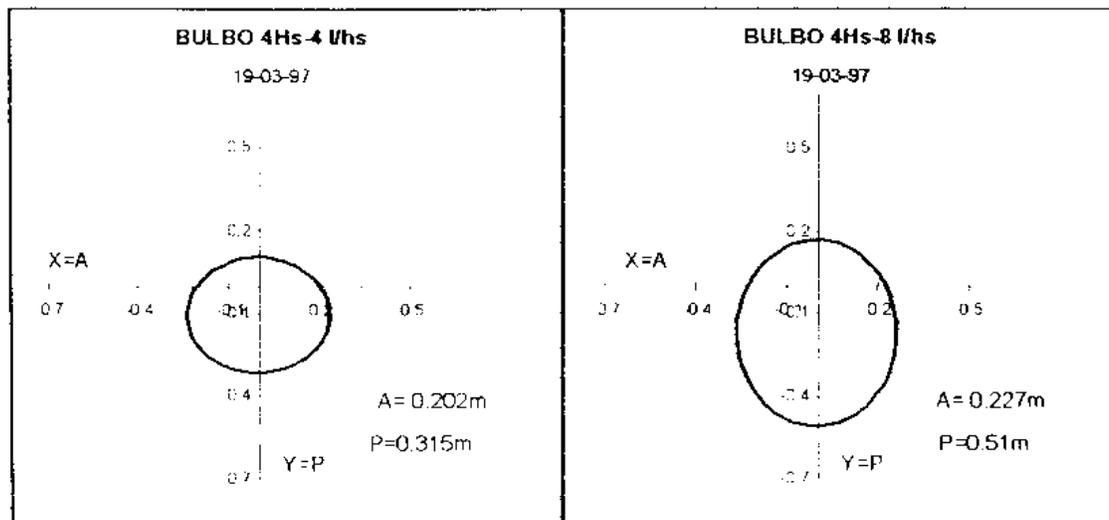


Gráfico 4.5e. Forma del bulbo de mojado      Gráfico 4.5f. Forma del bulbo de mojado

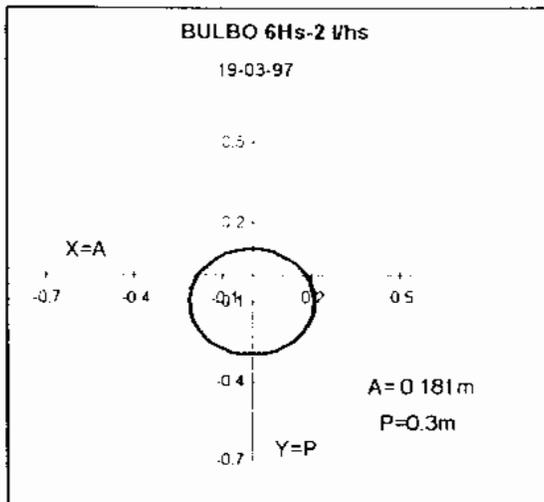


Gráfico 4.5g. Forma del bulbo de mojado

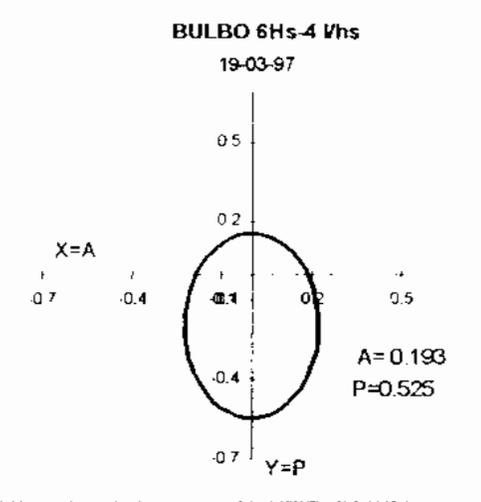


Gráfico 4.5h. Forma del bulbo de mojado

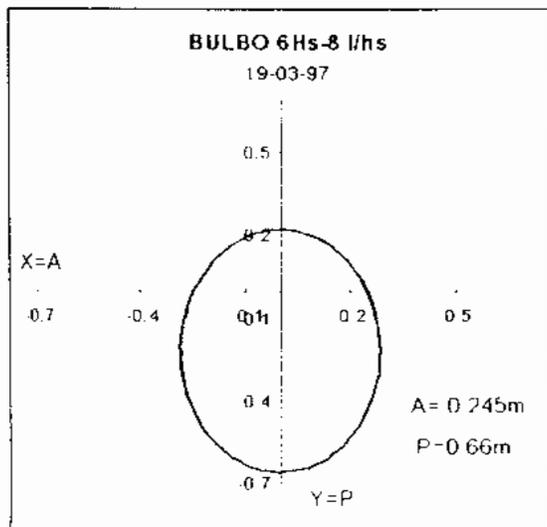


Gráfico 4.5i. Forma del bulbo de mojado

Cuadro 4.10. Agua a agregar para llegar a CC (16-04-97)

HORIZONTE	prom. H%p	DAP	H%V	H%V(0,1bar)	H%V a agregar
A	10.24	1.42	14.52	40.46	25.94
B	25.37	1.51	38.22	47.80	9.59
C	27.6	1.55	42.88	42.76	-0.12
<b>TOT. H%V</b>					<b>35.41</b>

Cuadro 4.11. Volumen de suelo mojado en m<sup>3</sup> (16-04-97)

Caudal l/h	H2O a agreg. l/100dm <sup>3</sup> suel.	2h. H2O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )	4h. H2O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )	6h. H2O agregada (l)	Vol. de suelo mojado (m <sup>3</sup> )
2	35.41	4	<b>0.011</b>	8	<b>0.023</b>	12	<b>0.034</b>
4	35.41	8	<b>0.023</b>	16	<b>0.045</b>	24	<b>0.068</b>
8	35.41	16	<b>0.045</b>	32	<b>0.090</b>	48	<b>0.136</b>

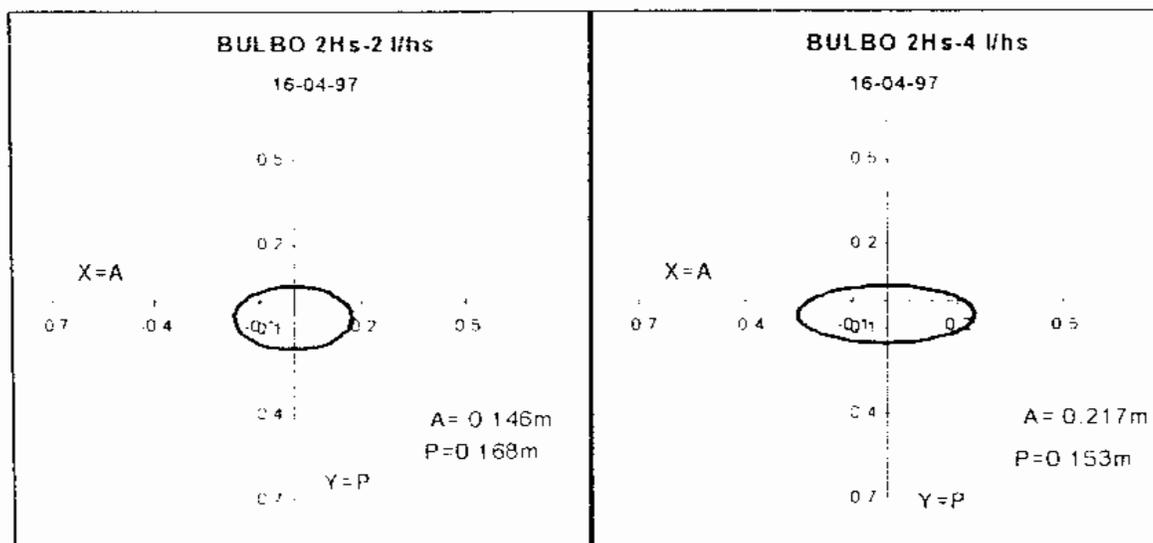


Gráfico 4.6a. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.6b. Forma del bulbo de mojado

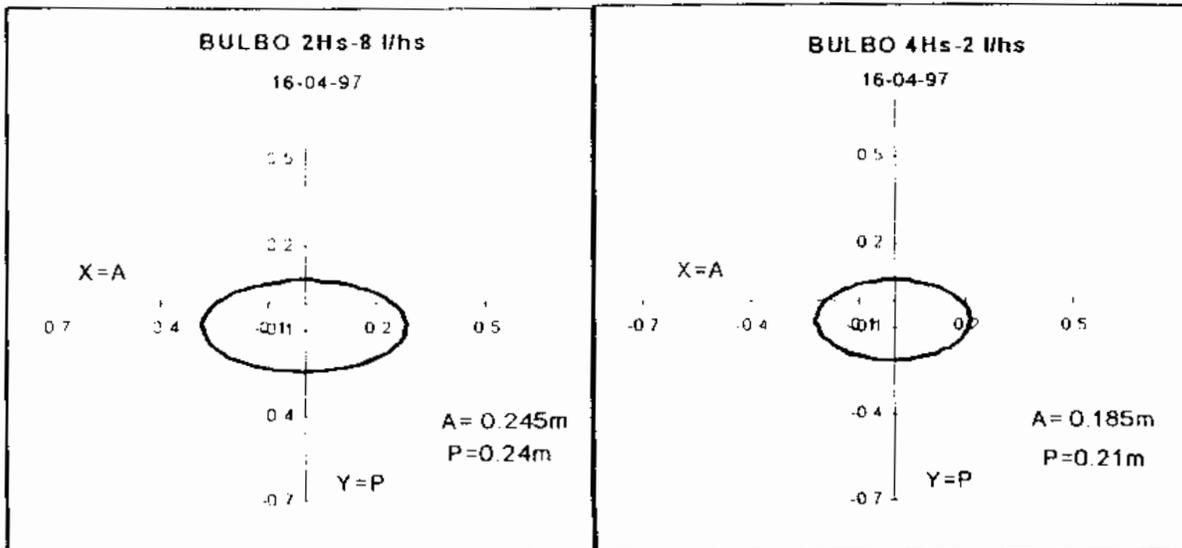


Gráfico 4.6c. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.6d. Forma del bulbo de mojado

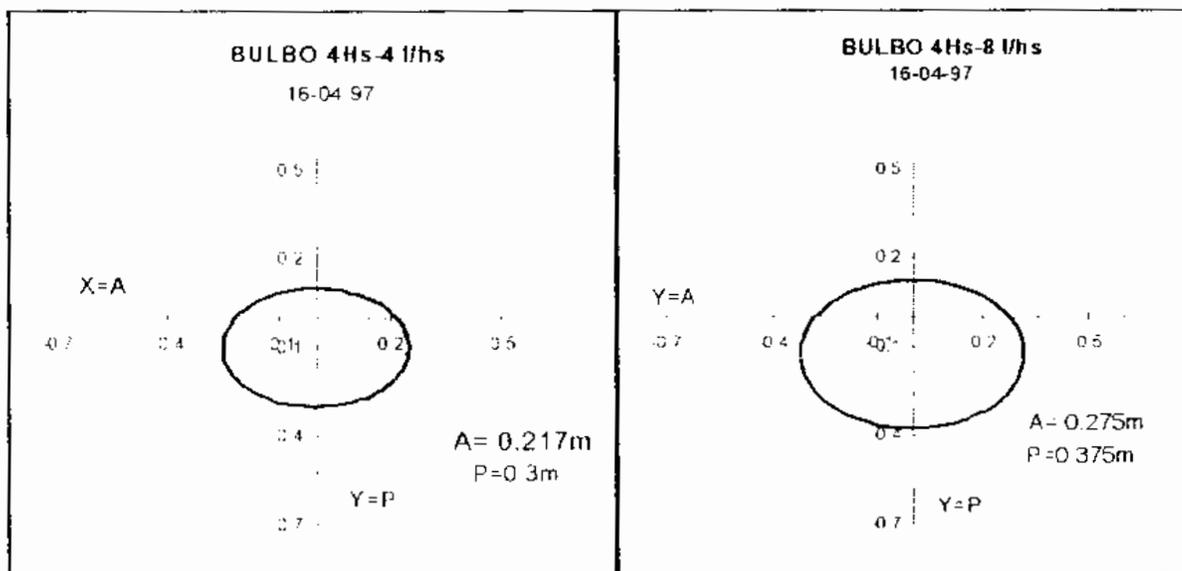


Gráfico 4.6e. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.6f. Forma del bulbo de mojado

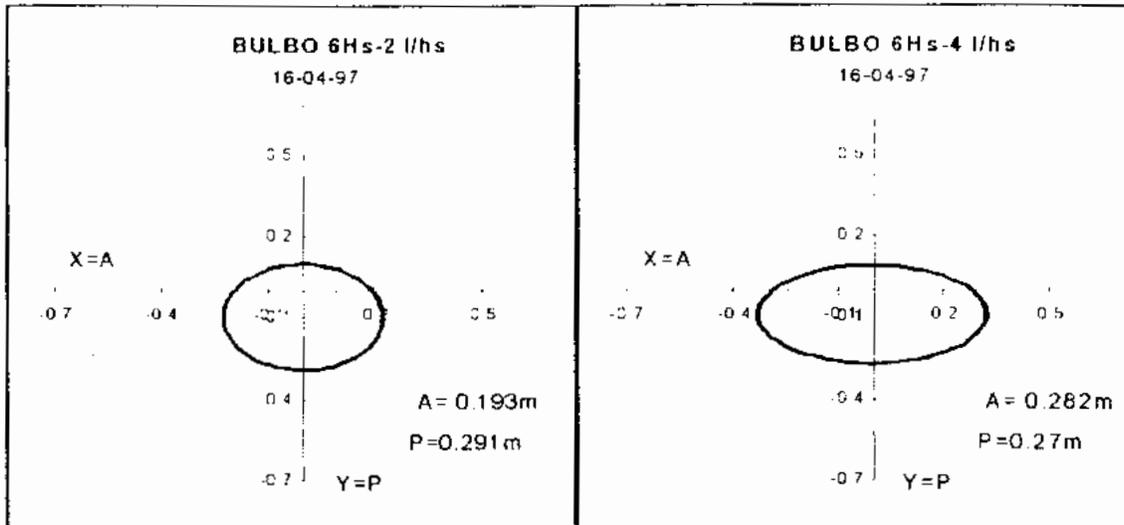


Gráfico 4.6g. Forma del bulbo de mojado

Gráfico 4.6h. Forma del bulbo de mojado

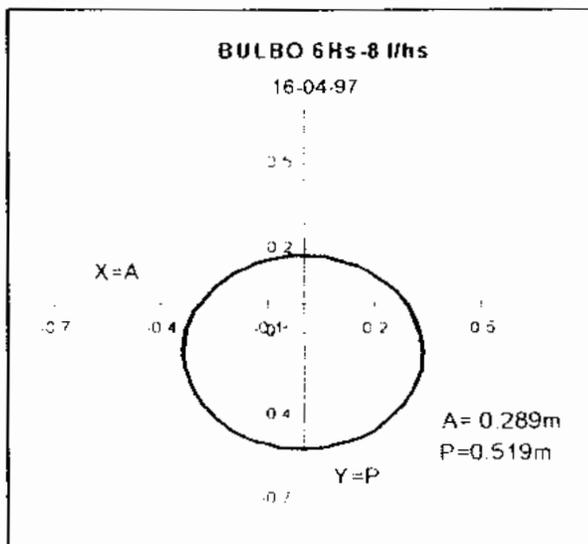


Gráfico 4.6i. Forma del bulbo de mojado

## 5. CONCLUSIONES

Frente a los problemas metodológicos enfrentados durante el periodo experimental, más que conclusiones se darán a continuación recomendaciones que podrían aplicarse en próximos ensayos con el objetivo de profundizar en el tema.

Los resultados del ensayo a campo muestran que al aumentar el caudal y tiempo de riego el diámetro del área de mojado es mayor.

La ecuación de regresión, resultado de los diámetros estimados a campo, muestra una buena respuesta con caudal y tiempo de riego, no así cuando se le agrega el factor "fecha".

La fórmula de Goldberg,(1976) para el cálculo del diámetro del área de mojado en función del caudal y cantidad de agua aplicada ajusta con los datos obtenidos a campo dentro de cada fecha de riego(ensayo), no entre ellas.

Los diámetros no deberían medirse solo cuando se corta el riego para cada tratamiento individualmente, sino también en el resto de los tratamientos. De esta manera se obtendría una evolución del diámetro de mojado para los diferentes caudales al finalizar el ensayo, además de obtener un mayor número de datos que disminuirían el error experimental.

Las diferentes metodología utilizadas para medir la profundidad de mojado presentaron inconvenientes como ser:

1. Usando las agujas, la resistencia a la penetración que se encontraba al clavarlas en el suelo húmedo, no permitía diferenciar si se trataba del horizonte Bt o del pasaje de húmedo a seco.

2. Con el taladro de mecha sacando muestra de suelo a diferentes profundidades y determinando la humedad al tacto para diferenciar el pasaje de suelo húmedo a seco no se la logró percibir claramente.

3. Con el análisis gravimétrico se obtuvieron datos cuantitativos de la humedad presentes en los diferentes horizontes. Sin embargo, no se logró determinar la profundidad máxima a la cual llegó el agua en los diferentes tratamientos.

Una alternativa para medir la profundidad del frente de mojado sería usar un penetrógrafo el cual permitiría determinar la misma en forma cuantitativa y práctica.

La cantidad de agua retenida a CC a una tensión de  $-0.1$  bar obtenida con la olla de Richard, no sería el valor a la cual estaría retenida a campo, sino menor. De este modo la misma cantidad de agua agregada se ubicaría en un volumen menor de poros o sea se mojaría un mayor volumen de suelo.

Para obtener las dimensiones del bulbo se recomienda usar otras metodología como ser sonda de neutrones, tensiómetros o abrir una calicata bajo cada gotero.

## 6. RESUMEN

El riego por goteo es una técnica por medio de la cual el agua se pone a disposición directa de la zona radicular. Por tal motivo este sistema permite mantener un adecuado nivel de humedad para la planta, haciendo un uso más eficiente del agua.

Por décadas numerosos autores han estudiado el movimiento del agua y han tratado de explicarlo por medio de modelos matemáticos(Omary,1992). El inconveniente de estos modelos es el alto número de datos que requiere y por lo tanto lo poco práctico de los mismos para el diseño.

La forma del bulbo de mojado bajo un gotero toma mayor importancia que el diámetro superficial cuando se trata de suelos estratificados con la presencia de un horizonte Bt subsuperficial, debido al mayor desplazamiento horizontal que vertical.

Se trató de buscar un método de análisis de campo que permitiera determinar de manera práctica la forma del bulbo de mojado bajo un gotero.

El ensayo consistió en regar durante 2,4,6 horas con 2,4 y 8 l/h, tomando las medidas inmediatamente de cortado el riego y a las 24 horas.

Se midió el diámetro de mojado inmediatamente de cortado el riego y se comparo con los diámetros obtenidos por la fórmula de Goldberg,(1978) y los obtenidos por la ecuación de regresión, no habiendo diferencia significativa al 1% en ambos, no así cuando se le agrega el factor "fecha".

Para medir la profundidad de mojado se probaron diferentes metodologías; resistencia a la penetración usando agujas, diferenciación de humedo-seco al tacto y metodología gravimétrica. Solamente con este último método se lograron datos más claros con respecto a la profundidad de mojado, aunque no se pudieron determinar las profundidades máximas a las que llegó el agua.

La profundidad obtenida con el modelo de la Elipse Truncada de Schwartzman y Zur, (1986) fue menor que la profundidad medida a campo. Esta diferencia entre las profundidades, entre otros, puede deberse a que el valor de capacidad de campo utilizado no sería  $-0.1$  bar, sino menor, lo que estaría aumentando el volumen de suelo mojado.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. BEN-ASHER, J.; CHARACH, CH.; ZEMEL, A. 1986. Infiltration and water extraction from trickle irrigation source: The effective hemisphere model. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 882-887.
  2. BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F.S.; WARRICK, A. W. (1982). Principles of trickle (drip) irrigation. In Advances in Irrigation. D. Hillel ed. United States of America. Academic Press, Inc. pp 219-290.
  3. CLOTHIER, B.; SCOTER, D.; HARPER, E. 1985. Three-dimensional Infiltration and trickle irrigation. American Society of Agricultural Engineers. 28(2): 497-501.
  4. DI LORENZI BRUZZONE, G.; LLANES LEITES, W. 1995. Riego por goteo: Incidencia de la diferenciación textural en los patrones de mojado. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Facultad de Agronomía.95p.
  5. DURAN, A. 1985. Los suelos del Uruguay; Montevideo, Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur S.R.L. 398p.
- FAO. 1974. Riego por Goteo. Roma, 160p. ( Estudio sobre Riego y Avenamiento nº 14).

7. GOLDBERG, D.; GORNAT, B.; RIMON, D. 1976. Water movement and distribution in drip irrigated soils. In Principles, Design and Agricultural Practices. K. Shmaryahu ed. Israel, Drip irrigation scientific publications. pp 93-119.
8. HELALIA, A. M, 1993. The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils. *Agricultural Water Management*. 24(1): 39-47.
9. HOFSTADTER, R.; DURAN, P.; REBOSIO, A.; ROMERO, M.G.; GARCIA, M.; BACCINO, G. 1994. Manual de practicas del curso. Montevideo, Facultad de Agronomía. 130p.
10. HOFSTADTER, R.; DURAN, P.; ROMERO, M.G.; GARCÍA, M.; BACCINO, G. 1993. Curso de riego y drenaje: Guías de clase. Montevideo, Facultad de Agronomía. 144p.
11. HOWELL, T. A.; STEVENSON, D. S.; ALJIBURI, F. K.; GITLIN, H. M.; WU, Y. P.; WARRICK, A. W.; RAATS, P. A. C. 1980. Trickle (drip) irrigation. In Design and operation of farm irrigation system. M. E. Jensen de. Published by American Society of Agricultural Engineers. pp 679-685.
12. JURY, W. A.; EARL, K. D. 1977. Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: I. Analysis of bare soil experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 852-856.

13. \_\_\_\_\_. 1977. Water movement in bare and cropped soil under isolated trickle emitters: II. Analysis of cropped soil experiment. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41: 856-861.
14. LAFOLIE, F.; GUENNELON, R.; Th. van GENUCHTEN, M. 1989. Analysis of water under trickle irrigation: I. Theory and numerical solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1310-1318.
15. \_\_\_\_\_. 1989. Analysis of water under trickle irrigation: II. Experimental evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1318-1323.
16. LEDESMA, L. D.; MARTÍNEZ, E. R. 1996. Modelos para presentar patrones de humedecimiento aplicando riego por goteo. *Intalerta - Riego y Drenaje.* 5(3): 3.117-3.123.
17. MICHELAKIS, N.; VOUGIOUCALOU, E.; CLAPAKI, G. 1993. Water use, wetted soil volume, root distribution and yield of avocado under drip irrigation. *Agricultural Water Management.* 24(2): 119-131.
18. NEGUEROLES, J.; URIU, K. (1974). Riego por goteo; Tipo de instalaciones y técnicas utilizadas en su diseño. 2ª ed. Madrid. Editorial Agrícola Española, S.A. 38p.
19. OMARY, M.; LIGON, J. T. 1992. Three-dimensional movement of water and pesticide from trickle irrigation: finite element model. *American Society of Agricultural Engineers.* 35(3): 811-821.

20. RISSE, L. M.; CHESNESS, J. L. 1989. A simplified design procedure to determine the wetted radius for trickle emitter. American Society of Agricultural Engineers. 32(6):1909-1913.
21. ROLSTON, D.E.; BIGGAR, J.W.; NIGHTINGALE, H.Y. 1991. Temporal persistence of spatial soil-water patterns under trickle irrigation. Irrigation Science. 12 (4): 181-186.
22. SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. 1986. Wetted soil volumen as a design objective in trickle irrigation. Irrigation Science. 16(3): 101-105.
23. DURAN, A.; SILVA, A.; PONCE DE LEON, J.; GARCÍA, F. 1988. Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Montevideo, Facultad de Agronomía. Boletín de investigación nº 10. 20p

## 9. ANEXO

Figura 1. DISPOSICIÓN DEL DISPOSITIVO DE GOTEO EN LA PARCELA

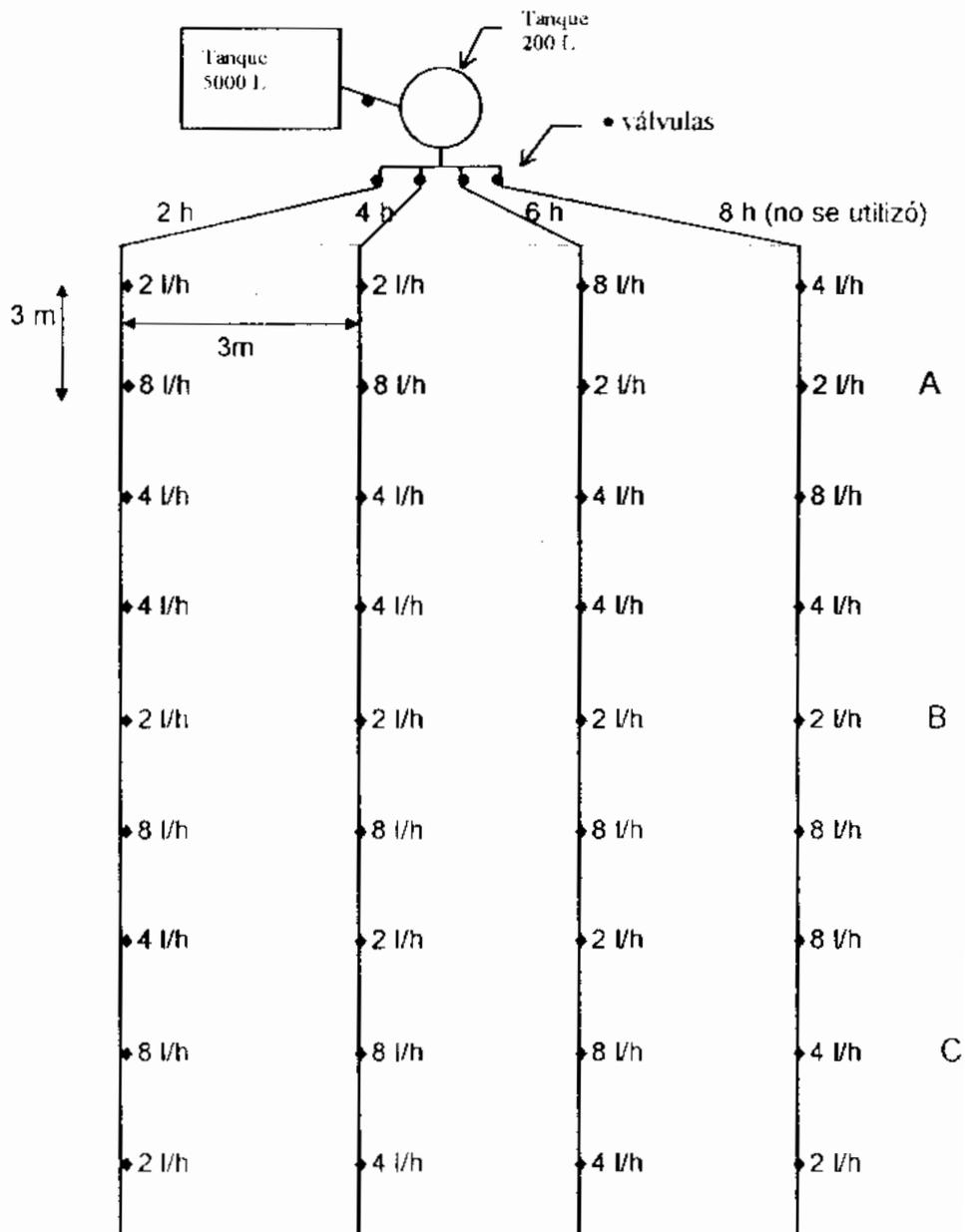
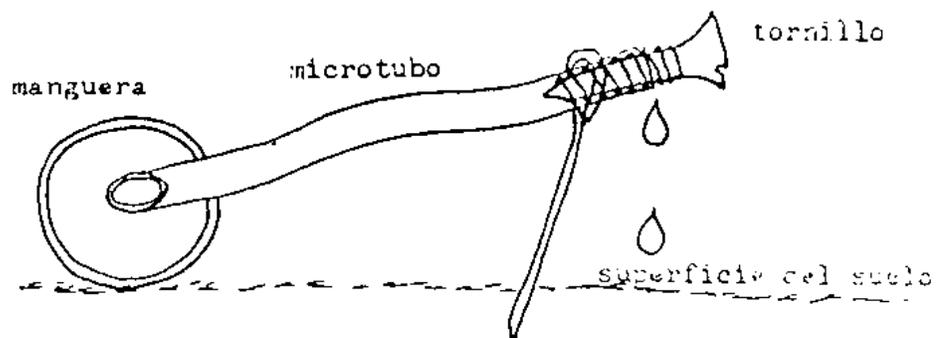


Figura 2: Sistema de goteo Access Frames LTD. ( citado por F.A.O)



Cuadro 1. Promedio de dos diámetros perpendiculares para cada gotero.

Cuadro 1a.

11/03/97	2 horas Caudal l/h			4 horas Caudal l/h			6 horas Caudal l/h		
	2	4	8	2	4	8	2	4	8
A	37.5	43	42.5	33.5	37.5	40	47.5	40	67.5
B	35	40	50	43.5	30	45	37.5	44	55
C	29	34.5	51.5	28.5	41	55	40.5	55	62.5

Cuadro 1b.

19/03/97	2 horas Caudal l/h			4 horas Caudal l/h			6 horas Caudal l/h		
	2	4	8	2	4	8	2	4	8
A	26	42.5	39	43	43.5	41.5	37	30.5	54.5
B	29	30	50	32.5	44	46	37	45	45
C	24	29	40	23	34	49	35	40.5	47.5

Cuadro 1c.

16/04/97	2 horas Caudal l/h			4 horas Caudal l/h			6 horas Caudal l/h		
	2	4	8	2	4	8	2	4	8
A	33	40	44.5	36.5	44	64	35	69.5	65
B	27.5	47	50	45	41.5	61.5	43	53.5	65.5
C	27.5	43.5	52.5	30	45	40	38	46.5	43

Gráfico 1: Coeficiente de determinación entre diámetros medidos a campo y estimados por la ecuación de regresión.

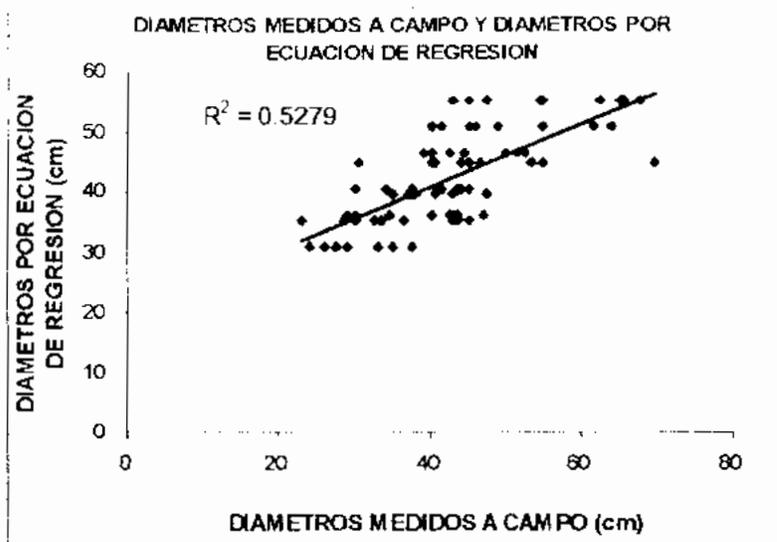
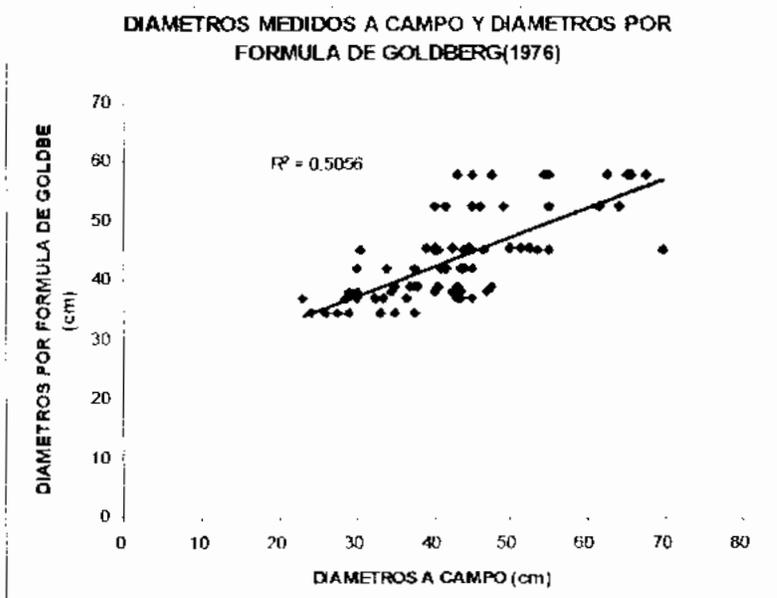


Gráfico 2: Coeficiente de determinación entre diámetros medidos a campo y estimados por la ecuación de Goldberg, 1976.



Cuadro 2. Humedad (H%V) del Suelo previo al Riego

HORIZONTE	11/03/97 H%V	19/03/97 H%V	16/04/97 H%V
A	27.29	27.04	13.71
B	46.27	35.93	15.15
C	44.80	39.72	43.75
A	27.26	13.09	14.90
B	39.19	37.91	44.22
C	40.60	42.55	43.90
A	26.27	12.33	15.11
B	38.58		41.96
C	52.33		42.56
A	28.58	14.43	17.49
B	46.29	42.32	39.61
C	47.01	40.96	44.56
A	26.12	20.18	13.51
B	40.75	39.07	34.37
C	45.18	38.46	44.09
A	25.27	15.61	14.08
B	38.39	34.17	39.30
C	43.46		39.53
A	24.78	19.67	
B	38.85	33.62	36.11
C	46.22	34.49	41.81
A	27.63	14.18	15.10
B	32.62	37.90	32.63
C	44.31	33.88	42.03
PROMEDIO			
A	26.65	17.07	14.84
B	40.12	37.31	38.31
C	45.49	38.33	42.78

Cuadro 3. Humedad del suelo (H%V) a CC, antes y después del riego para las diferentes profundidades.

Cuadro 3a

20/03/97	2 HORAS DE RIEGO		
	Profundidad (cm)		
Caudal	20-35	35-50	50-70
2 l/s	35.51	37.83	33.73
4 l/h	30.84	38.75	37.58
8 l/h	40.42	40.61	41.52
H % V PREVIA	37.07	37.07	37.59
H % V(0.1bar)	49.16	49.16	46.44

Cuadro 3b

20/03/97	4 HORAS DE RIEGO		
	Profundidad (cm)		
Caudal	20-35	35-50	50-70
2 l/h	41.76	46.16	50.13
4 l/h	47.07	45.22	34.11
8 l/h	43.68	42.66	41.29
H % V PREVIA	37.07	37.07	37.59
H % V(0.1bar)	49.16	49.16	46.44

Cuadro 3c

20/03/97	6 HORAS DE RIEGO		
	Profundidad (cm)		
Caudal	20-35	35-50	50-70
2 l/h	74.14	40.40	40.30
4 l/h	85.20	33.03	42.50
8 l/h	44.55	49.35	42.70
H % V PREVIA	37.07	37.07	37.59
H % V(0.1bar)	49.16	49.16	46.44

Cuadro 4. Humedad del suelo (H%V) a CC, antes y después del riego para las diferentes profundidades.

Cuadro 4a

17/04/97	2 HORAS DE RIEGO			
	Profundidad (cm)			
Caudal	20-35	35-50	50-65	65-80
2 l/h	40.81	45.31	43.94	41.51
4 l/h	44.17	47.96	42.35	46.77
8 l/h	41.12	43.63	46.86	45.58
H % V PREVIA	38.06	38.06	41.95	41.95
H % V(0.1bar)	49.16	49.16	46.44	46.44

Cuadro 4b

17/04/97	4 HORAS DE RIEGO			
	Profundidad (cm)			
Caudal	20-35	35-50	50-65	65-80
2 l/h	43.77	42.11	45.57	43.21
4 l/h	42.16	44.42	45.10	43.49
8 l/h	43.52	44.40	43.52	41.50
H % V PREVIA	38.06	38.06	41.95	41.95
H % V(0.1bar)	49.16	49.16	46.44	46.44

Cuadro 4c

17/04/97	6 HORAS DE RIEGO			
	Profundidad (cm)			
Caudal	20-35	35-50	50-65	65-80
2 l/h	46.02	46.22	42.80	42.95
4 l/h	41.30	46.24	45.30	45.80
8 l/h	42.67	45.10	45.38	43.68
H % V PREVIA	38.06	38.06	41.95	41.95
H % V(0.1bar)	49.16	49.16	46.44	46.44

Cálculo de volumen de suelo a mojar para los diferentes caudales y tiempo de riego.

$$H\%P = (\text{peso de H}_2\text{O} / \text{peso suelo seco}) * 100$$
$$Da = \text{peso suelo seco (g)} / \text{Vol. de suelo (cm}^3\text{)}$$

El volumen de suelo para hallar la densidad aparente es el volumen del cilindro de muestreo igual a 67.1 cm<sup>3</sup>.

$$H\%V = H\%P * Da$$

El H%V a agregar es la diferencia entre el H%V a capacidad de campo (0.1 bar) y la H%V antes del riego.

Ejemplo

Para 2 h de riego y un caudal de 2 l/h (11/03/97).

Como H%v es mm de H<sub>2</sub>O cada 10 cm de profundidad de suelo ó L de H<sub>2</sub>O en 0.1m<sup>3</sup> de suelo, entonces:

$$\begin{array}{l} 19.34 \text{ L a agregar} \text{-----} 0.1\text{m}^3 \\ 4 \text{ L} \text{-----} x \\ x = (4 * 0.1) / 19.34 = 0.021\text{m}^3 \text{ de suelo mojado} \end{array}$$

Cuadro 5. Dimensiones de las elipses

Cuadro 5a. 2 h de riego (11-03-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef. $\eta$	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m <sup>3</sup> )
2	0.169	3	0.078	0.234	0.195	0.156	<b>0.021</b>
4	0.196	3	0.113	0.339	0.226	0.226	<b>0.041</b>
8	0.24	3	0.153	0.459	0.277	0.306	<b>0.083</b>

Cuadro 5b. 4 h de riego (11-03-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef. $\eta$	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m <sup>3</sup> )
2	0.176	3	0.14	0.42	0.203	0.28	<b>0.041</b>
4	0.181	3	0.27	0.81	0.209	0.54	<b>0.083</b>
8	0.2335	3	0.322	0.966	0.270	0.644	<b>0.165</b>

Cuadro 5c. 6 h de riego (11-03-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef. $\eta$	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m <sup>3</sup> )
2	0.209	3	0.15	0.45	0.241	0.3	<b>0.062</b>
4	0.2315	3	0.245	0.735	0.267	0.49	<b>0.124</b>
8	0.3085	3	0.276	0.828	0.356	0.552	<b>0.248</b>

Cuadro 6. Dimensiones de las elipses

Cuadro 6a. 2 h de riego (19-03-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef.	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m3)
2	0.1315	3	0.06	0.18	0.152	0.12	<b>0.010</b>
4	0.169	3	0.077	0.231	0.195	0.154	<b>0.021</b>
8	0.1615	3	0.168	0.504	0.186	0.336	<b>0.041</b>

Cuadro 6b. 4 h de riego (19-03-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef.	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m3)
2	0.165	3	0.08	0.24	0.191	0.16	<b>0.021</b>
4	0.2025	3	0.105	0.315	0.234	0.21	<b>0.041</b>
8	0.2275	3	0.17	0.51	0.263	0.34	<b>0.083</b>

Cuadro 6c. 6 h de riego (19-03-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef.	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m3)
2	0.1815	3	0.1	0.3	0.210	0.2	<b>0.031</b>
4	0.1935	3	0.175	0.525	0.223	0.35	<b>0.062</b>
8	0.245	3	0.22	0.66	0.283	0.44	<b>0.124</b>

Cuadro 7. Dimensiones de las elipses

Cuadro 7a. 2 hde riego (16-04-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef.	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m3)
2	0.1466	3	0.056	0.168	0.169	0.112	<b>0.011</b>
4	0.2175	3	0.051	0.153	0.251	0.102	<b>0.023</b>
8	0.245	3	0.08	0.24	0.283	0.16	<b>0.045</b>

Cuadro 7b. 4 h de riego (16-04-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef.	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m3)
2	0.1858	3	0.07	0.21	0.215	0.14	<b>0.023</b>
4	0.2175	3	0.1	0.3	0.251	0.2	<b>0.045</b>
8	0.2757	3	0.125	0.375	0.318	0.25	<b>0.090</b>

Cuadro 7c. 6 h de riego (16-04-97)

Caudal(l/h)	A(m)	coef.	B(m)	P	a(m)	b(m)	Vol(m3)
2	0.1933	3	0.097	0.291	0.223	0.194	<b>0.034</b>
4	0.2825	3	0.09	0.27	0.326	0.18	<b>0.068</b>
8	0.289	3	0.173	0.519	0.334	0.346	<b>0.136</b>

Análisis Estadístico de los diámetros obtenidos en el ensayo

General Linear Models Procedure

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
HOR	3	2 4 6
CAU	3	2 4 8
FEC	3	10.24 11.76 18.38

Dependent Variable: A

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	44	6848.333333	155.643939	3.37	0.0002
Error	36	1664.222222	46.228395		
Corrected Total	80	8512.555556			

R-Square 0.804498 C.V. 16.02592 Root MSE 6.799147 A Mean 42.42593

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
BLO(HOR*FEC)	18	846.777778	47.043210	1.02	0.4649
HOR	2	1131.018519	565.509259	12.23	0.0001
CAU	2	3478.740741	1739.370370	37.63	0.0001
HOR*CAU	4	47.740741	11.935185	0.26	0.9027
FEC	2	721.462963	360.731481	7.80	0.0015
HOR*FEC	4	209.629630	52.407407	1.13	0.3562
CAU*FEC	4	221.796296	55.449074	1.20	0.3279
HOR*CAU*FEC	8	191.166667	23.895833	0.52	0.8357

HOR A Pr > |T| H0: LSMEAN(i)=LSMEAN(j)

LSMEAN	i/j	1	2	3
2 38.4444444	1	.	0.1181	0.0001
4 41.4074074	2	0.1181	.	0.0025
6 47.4259259	3	0.0001	0.0025	.

CAU A Pr > |T| H0: LSMEAN(i)=LSMEAN(j)

LSMEAN	i/j	1	2	3
2 34.6111111	1	.	0.0003	0.0001
4 42.0185185	2	0.0003	.	0.0001
8 50.6481481	3	0.0001	0.0001	.

FEC A Pr > |T| H0: LSMEAN(i)=LSMEAN(j)

LSMEAN	i/j	1	2	3
10.24 45.6296296	1	.	0.0004	0.1982
11.76 38.4444444	2	0.0004	.	0.0144
18.38 43.2037037	3	0.1982	0.0144	.

Análisis Estadístico, comparando el diámetro obtenido a campo con el obtenido por la ecuación de regresión.

General Linear Models Procedure

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
HOR	3	2 4 6
CAU	3	2 4 8
FEC	3	10.24 11.76 18.38

Dependent Variable: REL

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	44	1.25094203	0.02843050	1.11	0.3716
Error	36	0.91836837	0.02551023		
Corrected Total	80	2.16931041			

R-Square	C.V.	Root MSE	REL Mean
0.576654	3699.202	0.159719	0.004318

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
BLO(HOR*FEC)	18	0.43599570	0.02422198	0.95	0.5318
HOR	2	0.01960837	0.00980419	0.38	0.6837
CAU	2	0.05004939	0.02502469	0.98	0.3847
HOR*CAU	4	0.03230697	0.00807674	0.32	0.8650
FEC	2	0.38938879	0.19469439	7.63	0.0017
HOR*FEC	4	0.10411022	0.02602755	1.02	0.4100
CAU*FEC	4	0.12660999	0.03165250	1.24	0.3111
HOR*CAU*FEC	8	0.09287261	0.01160908	0.46	0.8791

FEC	REL	Pr >  T	H0: LSMEAN(i)=LSMEAN(j)
	LSMEAN	i/j	1 2 3
10.24	0.07744012	1	0.0005 0.2298
11.76	-0.08881859	2	0.0005 . 0.0133
18.38	0.02433146	3	0.2298 0.0133 .

HOR	REL
2	0.01492661
4	-0.01768129
6	0.01570767

CAU	REL
2	-0.02015880
4	0.03840807
8	-0.00529628

FEC	REL
10.24	0.07744012
11.76	-0.08881859
18.38	0.02433146

Análisis Estadístico, comparando el diámetro obtenido a campo con el obtenido por la fórmula de Goldberg.

General Linear Models Procedure

Class Level Information

BLO	3	1 2 3
HOR	3	2 4 6
CAU	3	2 4 8
FEC	3	1 2 3

Dependent Variable: PDIAM

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	44	1.29828642	0.02950651	1.23	0.2613
Error	36	0.86207999	0.02394667		
Corrected Total	80	2.16036641			

R-Square 0.600957  
 C.V. 15.89691  
 Root MSE 0.154747  
 PDIAM Mean 0.973441

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
BLO(HOR*FEC)	18	0.40549973	0.02252776	0.94	0.5406
HOR	2	0.05081391	0.02540695	1.06	0.3567
CAU	2	0.05976467	0.02988233	1.25	0.2992
HOR*CAU	4	0.11519753	0.02879938	1.20	0.3265
FEC	2	0.36589954	0.18294977	7.64	0.0017
HOR*FEC	4	0.09707139	0.02426785	1.01	0.4134
CAU*FEC	4	0.11842528	0.02960632	1.24	0.3129
HOR*CAU*FEC	8	0.08561437	0.01070180	0.45	0.8844

FEC	PDIAM LSMEAN	Pr >  T	H0: LSMEAN(i)=LSMEAN(j)		
		i/j	1	2	3
1	0.99221616	1	.	0.0139	0.2203
2	0.88335950	2	0.0139	.	0.0005
3	1.04474775	3	0.2203	0.0005	.

Análisis Estadístico, comparando el diámetro obtenido el día del riego y a las 24 horas.

The MIXED Procedure

Class Level Information

Class	Levels	Values
BLO	3	1 2 3
DIA	2	1 2
CAU	3	2 4 8
HOR	3	2 4 6

REML Estimation Iteration History

Iteration	Evaluations	Objective	Criterion
0	1	167.54968769	
1	1	138.80525184	0.00000000

Convergence criteria met.

Covariance Parameter Estimates (REML)

Cov Parm	Subject	Estimate
CS	BLO*CAU*HOR	43.72569444
Residual		4.56018519

Model Fitting Information for DIAM

Description	Value
Observations	54.0000
Res Log Likelihood	-96.9708
Akaike's Information Criterion	-98.9708
Schwarz's Bayesian Criterion	-100.372
-2 Res Log Likelihood	193.9416
Null Model LRT Chi-Square	28.7444
Null Model LRT DF	1.0000
Null Model LRT P-Value	0.0000

Tests of Fixed Effects

Source	NDF	DDF	Type III F	Pr > F
BLO(HOR)	6	12	0.42	0.8513
HOR	2	12	1.73	0.2188
CAU	2	12	11.52	0.0016
CAU*HOR	4	12	0.35	0.8394
DIA	1	18	0.12	0.7300
DIA*HOR	2	18	3.05	0.0722
DIA*CAU	2	18	1.68	0.2150
DIA*CAU*HOR	4	18	0.21	0.9288

Differences of Least Squares Means

Effect	DIA	CAU	HOR	_DIA	_CAU	_HOR	Difference	Std Error	DF
DIA*HOR	1		2	1		4	-5.22222222	3.27569771	18
DIA*HOR	1		2	1		6	-6.94444444	3.27569771	18
DIA*HOR	1		2	2		2	-2.05555556	1.00666503	18
DIA*HOR	1		2	2		4	-3.77777778	3.27569771	18
DIA*HOR	1		2	2		6	-6.94444444	3.27569771	18
DIA*HOR	1		4	1		6	-1.72222222	3.27569771	18
DIA*HOR	1		4	2		2	3.16666667	3.27569771	18
DIA*HOR	1		4	2		4	1.44444444	1.00666503	18
DIA*HOR	1		4	2		6	-1.72222222	3.27569771	18
DIA*HOR	1		6	2		2	4.88888889	3.27569771	18
DIA*HOR	1		6	2		4	3.16666667	3.27569771	18
DIA*HOR	1		6	2		6	0.00000000	1.00666503	18
DIA*HOR	2		2	2		4	-1.72222222	3.27569771	18
DIA*HOR	2		2	2		6	-4.88888889	3.27569771	18
DIA*HOR	2		4	2		6	-3.16666667	3.27569771	18

Differences of Least Squares Means

t	Pr >  t
-1.59	0.1283
-2.12	0.0482
-2.04	0.0561
-1.15	0.2639
-2.12	0.0482
-0.53	0.6055
0.97	0.3465
1.43	0.1685
-0.53	0.6055
1.49	0.1529
0.97	0.3465
0.00	1.0000
-0.53	0.6055
-1.49	0.1529
-0.97	0.3465



FOTO N°1: Dispositivo de goteo



FOTO N°2: Cabezal del dispositivo de goteo.



FOTO N°3: Ejemplo del área de mojado para 2 horas de riego y un caudal de 2 litros/horas.