

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS BULBOS HÚMEDOS EN
SUELOS DE TEXTURAS CONTRASTANTES, CON DIFERENTES
PATRONES DE APLICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO LOCALIZADO**

por

Raquel Mayumi HAYASHI TSUMURA

TESIS presentada como uno de los
requisitos para obtener el título de
Magíster en Ciencias Agrarias
opción Suelos y Aguas

MONTEVIDEO
URUGUAY
2015

Tesis aprobada por el tribunal integrado por: Dr. Ing. Agr. Mario Perez Bidegain, Dr. Ing. Civil Luis Silveira, y Dr. Christian Hoffman, el 22 de julio de 2010. Autora: Ing. Agr. Raquel Mayumi Hayashi Tsumura. Director Dr. Ing. Agr. Mario García Petillo.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Agronomía por darme la oportunidad para realizar la maestría permitiéndome avanzar en mi carrera docente y profesional.

Al Fondo Profesor Clemente Estable y al Programa de Desarrollo Tecnológico (PDT), quienes financiaron el proyecto de tesis.

Al Dr. Ing. Agr. Mario García Petillo, mi director de tesis, por su apoyo, comprensión y paciencia en el planteamiento del trabajo de tesis, y por tantos años de convivencia laboral.

Un agradecimiento muy especial a mis compañeros de cátedra Ings. Agrs. Lucía Puppo y Pablo Morales por su ayuda en el trabajo de campo y laboratorio, y con quienes comparto muchas horas de trabajo más allá de la realización de la tesis de maestría.

Al Ing. Agr. Enrique Supino y a la Empresa Citrícola Browni S.A. por permitirme el acceso a su establecimiento, en donde encontramos cultivos comerciales de limoneros en un suelo arenoso.

A mis hijos, Sayuri y Takeshi, que son lo más lindo que tengo y que adoro.

A Rodolfo, mi esposo, mi compañero, por tanto apoyo, aliento y principalmente, tanta paciencia en todos estos años.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. EL RIEGO LOCALIZADO EN URUGUAY	1
1.2. RIEGO LOCALIZADO	2
1.3. FORMA DEL BULBO HÚMEDO	3
1.4. METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FORMA DEL BULBO HÚMEDO PARA EL DISEÑO DEL RIEGO	5
1.5. DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO	7
1.6. EFECTO DEL FRACCIONAMIENTO DEL TIEMPO DE RIEGO SOBRE LAS DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO	11
1.7. INVESTIGACIÓN EN URUGUAY	12
2. DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS BULBOS HÚMEDOS EN SUELOS DE TEXTURA CONTRASTANTES, CON DIFERENTES PATRONES DE APLICACIÓN DEL AGUA DE RIEGO LOCALIZADO	13
2.1. Resumen	14
2.2. Summary	15
2.3. Introducción	16
2.4. Materiales y métodos	19
2.4.1. Muestréos en ensayos de la instalación tipo 1	19
2.4.2. Caracterización del suelo del ensayo en la instalación tipo 1	21
2.4.3. Muestréos con el dispositivo portátil, instalación tipo 2	22
2.4.4. Caracterización del suelo del ensayo en la instalación tipo 2	22

2.4.5.Descripción del dispositivo portátil.....	23
2.4.6.Determinaciones	25
2.4.6.1. Forma y tamaño del bulbo húmedo	25
2.4.6.2. Porcentaje de superficie mojado	27
2.4.7.Análisis de los datos	27
2.5. Resultados y discusión	28
2.5.1.Desarrollo del bulbo húmedo en los ensayos con instalación tipo 1	28
2.5.1.1. Sitio 1: Melilla	28
2.5.1.2. Sitio 2: Centro Regional Sur	32
2.5.2. Desarrollo del bulbo húmedo en los ensayos con instalación tipo 2	35
2.5.2.1. Suelo Arenoso	35
2.5.2.2. Suelo Franco Arcilloso	39
2.6. Conclusiones.....	46
2.7. Bibliografía	48
3. <u>DISCUSIÓN GENERAL</u>	51
4. <u>CONCLUSIONES</u>	54
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	56

RESUMEN

El objetivo del trabajo es obtener una primera aproximación en la determinación de la forma de los bulbos húmedos en riego localizado, y analizar los efectos de diferentes formas de aplicación del riego sobre los patrones de mojado del suelo. Se instalaron ensayos de riego en dos suelos que presentaban un horizonte superficial franco arcillo limoso de 0,40 m, seguido de un horizonte B textural (arcilloso) de baja permeabilidad. Se tomaron medidas para determinar el tamaño del bulbo húmedo, aplicando el riego con goteros de diferente caudal, diferente espaciamiento, con una o dos líneas y con diferentes volúmenes aplicados. Adicionalmente se realizó una prueba de campo utilizando un dispositivo portátil en un suelo arenoso y en un suelo franco arcilloso, donde se evaluaron diferentes caudales y tiempos de riego. La forma del húmedo, se determinó mediante la extracción de muestras de suelo en la zona regada y mediante el método gravimétrico se determinó el contenido de agua de las muestras. Los datos obtenidos se ingresaron a un programa informático (SURFER8) que permite graficar estos resultados, obteniéndose los diferentes patrones de mojado. Los primeros resultados muestran diferencias importantes entre los valores observados y los planteados en la bibliografía extranjera, y que hay aspectos del manejo, como el tiempo de riego, que hacen que parte del agua se pierda por percolación profunda.

Palabras clave: riego localizado, volumen de suelo mojado, suelos estratificados, goteo

Description and quantification of wet bulbs in soils with contrasting textures with different patterns of water application under drip irrigation

SUMMARY

The objective of this work is to obtain one first approach in the determination of the size of wetted bulbs, and to analyze the effects of different ways of water application on the patterns of the size and shape of the wetted bulb. Irrigation experiment were installed on two soils with a silty clay loam superficial horizon of 0,40 m depth, followed by a clay horizon of low permeability. Measurements were taken to determine the size of the bulb, applying irrigation with dripper of different flow, different distances, with one or two lines and different applied volumes. In addition a field test was carry out using a portable device assessed different flows and irrigation times in a sandy and a clay loam soils. The gravimetric method was used to evaluate the water content of the samples to determine the dimensions of the obtained wetted bulb of in each case. The data were introduced in a computer program (SURFER8), to plot these results and obtain the different wet bulb. The first results show important differences between observed values and the models proposed in the bibliography and there are aspects of the management, for example irrigation time, that produce deep percolation of the irrigation water.

Keywords: microirrigation, soil wetted volume, stratified soils, trickle

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL RIEGO LOCALIZADO EN URUGUAY

En Uruguay la incorporación del riego en la producción frutícola tiene incidencia en dos aspectos básicos: la seguridad de la cosecha y la mejora en la calidad y volumen de fruta producida. La variabilidad de las condiciones climáticas de Uruguay determina que el riego sea un seguro para la cosecha en los años en que los déficits hídricos son grandes. En años normales el riego permite regular el tamaño de la fruta por lo que la mayor productividad se asocia a la producción de fruta de mayor tamaño acorde a las exigencias de los negocios de exportación (DIEA, 2003).

El riego comprende el 40 % de la superficie frutícola de hoja caduca y muestra una importancia creciente con el incremento de la escala productiva. En los productores más pequeños tan sólo el 22 % de su superficie tiene riego, mientras que en los más grandes supera el 70 %. La variación constatada entre los diferentes estratos parecería estar más relacionada con la posibilidad de obtener los recursos necesarios para realizar la inversión que con la convicción de los productores sobre la necesidad de la incorporación tecnológica. El 30 % de la superficie citrícola se encuentra bajo riego totalizando algo más de 5.8 mil hectáreas, de las cuales 3.9 mil corresponden a las 15 explotaciones de más de 100 mil plantas y en el estrato de predios con más de 200 mil plantas la adopción del riego fue en un 56 % de la superficie (DIEA, 2003).

El tipo de riego que más se ha adoptado en estos sistemas de producción es el riego localizado, el cual originalmente se utilizó como una forma de desarrollar la agricultura en áreas de recursos hídricos escasos (Bresler, 1977). Sin embargo, actualmente se ha extendido en una amplia área geográfica, independiente de la escasez o no del recurso hídrico, dadas las ventajas adicionales que presenta, como su alta uniformidad, la posibilidad de aplicar fertilizantes disueltos en el agua de riego, y los menores requerimientos de mano de obra (Sellés, *et al.* 2003)

1.2. RIEGO LOCALIZADO

El riego localizado consiste en la aplicación de pequeñas cantidades de agua directamente en la zona radicular de las plantas, a través de una fuente puntual. Esta forma de aplicación del agua de riego resulta en un volumen de suelo mojado, conocido como bulbo húmedo (Dasberg y Bresler, 1985; Dasberg y Or, 1999).

El principio básico del riego por goteo es mantener un alto potencial mátrico del agua en un volumen reducido de suelo, lo que se logra mediante la aplicación diaria de agua, reemplazando lo consumido por las plantas el día anterior (Bresler, 1977). Este principio básico es una de las ventajas atribuidas al riego por goteo, lo que se refleja en una mayor producción debido a que el agua se encuentra fácilmente disponible para la planta, manejándose un régimen de humedad en torno a la capacidad de campo.

La zona mojada se reduce a una fracción del área ocupada por la planta, lo cual proporciona una serie de ventajas tales como: entrefilas transitables y menores pérdidas por evaporación directa. Por estos motivos este método ha sido incorporado en el paquete tecnológico de la mayoría de los emprendimientos frutícolas del Uruguay.

La eficiencia de aplicación del agua de riego puede llegar fácilmente al 90 % (Wu y Gitlin, 1983), indicando que un alto porcentaje del agua aplicada llega a la zona radicular y es aprovechado por el cultivo. En suelos profundos de textura franca o arcillosos la eficiencia de aplicación puede ser del 100 %, significando que toda el agua aportada por el riego es aprovechado por el cultivo.

La principal desventaja asociada a este método de riego es la obstrucción de los emisores ya que son diseñados con pequeños pasajes de agua (menores a 0,5 mm), por lo cual se requiere la instalación de equipos de filtrado adecuados, elevando los costos de inversión. Asimismo, Randall y Salvatore (1988), Assaf *et al.*, (1989) y Shrivastava *et al.*, (1994) destacan como desventaja la falta de conocimiento de los fenómenos involucrados en la distribución del agua en el suelo. Para humedecer correctamente un suelo sin que éste quede ni seco ni demasiado húmedo, es fundamental conocer cómo se comporta el agua;

cómo se mueve, cómo se almacena, cómo la planta la absorbe y cuáles son las pérdidas que se producen.

1.3. FORMA DEL BULBO HÚMEDO

Para determinar el número de emisores necesarios para mojar determinado volumen de suelo y su correcta localización, es imprescindible contar con una buena estimación de la forma y dimensiones del bulbo de mojado formado a partir del emisor (Rodrigo *et al.*, 1992).

A pesar de que la pluviometría del riego localizado es muy baja, cuando el agua empieza a fluir incide sobre una superficie muy reducida del suelo, generando un pequeño charco, cuyo radio se va extendiendo a medida que el riego continúa. Cuando la velocidad de infiltración del suelo se iguala a la pluviometría del riego, el tamaño del charco se estabiliza. Por lo tanto las dimensiones del charco dependerán del tipo de suelo, condición de la superficie y caudal del emisor (Pizarro, 1990).

A partir del charco se genera una zona húmeda, cuyas dimensiones dependerán del tipo de suelo y del caudal de los emisores. El potencial de agua de esta zona vecina no saturada está compuesto por el potencial gravimétrico y el mátrico. Cuando el suelo tiene un bajo contenido de humedad, el potencial de matriz tiene mayor magnitud (en valor absoluto) que el gravimétrico, por lo cual se da la expansión horizontal de la mancha húmeda alrededor del charco. El potencial gravimétrico empieza a intervenir en el movimiento del agua cuando se supera cierto contenido de humedad. La acción combinada de las fuerzas mátricas y gravimétricas origina la forma característica del bulbo húmedo (Pizarro, 1990).

En riego localizado, la distribución del agua en el perfil del suelo depende de las propiedades y características del suelo y para un suelo dado, del volumen de agua aplicado, caudal del emisor y topografía del terreno haciendo abstracción del sistema de extracción de agua.

La variación espacial de las propiedades físicas del suelo adiciona modificaciones en la distribución del agua y por tanto en el volumen de suelo mojado, constituyendo un problema en la estimación adecuada del número de goteros y de su localización respecto a las plantas (Clothier *et al.*, 1985; Or, 1996). Además, las pérdidas por percolación por debajo

de la zona radicular, reducen la eficiencia del método de riego (Bouwer, 2000). Por tanto es importante el conocimiento del proceso de distribución del agua en el suelo. La comprensión inadecuada del mismo se traduce en el uso incorrecto de esta técnica, generalmente debido al uso de información empírica, obtenidas de la bibliografía y presentadas en forma de tablas, gráficas o fórmulas (Wooding, 1968; Brandt *et al.* 1971; Ben-Asher *et al.*, 1978; Clothier, 1984; Or, 1995; Ould Mohamed El-Hafedh, *et al.*, 2001).

Thorburn, *et al.* (2003), evaluaron una serie de suelos de texturas y propiedades hidráulicas diferentes, encontrando que las dimensiones del bulbo húmedo no se relacionaban estrechamente con la textura del suelo, siendo afectado por la estructura de los suelos en estudio. Las propiedades hidráulicas de cada suelo y la estructura son factores que están determinando las dimensiones del bulbo de mojado en suelos de igual textura. Según Cook *et al.* (2003), la textura es un mal predictor de la forma en que se moja un suelo y se requiere información específica sobre los patrones de mojado para el diseño eficiente del sistema de riego localizado.

El grado de desarrollo del volumen húmedo del suelo depende de diversos factores:

- Tipo de suelo: en suelos pesados la velocidad de infiltración es menor que en los ligeros, lo que hace que el radio del charco sea mayor, y por lo tanto el bulbo se extiende más horizontalmente. Adicionalmente el mayor porcentaje de microporos en los suelos pesados hace que las fuerzas mátricas dominen sobre las gravitacionales en una mayor gama de humedad que en el caso de los suelos más livianos (arenosos), y por lo tanto la redistribución horizontal es más intensa. La reducida extensión del bulbo en suelos arenosos ha ocasionado la migración del riego por goteo hacia la microaspersión (Pizarro, 1990).

- Estratificación: se refiere a la presencia o ausencia de determinados horizontes genéticos. Cuando el frente húmedo alcanza un estrato diferente, éste se comporta inicialmente como una barrera al avance del agua, aunque el estrato sea más permeable que el suelo situado encima de él. En el caso de un estrato arcilloso, cuando el frente húmedo alcanza la arcilla, el agua penetra inmediatamente en ella, pero debido a su menor permeabilidad, el agua pasa con menor velocidad acumulándose en el estrato superior, extendiéndose más (Pizarro, 1990).

- Caudal del gotero (l/h) y tiempo de riego (h). A mayor caudal del gotero, para un suelo dado, aumenta la pluviometría y por tanto más tiempo demora en estabilizarse el charco, siendo de mayor tamaño y por lo tanto el bulbo tiende a ser más extenso horizontalmente. Cuando se aumenta el tiempo de riego (mayor volumen de agua aplicado), no se da una mayor extensión horizontal del bulbo de mojado, sino un mayor desarrollo en profundidad. Un tiempo excesivo de riego hace que el agua se pierda por percolación (Pizarro, 1990).

- Pendiente de la parcela: la pendiente del terreno deforma la forma habitual del bulbo húmedo en terreno plano, inclinándolo en el sentido de la pendiente. El movimiento vertical del agua no será perpendicular a la superficie del terreno, ni el movimiento horizontal será paralelo a la misma y al desplazamiento del charco en el sentido de la pendiente. El resultado final será una pérdida de simetría respecto a la vertical del emisor. En casos de alta pendiente y suelos de baja permeabilidad, pueden producirse desplazamientos importantes e incontrolados del agua del charco, creando problemas de manejo (Rodrigo *et al.*, 1992).

En este sistema de riego, la forma y tamaño del volumen o bulbo húmedo son datos imprescindibles para definir la separación entre los goteros, (Warrick, 1974;). Los espaciamientos típicos están entre 0,15 -1,0 m (Randall y Salvadore, 1988; Or, 1995; Revol *et al.* 1997), dependiendo del tipo de suelo y del caudal de emisor.

1.4. METODOLOGÍAS PARA LA ESTIMACIÓN DE LA FORMA DEL BULBO HÚMEDO PARA EL DISEÑO DEL RIEGO

Para la realización de un buen diseño del equipo de riego, es imprescindible contar con una buena estimación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo formado a partir de un emisor, ya que esta información permite determinar el número de emisores necesarios para mojar determinado volumen de suelo, así como para establecer su correcta ubicación (Rodrigo *et al.*, 1992).

Para ello existen diversas metodologías:

Uso de modelos: se basan en darle solución a la ecuación general de Richards, la cual describe el movimiento del agua en un medio poroso no saturado. Los modelos matemáticos existentes son muy complejos, aun estableciendo una serie de restricciones que a su vez dan lugar a que sea muy variable su correspondencia con los valores obtenidos en el campo, en especial la de suponer que el suelo es un medio isótropo (Rodrigo *et al.*, 1992). Factores como la dimensión de la zona saturada bajo el gotero (Merril, *et al.*, 1978, citado por Rodrigo *et al.*, 1992), volúmenes de agua aplicados respecto a la evapotranspiración; extracción por las raíces, medios porosos inclinados, etc., son generalmente ignorados, aunque han sido incorporados en modelos más recientes.

La principal dificultad para la utilización de estos modelos es la de que los diseñadores de riegos localizados no disponen de los valores de los parámetros del suelo necesarios, ni resulta fácil aplicarlos cuando las propiedades del suelo varían a lo largo del perfil.

Uso de tablas: existen numerosas tablas que relacionan la extensión del bulbo húmedo con alguno de los factores que intervienen, generalmente la textura del suelo. Sin embargo la información presentada en estas tablas habitualmente no incluyen todos aquellos factores que de alguna forma afectan las dimensiones del bulbo de mojado por lo cual su utilización será más inexacta en la medida que más factores sean ignorados en la elaboración de dichas tablas. A modo de ejemplo, Keller y Bliesner (1990), elaboraron una tabla en la cual se presenta para diferentes texturas de suelo y grados de estratificación cuál es el diámetro de mojado generado por un gotero de 4 lh^{-1} en dos situaciones de profundidad de raíces. Esta información, a pesar de que incluye varios factores, no informa sobre las características de las capas o como es el grado de estratificación, profundidad de las capas, ni del volumen de agua aplicado, por lo cual su uso debe ser muy prudente.

Prueba de campo: el mejor procedimiento para conocer el área mojada por un emisor consiste en realizar una prueba de campo, la cual debe realizarse en condiciones lo más parecidas posible a las que se presenten posteriormente en el terreno. Las pruebas son fáciles de realizar y de bajo costo, sin embargo no es frecuente que se realice a nivel de diseño. Para su realización es necesario tener una idea de cuáles son los volúmenes de agua

a aplicar y el caudal de los goteros. Se construye un equipo portátil que permite aplicar el riego en el sitio donde posteriormente se instalará el cultivo (Rodrigo *et al.*, 1992).

Para lograr emisores de diferentes caudales a nivel de ensayos a campo, se puede optar entre varios métodos.

Vermeiren y Jobling (1980) utilizan un depósito de nivel constante y microtubos de distinta longitud como emisores. Pizarro (1990), propone emisores idénticos y distintos tiempos de aplicación. Rodrigo *et al.*, (1992), especifican emisores de flujo turbulento y presiones no inferiores a 1,5 metros de columna de agua (m.c.a.).

El uso de microtubos de distinta longitud, permite en un único ensayo, aplicar distintos caudales al mismo tiempo. Para lograr esto, el nivel constante mencionado por Vermeiren y Jobling (1980) requiere el uso de dos depósitos o disponer de una fuente de agua en el lugar del ensayo.

En cuanto al uso de emisores no microtubos, debe considerarse que las curvas características se obtienen, para presiones superiores a 5 m.c.a., por lo cual si se utiliza un depósito de nivel constante de una altura inferior a esos 5 m.c.a. deberán verificarse los caudales.

Sin embargo, para aplicar distintos volúmenes en un solo ensayo, es necesario cortar el flujo a los emisores obligando a permanecer de una manera prácticamente continua en el lugar de la experiencia. Algunos investigadores proponen el uso de microtubos de longitud variable alimentados con un depósito de nivel variable y presiones máximas de 1,5 m, con las ventajas de no requerir la presencia durante el ensayo y menores cantidades de agua, sin embargo no simula bien el caudal constante del emisor ni la duración del tiempo de riego.

1.5. DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO

Existe mucha información acerca de las dimensiones que pueden alcanzar los bulbos húmedos. Una de las más utilizadas es la información del Cuadro 1, debida a Keller y Bliesner (1990). También existe información presentada en forma de gráficas que nos permiten obtener radio de mojado y profundidad (Figura 1).

Cuadro 1: Diámetro de mojado por un emisor de 4 lh⁻¹. Keller y Bliesner (1990)

Profundidad de raíces y textura del suelo	Grado de estratificación del suelo		
	Homogéneo	Estratificado	En capas
Profundidad: 0,75 m	Área humedecida (m x m)		
Ligera	0,40 x 0,50	0,60 x 0,80	0,90 x 1,10
Media	0,70 x 0,90	1,00 x 1,20	1,20 x 1,50
Pesada	0,90 x 1,10	1,20 x 1,50	1,50 x 1,80
Profundidad: 1,50 m			
Ligera	0,60 x 0,80	1,10 x 1,40	1,40 x 1,80
Media	1,00 x 1,20	1,70 x 2,10	2,20 x 2,70
Pesada	1,20 x 1,50	1,60 x 2,00	2,00 x 2,50

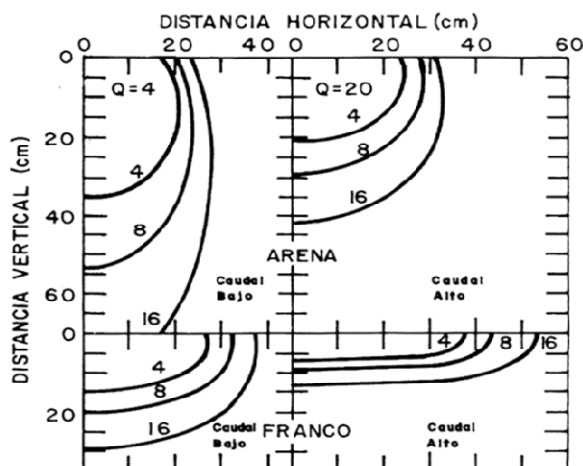


Figura 1: Situación del frente de mojado en función del caudal y de la infiltración acumulada en litros (Bresler, 1977)

Karmeli *et al*, 1985, presentan una gráfica (Figura 2) de la cual puede obtenerse el diámetro de mojado para suelos de diferentes textura, y diferentes caudales. Sin embargo no aporta información sobre el tiempo de riego, que como se mencionó anteriormente está afectando la forma del bulbo.

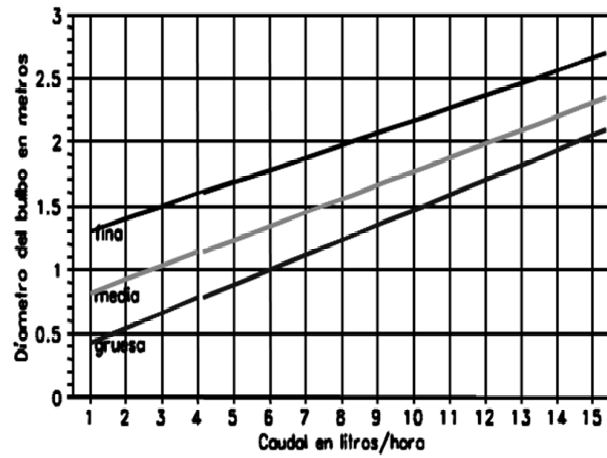


Figura 2: Diámetro de mojado en función del caudal, para suelos de diferente textura (Karmeli *et. al*, 1985)

Thabet y Zayani (2008) trabajando en laboratorio con un suelo franco arenoso obtuvieron las siguientes gráficas (Figuras 3 y 4), que relacionan el radio y la profundidad de mojado, para dos caudales de riego y diferentes tiempos de aplicación:

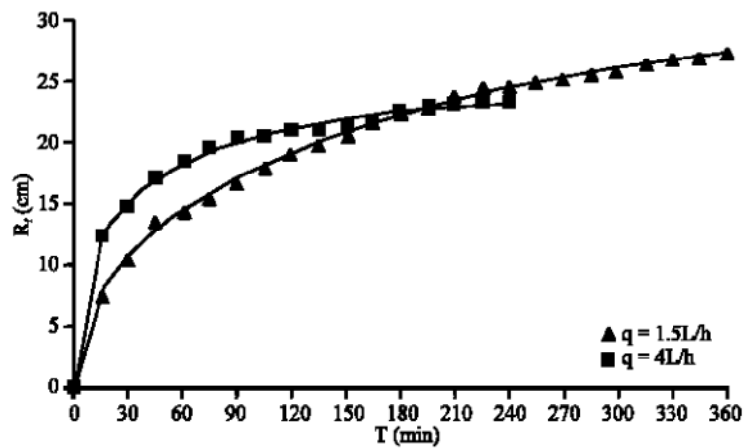


Figura 3: Variación del radio de mojado en un suelo franco arenoso, en relación al tiempo de riego para dos caudales diferentes. Thabet y Zayani (2008)

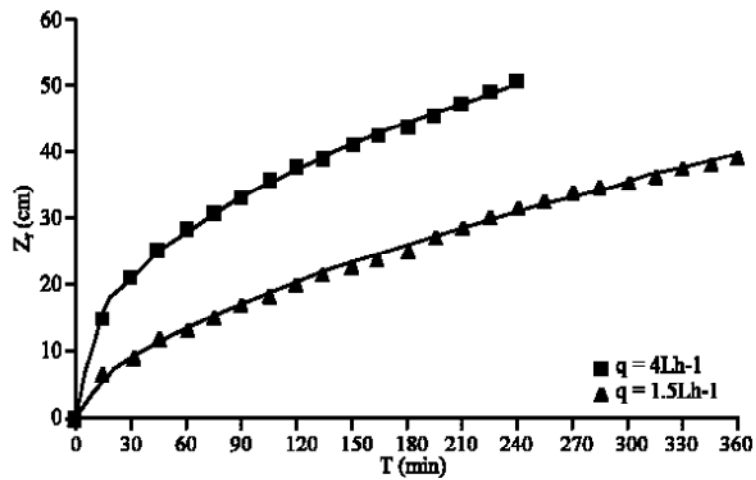


Figura 4: Variación de la profundidad de mojado en un suelo franco arenoso, en relación al tiempo de riego para dos caudales diferentes. Thabet y Zayani (2008)

Gispert Folch (2005), realizó una prueba de campo con goteros de 4 y 8 $l\ h^{-1}$ y obtuvo las formas del bulbo húmedo para 3 tiempos de riego, 1, 2 y 3 horas, en un suelo franco arenoso homogéneo (Figuras 5 y 6).

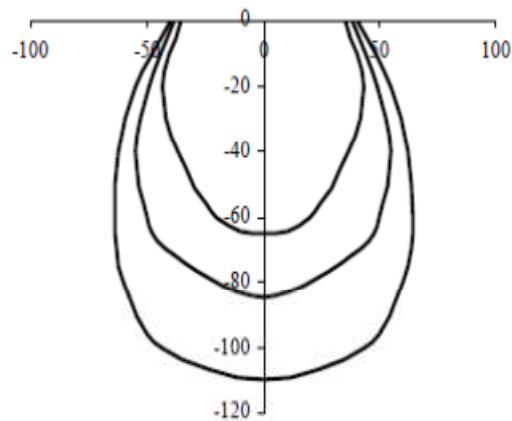


Figura 5: Sección y desarrollo del bulbo húmedo generado con un gotero de 8 $l\ h^{-1}$, con tres tiempos de riego, 1, 2 y 3 horas, en un suelo de textura franco arenosa. Gispert Folch (2005)

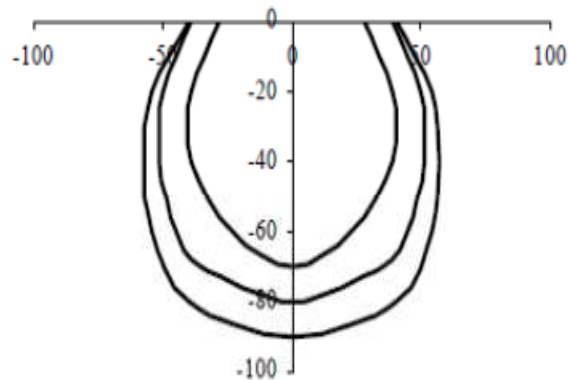


Figura 6: Sección y desarrollo del bulbo húmedo generado con un gotero de 4 l h^{-1} , con tres tiempos de riego, 1, 2 y 3 horas, en un suelo de textura franco arenosa. Gispert Folch (2005)

La información existente es amplia y diversa ya que dependen de las condiciones locales donde fueron generadas.

1.6. EFECTO DEL FRACCIONAMIENTO DEL TIEMPO DE RIEGO SOBRE LAS DIMENSIONES DEL BULBO HÚMEDO

Levin *et al.*, (1979) realizaron experiencias donde comprobaron que el riego aplicado por pulsos genera una menor humedad en el suelo, y dado que la cantidad de agua aplicada es la misma, el volumen de suelo mojado es mayor (más profundo y más ancho) que con riego continuo, pero el aumento de la anchura era proporcionalmente superior al aumento en profundidad.

Por tanto el riego fraccionado favorece la extensión superficial del bulbo húmedo, lo que puede ser de aplicación en suelos muy permeables en los que el bulbo húmedo es poco extenso horizontalmente y muy profundo. En el caso de suelos de baja permeabilidad, mejora la aireación, al evitar que el suelo permanezca saturado por periodos prolongados (Pizarro, 1990).

La aplicación del riego a pulsos requiere de un equipo que permita accionar los emisores intermitentemente durante espacios cortos de tiempo, con intervalos más largos entre aplicaciones, lo cual está asociado a un mayor costo inicial del equipo de riego. Una alternativa más viable es la aplicación del riego fraccionado en dos o tres veces, utilizando un programador de riego que permita realizar varios riegos en el día.

1.7. INVESTIGACIÓN EN URUGUAY

En Uruguay gran parte de la producción frutícola, ha incorporado la tecnología del riego localizado. Sin embargo los criterios utilizados en el diseño de los equipos se basan en el uso de información como la citada anteriormente dado que la investigación local acerca del tema es casi inexistente. El único antecedente es de García Petillo (2002), quien realizó 116 mediciones con frecuencia semanal, constatando que el bulbo húmedo, generado por un gotero de $4,0 \text{ lh}^{-1}$, tuvo un desarrollo muy importante en profundidad, mientras que no logró alcanzar un ancho mayor a 1,0 m. Sin embargo, de acuerdo a las referencias bibliográficas hasta ahora aceptadas, en el caso de suelos muy estratificados con horizontes subsuperficiales muy arcillosos (horizontes Bt), como ocurre frecuentemente en los suelos del Uruguay, el bulbo mojado por el gotero debería tener un desarrollo horizontal mayor que vertical (Keller y Bliesner, 1990; Pizarro, 1990; Zazueta, 1992).

La presente tesis de maestría está enmarcada dentro de la línea de investigación de riego en frutales de hoja caduca, proyecto, "Análisis de las dimensiones del bulbo húmedo bajo riego localizado en los suelos del Uruguay y ajuste de un modelo matemático", financiado por Fondo Clemente Estable, llevado a cabo por la Unidad de Hidrología, Grupo Disciplinario de Ingeniería Agrícola, Departamento de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía, en conjunto con el Instituto de Mecánica de los Fluídos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) de la Facultad de Ingeniería.

El objetivo del presente trabajo fue analizar y cuantificar las distintas formas y tamaños de los bulbos húmedos, aplicando el agua de riego con goteros de diferente caudal y con diferentes tiempos de riego, en dos suelos, uno de textura predominantemente arenosa y otro de textura arcillo limosa con perfil estratificado, típico del Uruguay.

2. DESCRIPCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE LOS BULBOS HÚMEDOS CON RIEGO LOCALIZADO, EN SUELOS DE TEXTURAS CONTRASTANTES¹.

Raquel Hayashi¹, Pablo Morales¹, Lucía Puppo¹ y Mario García Petillo¹

¹ Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Departamento de Suelos y Aguas, Grupo Disciplinario de Ingeniería Agrícola, Unidad de Hidrología. Avda. E. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay.

Correo electrónico: rhayashi@fagro.edu.uy

Riego Localizado: Bulbo húmedo en suelos de textura contrastante

¹ El artículo será enviado a la revista Agrociencia Uruguay de la Facultad de Agronomía, UdelaR.

2.1. Resumen

Descripción y cuantificación de los bulbos húmedos con riego localizado, en suelos de texturas contrastantes.

El objetivo del trabajo es obtener una primera aproximación en la determinación de la forma de los bulbos húmedos en riego localizado, y analizar los efectos de diferentes formas de aplicación del riego sobre los patrones de mojado del suelo. Se instalaron ensayos de riego en dos suelos que presentaban un horizonte superficial franco arcillo limoso de 0,40 m, seguido de un horizonte B textural (arcilloso) de baja permeabilidad. Se tomaron medidas para determinar el tamaño del bulbo húmedo, aplicando el riego con goteros de diferente caudal, diferente espaciamiento, con una o dos líneas y con diferentes volúmenes aplicados. Adicionalmente se realizó una prueba de campo utilizando un dispositivo portátil en un suelo arenoso y en un suelo franco arcilloso, donde se evaluaron diferentes caudales y tiempos de riego. La forma del bulbo húmedo, se determinó mediante la extracción de muestras de suelo en la zona regada y mediante el método gravimétrico se determinó el contenido de agua de las muestras. Los datos obtenidos se ingresaron a un programa informático (SURFER8) que permite graficar estos resultados, obteniéndose los diferentes patrones de mojado. Los primeros resultados muestran diferencias importantes entre los valores observados y los planteados en la bibliografía extranjera, y que hay aspectos del manejo, como el tiempo de riego, que hacen que parte del agua se pierda por percolación profunda.

PALABRAS CLAVE: riego localizado, volumen de suelo mojado, suelos estratificados, goteo

2.2. Summary

Description and quantification of wet bulbs under drip irrigation in soils with contrasting textures.

The objective of this work is to obtain one first approach in the determination of the size of wetted bulbs, and to analyze the effects of different ways of water application on the patterns of the size and shape of the wetted bulb. Irrigation experiment were installed on two soils with a silty clay loam superficial horizon of 0,40 m depth, followed by a clay horizon of low permeability. Measurements were taken to determine the size of the bulb, applying irrigation with dripper of different flow, different distances, with one or two lines and different applied volumes. In addition a field test was carry out using a portable device assessed different flows and irrigation times in a sandy and a clay loam soils. The gravimetric method was used to evaluate the water content of the samples to determine the dimensions of the obtained wetted bulb of in each case. The data were introduced in a computer program (SURFER8), to plot these results and obtain the different wet bulb. The first results show important differences between observed values and the models proposed in the bibliography and there are aspects of the management, for example irrigation time, that produce deep percolation of the irrigation water.

KEY WORDS: microirrigation, soil wetted volume, stratified soils, trickle

2.3. Introducción

El riego localizado consiste en la aplicación de pequeñas cantidades de agua directamente en la zona radicular de las plantas, a través de una fuente puntual. Esta forma de aplicación resulta en un volumen de suelo mojado, conocido como bulbo húmedo o bulbo mojado (Dasberg y Bresler, 1985; Dasberg y Or, 1999).

Comparando con otros tipos de riego, este método presenta varias ventajas, incluyendo conservación del agua e incremento de la productividad. Al respecto, Wu y Gitlin (1983) concluyen que una eficiencia de aplicación del 90 % puede ser alcanzada fácilmente, indicando que un alto porcentaje del agua aplicada llega a la zona radicular y es aprovechado por el cultivo. Sin embargo, Randall y Salvatore (1988), Assaf *et al.*, (1989) y Shrivastava *et al.*, (1994) destacan como desventaja, la falta de conocimiento de los fenómenos involucrados en la distribución del agua en el suelo.

La variación espacial de las propiedades físicas del suelo adiciona modificaciones en la distribución del agua y por tanto en el volumen de suelo mojado, constituyendo un problema en la estimación adecuada del número de goteros y de su localización respecto a las plantas (Clothier *et al.*, 1985; Or, 1996). Thorburn *et al.* (2003) mostraron que existe un amplio rango de patrones de mojado en suelos individuales y que las nociones convencionales relativas al comportamiento promedio del mojado para una determinada textura de suelo no se mantienen cuando se trabaja con suelos específicos. Las propiedades hidráulicas de cada suelo y la estructura son factores que están determinando las dimensiones del bulbo de mojado en suelos de igual textura. Según Cook *et al.* (2003), la textura es un mal predictor de la forma en que se moja un suelo y se requiere información específica sobre los patrones de mojado para el diseño eficiente del sistema de riego

localizado. Además, las pérdidas por percolación por debajo de la zona radicular, reducen la eficiencia del método de riego (Bouwer, 2000, Thorburn *et al.*, 2003). Por tanto es importante el conocimiento del proceso de distribución del agua en el suelo, la comprensión inadecuada del mismo se traduce en el uso incorrecto de esta técnica, generalmente debido al uso de información empírica, obtenidas de la bibliografía y presentadas en forma de tablas, gráficas o fórmulas (Wooding, 1968; Brandt *et al.* 1971; Ben-Asher *et al.*, 1978; Clothier, 1984; Or, 1995; Ould Mohamed El-Hafedh, *et al.*, 2001).

Para la realización de un buen diseño del equipo de riego, es imprescindible contar con una buena estimación de la forma y dimensiones del bulbo húmedo formado a partir de un emisor, ya que esta información permite determinar el número de emisores necesarios para mojar determinado volumen de suelo, así como para establecer su correcta ubicación (Rodrigo, *et al.*, 1992).

La separación entre goteros depende de la descarga de los mismos, el tipo de suelo y tiempo de riego, entre otros factores (Warrick, 1974; Bresler, 1978). Los espaciamientos típicos están entre 0,15 -1,0 m (Randall y Salvadore, 1988; Or, 1995; Revol *et al.* 1997).

Según Rodrigo, *et al.*, (1992), existen tres formas de determinar la forma del bulbo de mojado: uso de modelos, uso de tablas y realización de una prueba de campo.

El uso de modelos, se basa en darle solución a la ecuación general de Richards, que describe el movimiento del agua en un medio poroso no saturado. Los modelos matemáticos existentes son muy complejos y aun estableciendo una serie de restricciones, dan lugar a que sea muy variable su correspondencia con los valores obtenidos en el campo, en especial la de suponer que el suelo es un medio isótropo (Rodrigo *et al.*, 1992). La principal dificultad para la utilización de estos modelos es la de que los diseñadores de riegos localizados no

disponen de los valores de los parámetros del suelo necesarios, ni resulta fácil aplicarlos cuando las propiedades del suelo varían a lo largo del perfil.

El uso de tablas que relacionan la extensión del bulbo húmedo con alguno de los factores que intervienen, generalmente la textura del suelo, no incluyen todos aquellos factores que de alguna forma afectan las dimensiones del bulbo húmedo por lo cual su utilización será más inexacta en la medida que más factores sean ignorados en la elaboración de dichas tablas (Rodrigo *et al.*, 1992).

Las pruebas de campo son el mejor procedimiento para conocer el área mojada por un emisor. Consiste en realizar un ensayo de campo, el cual debe realizarse en condiciones lo más parecidas posibles a las que se presenten posteriormente en el terreno. Las pruebas son fáciles de realizar y de bajo costo, sin embargo no es frecuente que se realice a nivel de diseño (Pizarro, 1990).

En Uruguay gran parte de la producción frutícola, ha incorporado la tecnología del riego localizado. Sin embargo los criterios utilizados en el diseño de los equipos se basan en el uso de información como la citada anteriormente (principalmente tablas) dado que la investigación local acerca del tema es casi inexistente. El único antecedente es de García Petillo (2002), quien realizó 116 mediciones con frecuencia semanal, constatando que el bulbo de mojado, generado por un gotero de $4,0 \text{ lh}^{-1}$, tuvo un desarrollo muy importante en profundidad, mientras que no logró alcanzar un ancho mayor a 1,0 m. Sin embargo, las referencias bibliográficas hasta ahora aceptadas, en el caso de suelos muy estratificados con horizontes subsuperficiales muy arcillosos (horizontes Bt), como ocurre frecuentemente en los suelos del Uruguay, el bulbo mojado por el gotero debería tener un desarrollo horizontal mayor que vertical (Keller y Bliesner, 1990; Pizarro, 1990; Zazueta, 1992).

El objetivo del presente trabajo fue analizar y cuantificar las distintas formas y tamaños de bulbos húmedos, aplicando el agua de riego de diferentes formas: goteros de diferente caudal, y diferentes volúmenes aplicados, en dos suelos de textura contrastante, para generar la información necesaria que permita el correcto diseño y manejo del riego localizado en las condiciones de Uruguay.

2.4. Materiales y métodos

Para realizar el relevamiento de los datos se realizaron los muestreos en dos tipos de instalaciones de riego: equipos de riego comerciales que denominaremos Instalación Tipo 1 y dispositivo portátil de simulación del riego que denominaremos Instalación Tipo 2.

Instalación Tipo 1: En las temporadas 2003-2004 y 2005-2006 se realizaron dos evaluaciones en predios diferentes, un predio comercial en Melilla (34° 47' latitud sur, 56° 16' longitud oeste), y en el Centro Regional Sur (CRS), de la Facultad de Agronomía en la localidad de Progreso (34° 36' latitud sur, 56° 13' longitud oeste). En ambos casos, las características de los suelos eran similares y el cultivo instalado fue un monte de duraznero (*Prunus persica* (L) Batsch) cv. "Dixiland". En cada experimento se detallan cuales fueron los tratamientos realizados.

Instalación Tipo 2: Otro tipo de ensayo se realizó en los años 2007 y 2008, donde se utilizó un dispositivo portátil para aplicar el riego. En el primer año se trabajó en un monte cítrico (limoneros jóvenes) sobre suelo arenoso y en el segundo año en el CRS.

2.4.1. Muestreos en los ensayos de la Instalación Tipo 1:

Sitio 1: Melilla

Monte adulto de duraznero (*Prunus pérsica* (L) Batsch) cv. "Dixiland"

Marco de plantación: 5,5 x 2,2 m.

Tratamientos de riego:

Goterros de 1,6 lh⁻¹, a 0,4 m de espaciamiento;

Goterros de 4 lh⁻¹ a 1,0 m;

Goterros de 2 lh⁻¹ a 1,0 m y con doble línea de goteros separadas 1,0 m

Sin riego

El caudal resultante en los tres tratamientos fue de 4,0 lh⁻¹ por metro lineal, el volumen de agua aplicado a cada planta fue el mismo, variando la disposición de los goteros en la planta.

Tiempos de riego: 3 y 7 horas (fijadas en función de la demanda del cultivo)

Sitio 2: Centro Regional Sur

Monte de duraznero (*Prunus pérsica* (L) Batsch) cv. "Dixiland" de 4 años

Marco de plantación: 4,0 x 2,5 m.

Tratamientos de riego:

Goterros de 1,6 lh⁻¹, a 0,4 m de espaciamiento;

Goterros de 4 lh⁻¹ a 1,0 m y

Goterros de 2 lh⁻¹ a 1,0 m y con doble línea de goteros separadas 0,5 m

Sin riego

Al igual que en el sitio 1 el caudal resultante en los tres tratamientos fue de 4,0 lh⁻¹ por metro lineal.

Tiempos de riego: 2 horas y 3 h 15 minutos (fijados en función de la demanda del cultivo)

Manejo del riego: En ambos sitios el tiempo de riego diario fue fraccionado en tres turnos, con la finalidad de mejorar la distribución del agua en el perfil del suelo, tratando de evitar pérdidas por percolación profunda que en muestreos anteriores se habían detectado.

2.4.2. Caracterización del suelo del ensayo en la Instalación tipo 1:

En ambos sitios (CRS y en Melilla) el suelo predominante corresponde a un Argiudol Páchico, fino esmectítico térmico (Durán *et al.*, 2005), cuyas características se presentan en el Cuadro 1. Dicha caracterización se realizó mediante el análisis en laboratorio de muestras imperturbadas, cuatro por horizonte, con los que se determinó la densidad aparente (DAp) y las curvas de retención de agua, utilizando ollas a presión, según la metodología de Richards(1947). A partir de dichas curvas, se estimó la Capacidad de Campo (CC) como el contenido de humedad medido a $-0,01$ MPa. El Punto de Marchitez Permanente se estimó a partir de la siguiente regresión:

$$\text{PMP} = -5 + \text{CC} \cdot 0,74 \quad (\text{Silva } et al. 1988).$$

Cuadro 1: Características físicas y parámetros hídricos del perfil del suelo del ensayo

Prof.	Horizonte	Textura	DAp	CC	PMP	AD
00 - 20	Ap	Fr. Ac. Lim.	1,16	29,7	16,2	13,5
20 - 42	AB	Fr. Ac.	1,34	32,8	17,6	15,2
42 - +	B textural	Ac.	1,44	33,7	17,8	15,9

Prof.: Profundidad (cm); DAp: Densidad Aparente (gr cm^{-3}); CC: Capacidad de Campo; PMP: Punto de Marchitez Permanente; AD: Agua Disponible (expresados en % en volumen).

Manejo del cultivo: En ambos sitios los arboles se plantaron en camellones. Las entrefilas se conservaban empastadas y la fila se mantuvo libre de malezas mediante aplicaciones de herbicida.

El máximo desarrollo radicular del duraznero en este suelo se da hasta los 0,42 m de profundidad, siendo muy escaso dentro del horizonte B textural.

2.4.3. Muestreos con el dispositivo portátil, Instalación Tipo 2

Se realizaron dos pruebas de campo, una en un suelo predominantemente arenoso y otra en un suelo de textura media, en la temporada 2007 – 2008.

Suelo Arenoso:

Monte joven de limoneros, *Citrus limón* (L)

Tratamientos de riego: Goteros de 1, 2, 4, 6 y 8 lh⁻¹

Tiempos de riego: 1, 2 y 4 horas

Suelo de textura media:

Monte joven de duraznero, *Prunus pérsica* (L) Batsch, cv. "Pavía"

Tratamientos de riego: Goteros de 1, 2, 4, 6 y 8 lh⁻¹

Tiempos de riego: 1, 2, 4 y 6 horas

2.4.4. Caracterización del suelo del ensayo en la Instalación tipo 2:

El suelo de textura media es similar al descrito en la Instalación Tipo 1. El suelo arenoso presenta un horizonte arenoso desde la superficie hasta los 0,80 m, por debajo del cual hay un horizonte arcilloso de muy baja permeabilidad.

Cuadro 2: Características físicas y parámetros hídricos del perfil del suelo arenoso

Profundidad	Horizonte	Textura	D _{Ap}	CC	PMP	AD
0- 80	A	Ar.	1,46	11,1	0,6	10,5
+ 80	C	Ac.	1,43	27,2	12,9	14,2

Prof.: Profundidad (cm); D_{Ap}: Densidad Aparente (gr cm⁻³); CC: Capacidad de Campo; PMP: Punto de Marchitez Permanente; AD: Agua Disponible (expresados en % en volumen).

2.4.5. Descripción del dispositivo portátil:

Se construyó un dispositivo basado en el modelo propuesto por Vermeiren y Jobling (1980), que permitió realizar la prueba de campo aplicando diferentes caudales y volúmenes de agua.

El mismo consta de un depósito de 200 litros, del cual sale una tubería de polietileno de 16 mm de diámetro. El nivel del agua dentro del depósito se mantuvo constante a 0,80m para evitar variación del caudal aplicado por los emisores, por lo cual se contó con dos depósitos de agua auxiliares. Para lograr los diferentes caudales se utilizaron microtubos de diferente longitud y diámetro, los que fueron calibrados a campo para obtener los caudales requeridos. Para los caudales menores se utilizaron microtubos de 1 mm de diámetro aproximadamente, los cuales se fueron cortando hasta lograr los caudales requeridos, a mayor caudal, se requirió menor longitud de tubería. En el caso de los caudales de 6 y 8 lh⁻¹, fue necesario utilizar una tubería de más diámetro, ya que con la carga disponible en el depósito (0,80 m), con los microtubos no se lograron caudales mayores a 4 lh⁻¹.

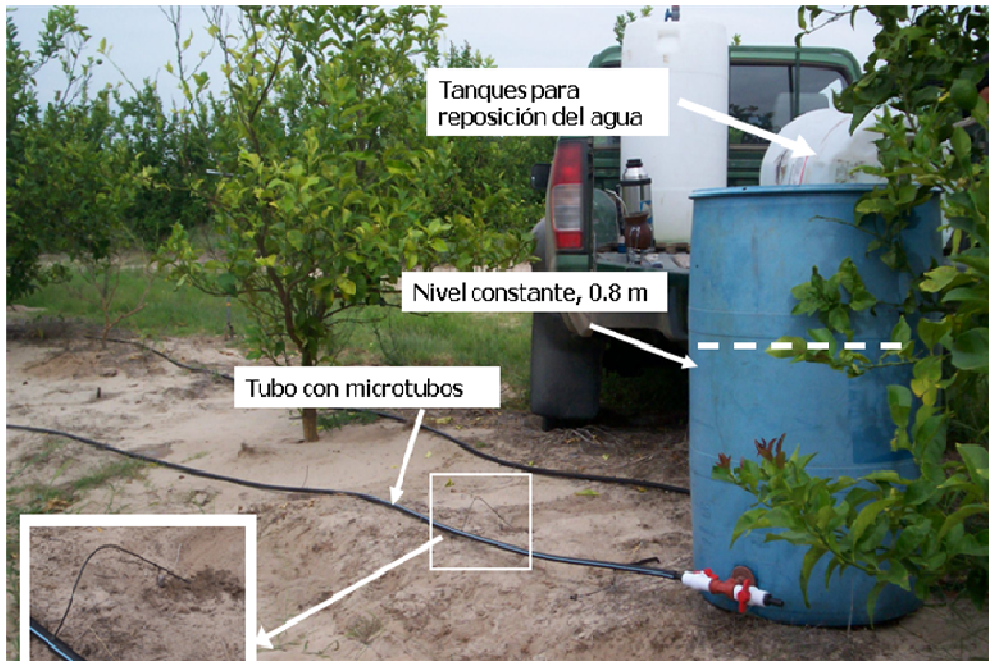


Foto 1: Descripción del dispositivo portátil para la prueba de campo

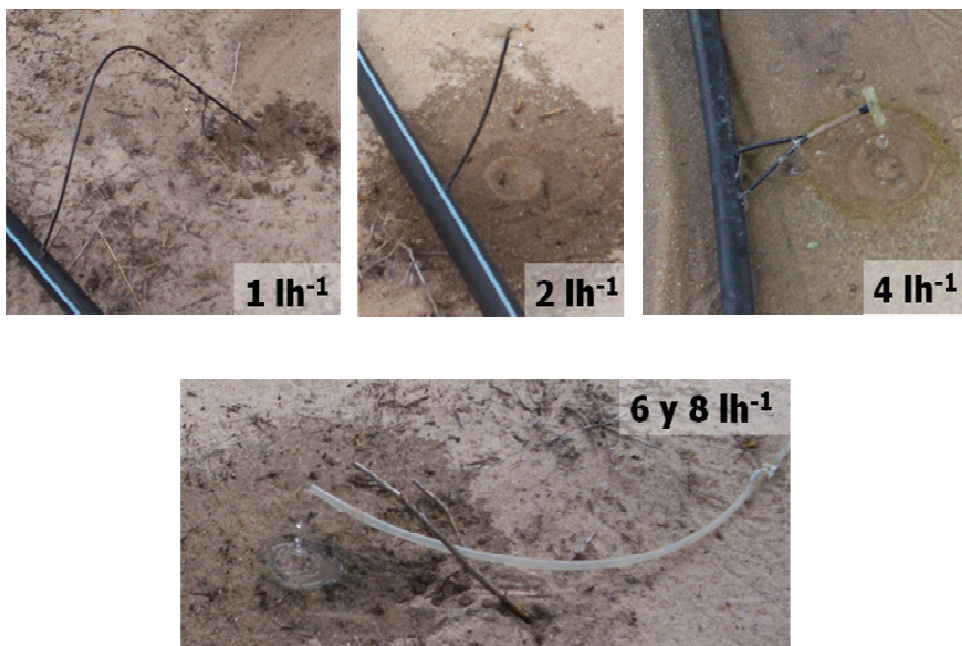


Foto 2: Emisores realizados con microtubos

2.4.6. Determinaciones:

2.4.6.1. Forma y tamaño del bulbo húmedo:

En todos los ensayos se determinó la forma y el tamaño del bulbo húmedo. En los ensayos de la instalación tipo 2, además se midió el charco y la mancha húmeda.

Para determinar la forma, luego de finalizada la aplicación del riego se esperó un tiempo para que el agua se distribuyera en el perfil del suelo, para posteriormente extraer las muestras. Gispert Folch (2005) trabajando con emisores de 4 y 8 $l\ h^{-1}$ en un suelo muy homogéneo de textura franco arenosa, realizaron el muestreo 24 horas luego de finalizado el riego para favorecer la redistribución del agua en el perfil del suelo. En el ensayo se consideraron tiempos de redistribución menores a los citados por Gispert Folch (2005), debido principalmente a diferencias en la textura del suelo y a los caudales utilizados. Este intervalo varió desde 2 horas hasta 20 horas, dependiendo del tiempo de riego y del tipo de suelo (Cuadro 3).

Cuadro 3: Tiempo de espera previo a la extracción de las muestras

Duración del riego (horas)	Tiempo de espera (horas)	
	Suelo arenoso	Suelo Franco Arcilloso
1	2	2
2	2	2
4	18	18
6		20

La forma y tamaño de los bulbos mojados se determinó extrayendo muestras de suelo, a intervalos de profundidad de 0,20 m. En los primeros muestreos la cuadrícula se conformó

por transectas perpendiculares a la línea de goteo, debajo del gotero, en el punto medio entre dos goteros, y en el punto medio entre las dos transectas anteriores. En cada transecta se marcaron sitios a intervalos de 0,20 m desde el gotero hacia ambos lados de la línea. Se utilizaron tantos sitios y profundidades como fue necesario para incluir todo el bulbo húmedo en cada caso. Se constató que los bulbos presentaban simetría en dos sentidos, en la línea y perpendicular a la línea. Por lo tanto muestreos posteriores se realizaron en el sentido de la línea de goteo y perpendicular a la misma, lo cual permitió disminuir el número de muestras (Foto 3).

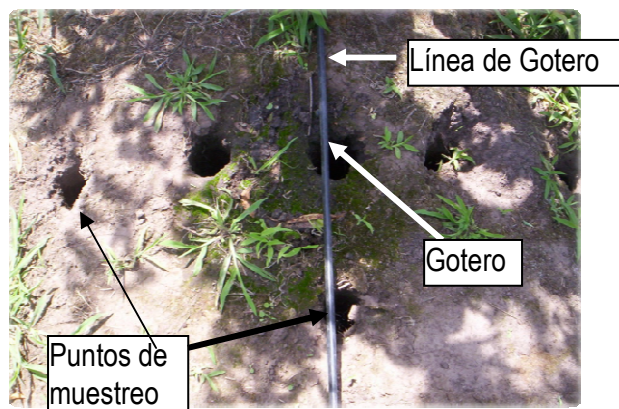


Foto 3 : Ubicación de los puntos de muestreo.

En los primeros muestreos y en el suelo arenoso, para obtener las muestras de campo se utilizó un taladro tipo Holandés. Luego se emplearon caladores, que permitían obtener muestras de menor tamaño, generando menor alteración del sitio muestreado.

El contenido de humedad de las muestras se determinó mediante el método gravimétrico y con el valor de densidad aparente (D_{Ap}) obtenido para cada estrato se calculó el contenido de agua volumétrico (Θ_{vol}).

$$AD (\%) = CC (\%) - PMP (\%)$$

$$\Theta_{vol} = \Theta_{peso} (\%) * DAp.$$

Donde:

AD: Agua disponible

CC: Capacidad de Campo

DAp.: Densidad Aparente (gr/cm³)

PMP: Punto de Marchitez Permanente

Θ_{vol} : contenido de agua volumétrico

Θ_{peso} : contenido de agua en peso

2.4.6.2. *Porcentaje de superficie mojada*

Se estimó el porcentaje de superficie mojada considerando la superficie mojada por los emisores a una profundidad de 0,30 m, zona de mayor actividad radicular, con respecto a la superficie ocupada por la planta considerando un monte adulto. La superficie ocupada por la planta se calcula como la proyección horizontal de la cubierta vegetal medida al mediodía.

Las estimaciones se realizaron suponiendo que los emisores forman una banda mojada continua cuyo ancho es el diámetro de mojado del bulbo individual. En ambas evaluaciones (con instalación Tipo 1 y Tipo 2), el cultivo considerado fue un monte adulto de duraznero.

2.4.7. *Análisis de los datos:*

Los datos de contenido de humedad de cada muestra, se expresaron como porcentaje del agua disponible en ese horizonte. Los mismos se graficaron utilizando el programa SURFER versión 8, para interpolar los datos de humedad, obteniéndose las líneas isohídricas con lo cual se delimitaron los bulbos de mojado para cada tratamiento. Para

comparar el alcance de la zona húmeda, se fijó como límite arbitrario del bulbo húmedo un contenido de humedad igual al 80 % del agua disponible. Este tipo de análisis sólo permite diferenciar los tratamientos cualitativamente por lo cual no se realizó ningún análisis estadístico de los datos.

El programa SURFER, posee varios métodos de interpolación de datos, siendo el método kriging el que se utiliza por defecto y que permite graficar las isolíneas de contenido de humedad en el perfil del suelo.

2.5. Resultados y discusión

2.5.1 Desarrollo del bulbo húmedo en los Ensayos con Instalación Tipo 1:

2.5.1.1. Sitio 1: Melilla

En la Figura 1 se observa como fue la distribución del agua en el perfil del suelo para cada tratamiento y para los dos tiempos de riego, 3 y 7 horas.

En dichas figuras el eje horizontal representa la superficie del terreno, siendo el valor de 0 donde se ubica el gotero, el eje vertical indica las profundidades de muestreo (en cm), y las líneas representan los contenidos de humedad como proporción del agua disponible, obtenidas con el programa SURFER 8.0.

En el tratamiento con goteros de $1,6 \text{ lh}^{-1}$ a 0,40 m de distancia, el desarrollo del bulbo fue de 0,70 m de diámetro, cuando se regó durante 3 horas, y no se modificó al aumentar el tiempo de riego a 7 horas. Sin embargo las pérdidas por percolación profunda fueron mayores al aumentar el tiempo de riego (Figura 1.a), coincidiendo con Pizarro (1990) y Bresler (1978) quienes indican un mayor movimiento vertical del agua al aumentar el tiempo de riego afectando muy poco el desarrollo horizontal de la zona mojada.

Las pérdidas por percolación profunda, disminuyen la eficiencia de aplicación del método ya que parte del agua que se supone está en la zona radicular, en realidad se encuentra por debajo, y no es aprovechado por el cultivo. Además el uso de fertilizantes en el agua de riego, práctica comúnmente realizada con este sistema de riego, lleva al lavado de los mismos a capas más profundas, aumentando el riesgo de contaminación de aguas subterráneas.

Koenig (1997), citado por Assouline (2002), a partir de observaciones de campo indica que utilizando emisores de bajo caudal (menores a 2 lh^{-1}), no se forma la zona de suelo saturado y que el volumen de suelo húmedo es más grande comparado con emisores de mayor caudal. Estas observaciones no coinciden con lo observado en este estudio, ya que el tratamiento de bajo caudal ($1,6 \text{ lh}^{-1}$), formó una zona saturada debajo del gotero y a pesar de que la cantidad aplicada a cada planta era la misma, el volumen de suelo húmedo fue menor que el obtenido con los emisores de mayor caudal.

En la Figura 1.b, correspondiente al tratamiento de goteros de 4 lh^{-1} a 1,0 m de separación, el bulbo húmedo en la zona radicular (0 a 0,42 m de profundidad) alcanza un máximo de 0,70 m con un tiempo de riego de 3 horas. Al aumentar el tiempo de aplicación a 7 horas el bulbo húmedo aumenta a 1,10 m. En ambas situaciones se pierde agua por percolación profunda, por debajo de la zona radicular. Estos resultados no son coincidentes con los propuestos por Keller (1978) y Karmeli *et al.*, (1985), quienes indican diámetros de mojado superiores a 1,25 m en esta situación.

En el tratamiento con doble línea con goteros de 2 lh^{-1} a 1,0 m con 3 horas de riego, el bulbo húmedo individual desarrollado no sobrepasó los 0,30 m de ancho, por lo cual entre las dos líneas el suelo se mantuvo seco (Figura 1.c). Al aumentar las horas de riego, se obtuvo

un bulbo húmedo de aproximadamente 0,70 m de ancho, pero no se logró un adecuado contacto entre ellos, lo cual difiere de lo expuesto por Karmeli *et al.* (1985) quienes indican diámetros de mojado de al menos 1,0 m para este caudal en suelos de textura media a fina.

La superficie mojada en relación a la superficie ocupada por el árbol, fue superior en el tratamiento de 4 lh⁻¹ con 7 horas de riego (36 %). En el tratamiento de 1,6 lh⁻¹ no hubo un aumento del porcentaje de superficie mojada (20 %) al aumentar el tiempo de riego, sin embargo aumentaron las pérdidas de agua por percolación profunda. El tratamiento de doble línea, con 3 horas de riego no logró mojar a los 0,30 m de profundidad como se puede ver en la Figura 1.c. Al aumentar el tiempo de riego a 7 horas, se consigue un 27 % de superficie mojada, sin embargo con goteros de 2 lh⁻¹ separados 1,0 m entre goteros y entre líneas, no se logra un adecuado solapamiento de los bulbos mojados como se puede observar en la Figura 1.c. Esta situación no es aconsejable, debido a que la zona seca ubicada entre los bulbos de mojado representan una barrera al crecimiento de las raíces ya que en esa zona habrá poca humedad y mayor concentración de sales (Pizarro, 1990).

Cuadro 4: Porcentaje de suelo mojado, medido a los 0,30 m de profundidad en el suelo del sitio 1 (Melilla)

Tratamiento	Porcentaje de mojado	
	3 horas de riego	7 horas de riego
1,6 lh ⁻¹	20	20
4 lh ⁻¹	21	36
2 lh ⁻¹ doble línea	0	27

Los valores de porcentaje de suelo mojado obtenidos (Cuadro 4), son los recomendados por Keller y Bliesner, (1990) para climas húmedos. Sin embargo se ha comprobado que en regiones con abundantes lluvias, el porcentaje de mojado debe ser mayor debido a que las raíces se extienden más allá de la zona mojada, y la respuesta de las

plantas varía directamente con el aumento del área mojada (Koo, 1978 y 1985; Koo y Smajstrla, 1984 y 1985; Zekri y Parsons, 1988, Gispert Folch, 2005).

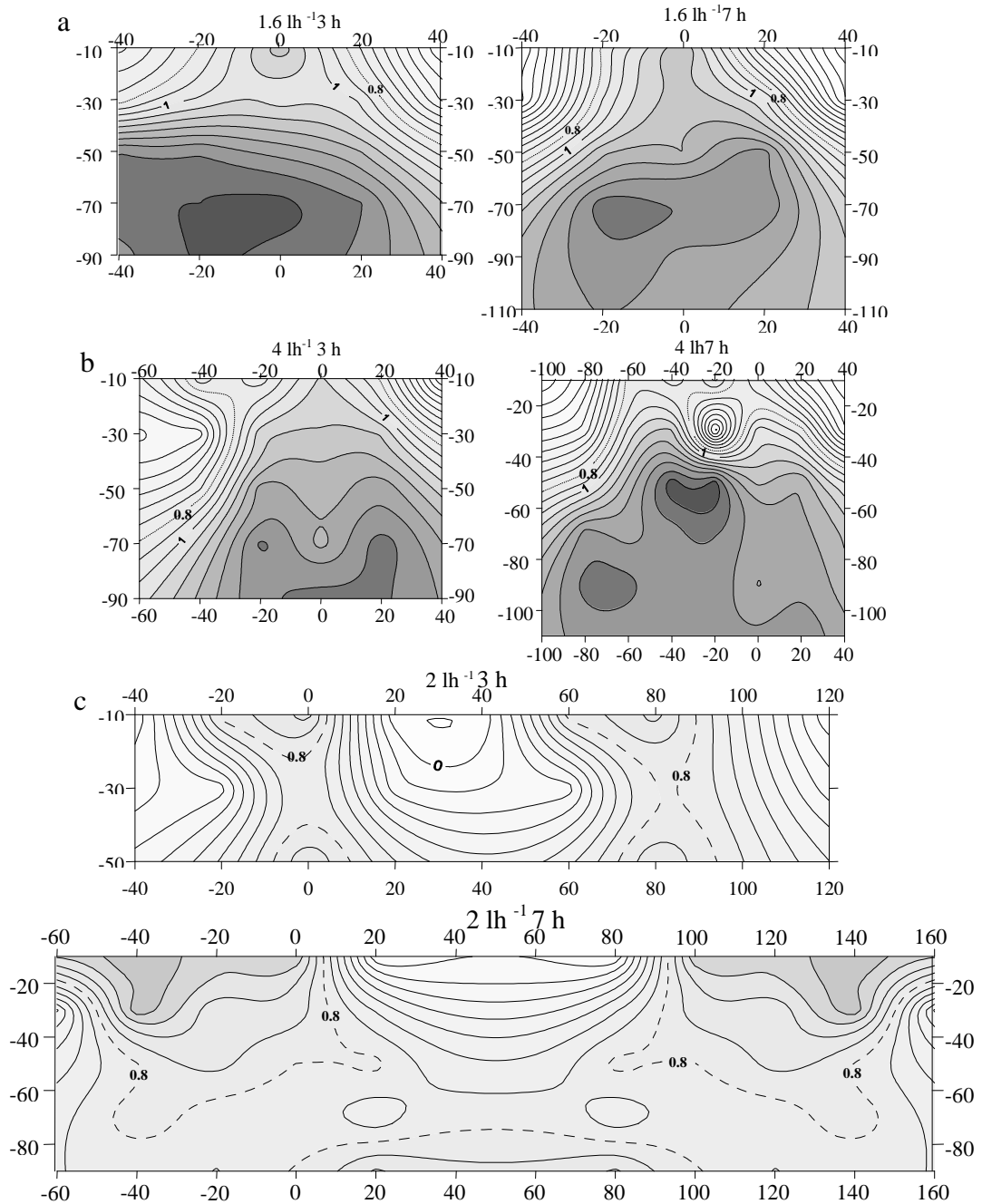


Figura 1: Distribución del agua en el suelo en el suelo del sitio 1 (Melilla) con tiempos de riego de 3 y 7 horas. a) goteros de 1,6 lh⁻¹, b) goteros de 4 lh⁻¹, c) goteros de 2 lh⁻¹ en doble línea. El gotero se encuentra en el punto 0, en a) y b) y en los puntos 0 y 100 en c). La línea punteada representa el contenido de humedad correspondiente al 80 % del agua disponible.

2.5.1.2. Sitio 2: Centro Regional Sur

En la figura 2 se muestran los perfiles de humedad obtenidos en los ensayos de riego en el sitio 2 (CRS), con tiempos de riego de 2 y 3 horas 15 minutos

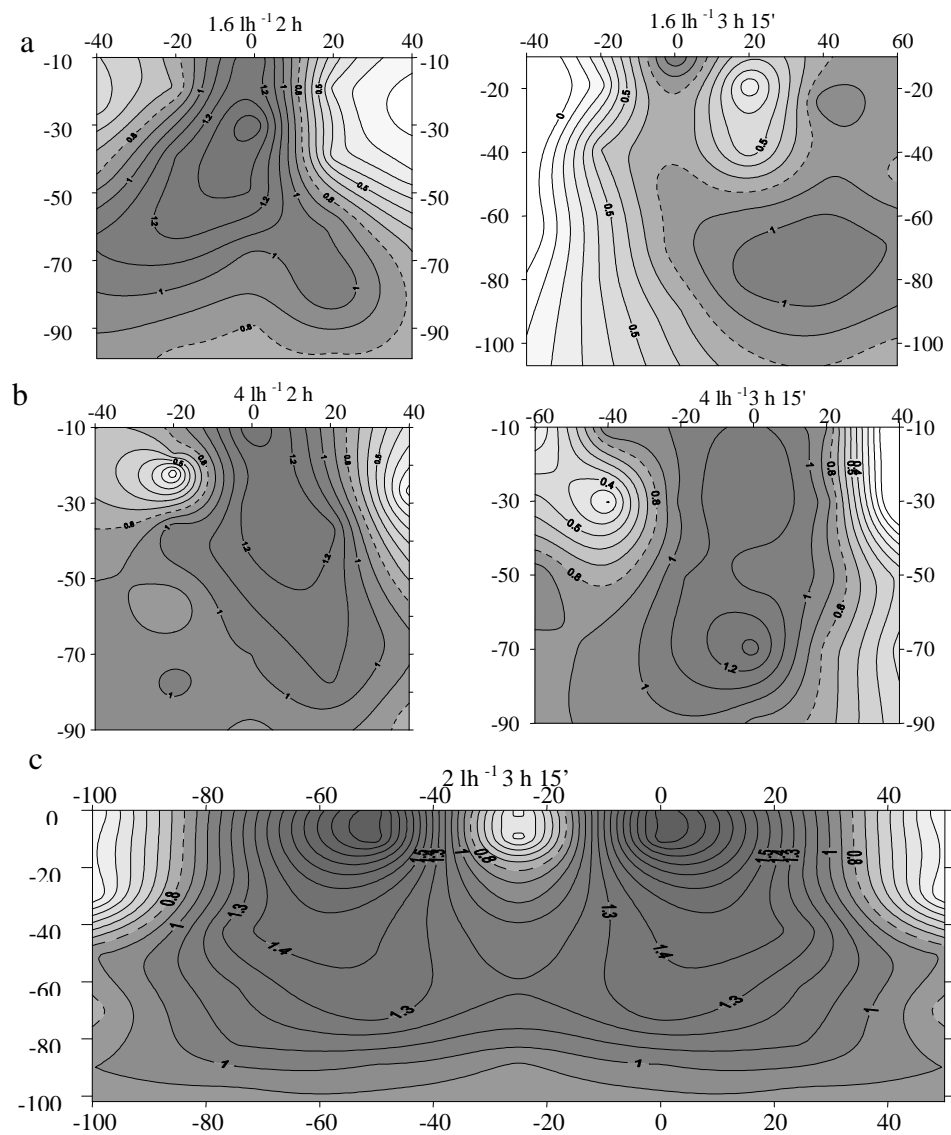


Figura 2: Distribución del agua en suelo del sitio 2 (CRS) con tiempos de riego de 2 horas y 3 h 15'. a) goteros de 1,6 lh⁻¹, b) goteros de 4 lh⁻¹, c) goteros de 2 lh⁻¹ en doble línea. El gotero se encuentra en el punto 0, en a) y b) y en los puntos 0 y 50 en c). La línea punteada representa el contenido de humedad correspondiente el 80 % del agua disponible.

Con emisores de $1,6 \text{ lh}^{-1}$ los diámetros de mojado no superan los 0,50 m en la profundidad radicular (aprox. 0,42 m) cuando se regó por 2 horas. El incremento de las horas de riego no se tradujo en mayor área mojada, por el contrario disminuyó la misma debido al mayor consumo por parte del cultivo. Esto muestra que el ajuste del tiempo de riego no fue suficiente para compensar el aumento de las necesidades del cultivo y por ello el suelo se estaba secando.

Con emisores de 4 lh^{-1} , los diámetros de mojado no superan los 0,70 m con 2 horas de riego. Al igual que en el caso anterior el incremento de las horas de riego no se tradujo en mayor área mojada por el mayor consumo del cultivo.

En ambos casos, a pesar de que el suelo se estaba secando en el horizonte superior, existió pérdida de agua por percolación profunda, disminuyendo la eficiencia de aplicación del sistema de riego ya que la misma no es aprovechada por el cultivo.

Estos resultados no concuerdan con los encontrados por Quezada *et al.*, (2005) quienes midieron, en suelos profundos de textura franco arcillosa, bulbos de 1,32 m de diámetro y 0,90 m de profundidad utilizando goteros de 4 lh^{-1} y tiempo de riego de 2 horas. Esto muestra que la textura del suelo, por sí sola es un mal predictor de la forma final del bulbo húmedo (Thorburn *et al.* 2003).

En el caso del tratamiento de doble línea (separadas 0,50 m entre sí) con goteros de 2 lh^{-1} , separados 1,0 m, únicamente se evaluó con 3 horas 15' de riego. Se obtuvo un diámetro de mojado de 1,10 m, logrando un buen contacto entre los bulbos húmedos. Esto no se había logrado en el sitio 1 (Melilla) debido a la mayor separación existente entre las líneas de goteros (1,0 m).

Cuadro 5: Porcentaje de suelo mojado, medido a los 0,30 m de profundidad, en el suelo del sitio 2 (CRS)

Tratamiento	Porcentaje de mojado	
	2 horas de riego	3 h 15' de riego
1,6 lh ⁻¹	16	16
4 lh ⁻¹	23	23
2 lh ⁻¹ doble línea	-	37

A pesar de la similitud entre los suelos en ambos sitios, podría esperarse que los tratamientos con 3 horas y 3 horas 15 minutos presentaran cierta similitud en los perfiles de humedad, sin embargo esto no ocurrió. Las causas fueron varias, entre ellas forma del camellón en las filas de los árboles, más marcado en el sitio 2 y más aplanado en el sitio 1 hicieron que la distribución el agua de riego en el sitio 2 fuera más asimétrica, mojando más el lado donde se ubicó el gotero. El momento en que se realizó el muestreo también fue diferente y por tanto la extracción de agua por los cultivos fue diferente, asociado a esto, como ya fue mencionado, en el sitio 2 existió un desajuste entre la cantidad de agua aportada por el riego y la consumida por el cultivo, notándose una disminución del volumen de suelo mojado causado por el mayor consumo de la planta.

Lo que si se reitera en ambos casos, es el flujo de agua a zonas por debajo de las raíces disminuyendo la eficiencia del método de riego.

2.5.2 Desarrollo del bulbo húmedo en los ensayos con instalación tipo 2

2.5.2.1. Suelo Arenoso

En el siguiente cuadro se presentan los datos de diámetro del charco y de la mancha húmeda obtenidos en el suelo arenoso.

Cuadro 6: Diámetro del charco y de la mancha húmeda (en m), en función del caudal del emisor y del tiempo de aplicación

Tiempo de aplicación	Caudal de emisión									
	1 l/h		2 l/h		4 l/h		6 l/h		8 l/h	
	charco	mancha	charco	mancha	charco	mancha	charco	mancha	charco	mancha
1 hora	-	0,12	-	0,22	0,05	0,32	0,05	0,33	0,05	0,40
2 horas	-	0,24	0,035	0,28	0,07	0,39	0,04	0,29	0,07	0,29
4 horas	-	0,18	-	0,24	-	0,31	0,04	0,30	0,045	0,31

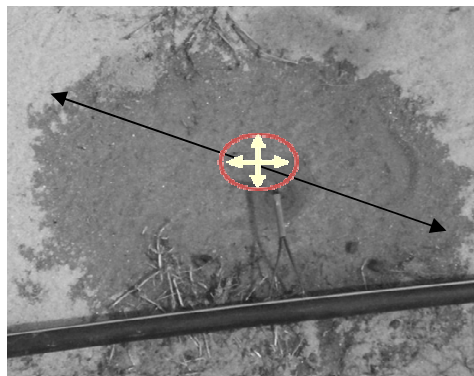


Foto 4: Charco y mancha húmeda en suelo arenoso

En los caudales menores (1 y 2 l h^{-1}), no llegó a formar charco debido a la baja pluviometría del riego y a la alta infiltración del suelo arenoso. Para el caso de caudales mayores las dimensiones del charco no superaron los $0,07 \text{ m}$. En el caso de la mancha

húmeda varió desde 0,12 m, con el menor caudal y tiempo de riego, hasta 0,40 m con el mayor caudal. Al respecto, la bibliografía cita para el caso de un suelo arenoso y emisores de 4 lh^{-1} , diámetros de la zona saturada de hasta 0,10 m para tiempos de aplicación mayores a 1 hora (Bresler, 1977, citado por Rodrigo *et al*, 1992).

Cabe mencionar que estas dimensiones son afectadas directamente por el estado de la superficie sobre la cual cae el agua, especialmente por el microrelieve del sitio. Por esta razón es que en algunos casos el diámetro del área mojada fue superior con 2 horas de riego respecto a 4 horas de riego. También se dio el caso en que para un caudal mayor las dimensiones fueron menores que con uno de menor caudal (4 y 6 lh^{-1}). Estas diferencias hacen que los bulbos húmedos sean levemente superiores en el de menor caudal. En la figura 3 se presentan los bulbos húmedos obtenidos con el dispositivo portátil en el suelo arenoso. Es de notar el efecto que tuvo la presencia de un horizonte arcilloso a los 0,80 m de profundidad, que asociado a la alta velocidad de infiltración del horizonte arenoso, favoreció un rápido ascenso del agua de riego generando una saturación local de corta duración, como puede observarse en la mayoría de los tratamientos (Figura 3).

La alta permeabilidad de la arena generó bulbos húmedos de mayor extensión vertical y escaso desarrollo horizontal (Figura 3 y Cuadro 7).

En general el diámetro de mojado no superó los 0,60 m, lo cual difiere con Karmeli *et al.*, 1985, quienes expresan que a caudales crecientes, el diámetro se incrementa en forma lineal, llegando a 1,2 m en el caso de emisores de 8 lh^{-1} . La excepción es el tratamiento de 4 lh^{-1} con 2 horas de riego, que generó un bulbo húmedo de 0,80 m de diámetro, lo cual fue debido al mayor desarrollo del charco, como fue mencionado anteriormente.

Thabet y Zayani (2008), trabajando en un suelo franco arenoso determinaron bulbos de hasta 0,72 m de diámetro de mojado (medido a los 0,20 m de prof.) con goteros de 4 lh^{-1} con tiempo de aplicación de 4 horas, sin embargo obtuvieron profundidades de mojado de 0,50 m, netamente inferiores a los obtenidos en el presente ensayo. Probablemente las diferencias son debidas a que el suelo del ensayo presenta un mayor porcentaje de arena, respecto al suelo con el que trabajaron estos investigadores.

También, Badr (2007) determinó en un suelo profundo de textura arenosa, bulbo de mojado de 0,30 m de ancho y 0,70 m de profundidad, trabajando con goteros de 4 lh^{-1} , observando suelo casi seco por debajo de los 0,50 m de profundidad.

En el tratamiento con 4 horas de riego, que tuvo un tiempo de espera fue de 18 horas entre el fin del riego y la extracción de las muestras, dio como resultado, en el caso de los caudales menores (1 y 2 lh^{-1}), un patrón de mojado indefinido, y en el caso de los caudales mayores, si bien se observa un patrón de mojado definido, posiblemente las dimensiones habrían sido mayores a las medidas. Esta variación del volumen de suelo húmedo se debió por un lado al movimiento del agua guiada por la gravedad y por otro lado a la evaporación desde la superficie del suelo y al consumo por parte del cultivo instalado (limoneros jóvenes). El fenómeno de ascenso del agua de riego con saturación local, que se observó en algunos tratamientos, no se registró en este caso, posiblemente porque el tiempo transcurrido desde el final del riego hasta la extracción de las muestras fue suficiente para que el agua infiltrara a capas más profundas.

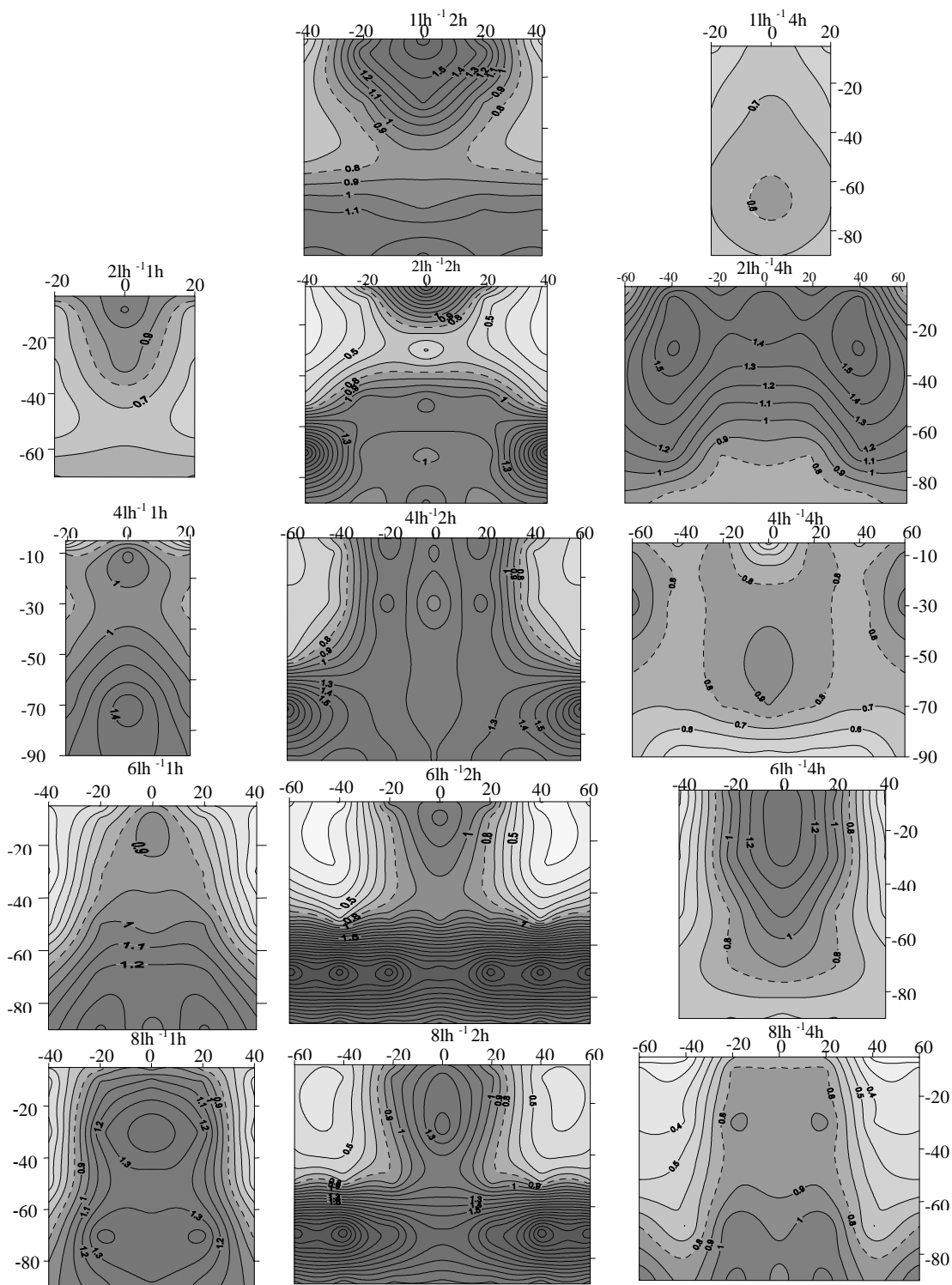


Figura 3: Distribución del agua en suelo arenoso con emisores de de 1, 2, 4, 6 y 81h⁻¹ y para tiempos de aplicación de 1, 2 y 4 horas El gotero se encuentra en el punto 0, la línea punteada representa el contenido de humedad correspondiente al 80% del agua disponible.

Cuadro 7: Cuadro resumen, dimensiones del bulbo húmedo en suelo arenoso

Caudal (l/h)	Tiempo de riego (horas)					
	1		2		4	
	Diám.(m)	Prof. (m)	Diam. (m)	Prof. (m)	Diám. (m)	Prof. (m)
1	0,20	0,30	0,60	0,5	**	**
2	0,30	0,40	0,40	*	**	**
4	0,40	*	0,80	*	0,60	*
6	0,40	*	0,40	*	0,60	*
8	0,60	*	0,60	*	0,60	*

* en estos casos hubo ascenso del agua de riego(saturación local), causado por la presencia del horizonte arcilloso a partir de los 0,80 m de profundidad

** patrón de mojado indefinido

2.5.2.2. Suelo Franco Arcilloso

En el siguiente cuadro se presentan los datos de diámetro del charco y de la mancha húmeda obtenidos en el suelo franco arcilloso. En la mayoría de los casos la mancha húmeda formada fue asimétrica, por lo cual se tomaron dos medidas, esto fue debido a imperfecciones de la superficie donde se realizó el ensayo y que ocurren en situaciones normales de campo.

El contenido de humedad del suelo previo al inicio del riego, se estaba por debajo del contenido a capacidad de campo, en toda la profundidad del suelo. En los primeros 0,30 m de profundidad el contenido de agua disponible fué menor a 0 % (menor al Punto de Marchitez Permanente) y por debajo de los 0,40 m fue 50 % de AD (Figura 4). Esta situación llevó a que, después del riego, el contenido de humedad apenas superara los 20-30 % del agua disponible en la zona mojada por los emisores. Por esta razón los bulbos de mojado se determinaron fijándose como límite un contenido de humedad de entre 10 y 20 % del agua disponible, porque se consideró que fue debido al agua aplicada.

Cuadro 8: Diámetro del charco y de la mancha mojada (en m), en función del caudal del emisor y del tiempo de aplicación, para el suelo franco arcilloso

Tiempo de aplic.	Caudal de emisión									
	1 l/h		2l/h		4 l/h		6 l/h		8 l/h	
	Charco	Mancha	Charco	Mancha	Charco	Mancha	Charco	Mancha	Charco	Mancha
1 hora	0,07	0,24	0,075	0,26	0,10	0,29	0,12	0,40	0,15	0,43
		0,35*		0,28*		0,35*		0,46*	0,17*	0,53*
2 horas	0,10	0,31	0,10	0,29	0,10	0,42	0,15	0,40	0,18	0,39
		0,35*		0,30*		0,45*		0,49*		0,40*
4 horas	0,15	0,27	0,125	0,28	0,10	0,32	0,15	0,42	0,42	0,40
							0,20*	0,40*	0,22*	0,78*
6 horas	0,09	0,26	0,12	0,24	0,15	0,30	0,31	0,48	0,20	0,38
	0,15*	0,30*					0,38*	0,63*	0,40*	0,62*

*cuando la zona mojada fue ovalada

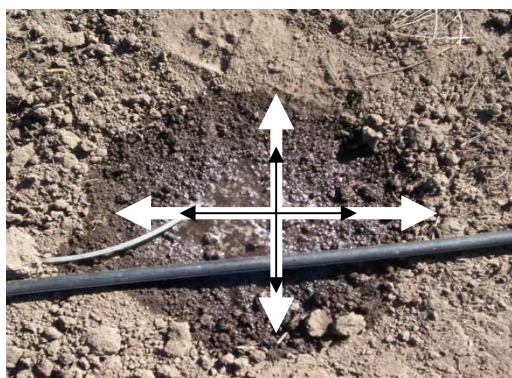


Foto 5: Charco y mancha húmeda en suelo franco arcilloso

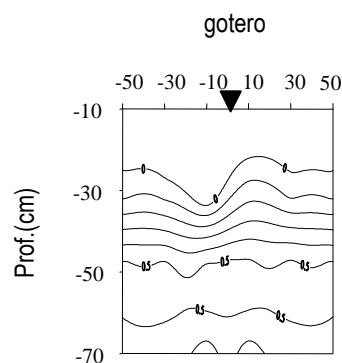


Figura 4: Curvas isohídricas previo al inicio del riego, en el suelo franco arcilloso

Debido al bajo contenido de humedad del suelo previo al inicio del riego, el tratamiento con caudal 1 lh^{-1} y 1 hora de riego, generó una zona húmeda reducida, modificando muy poco el perfil de humedad inicial. Según la bibliografía debajo del gotero se forma una zona saturada a partir de la cual se genera toda una zona húmeda con diferentes contenidos de agua (Pizarro, 1990), y teóricamente, la zona mojada debería alcanzar la capacidad de campo, aún con pequeños volúmenes de agua aplicados, lo cual no se constató en los suelos del ensayo.

Con el aumento del tiempo de riego se obtiene mayor volumen de suelo mojado tanto en extensión horizontal como vertical, siendo este último de mayor magnitud, por lo cual empieza a darse el fenómeno de acumulación de agua en capas profundas del suelo. A partir de los 0,50 m de profundidad el contenido de humedad fue de 80 % del AD, formándose un horizonte, de espesor variable, con contenido de agua a capacidad de campo (100 % del AD) y en algunos casos agua libre. Este fenómeno se observó incluso con emisores de bajo caudal y tiempos de aplicación reducidos (Figura 5).

Según la bibliografía, en este tipo de suelos, la presencia de estratos de menor permeabilidad (por mayor contenido de arcilla), generan un bulbo húmedo de mayor extensión horizontal que vertical, ya que cuando el agua llega a la arcilla, el agua penetra inmediatamente en ella, pero a una menor velocidad, provocando una acumulación en el estrato superior. No se encontraron, en la revisión bibliográfica, trabajos en los cuales ocurra el flujo preferencial del agua a estratos profundos, con escaso desarrollo horizontal, como los ocurridos en este ensayo.

En suelos no saturados, el movimiento del agua está gobernado por los potenciales gravimétricos y mátrico. Las fuerzas que originan el potencial mátrico (adhesión y cohesión) son de una magnitud muy superior a la gravedad excepto si el contenido de humedad es muy alto, por lo que, salvo en suelos muy húmedos, el agua se mueve según gradientes de potencial mátrico (Pizarro, 1990). Una posible explicación es que, con el riego por goteo se genera una zona de suelo saturado debajo del gotero, donde según la teoría el movimiento del agua estaría gobernado por potenciales de gravedad que conducen el agua a los horizontes más profundos hasta alcanzar el horizonte B de menor permeabilidad, generando los perfiles de mojado observados en las pruebas de campo (figura 5). Al mismo tiempo se daría el movimiento horizontal gobernado por potenciales de matriz.

Otra posible hipótesis, sería la presencia de galerías creada por animales o raíces muertas, que provoquen el flujo preferencial hacia abajo, sin embargo esta suposición queda descartada ya que el fenómeno no ocurre en casos aislados sino que se repite en todos los tratamientos. Otro factor que puede estar afectando este flujo vertical del agua es la conductividad hidráulica del suelo, probablemente el mayor contenido de macroporos en el horizonte superficial, hace que la conductividad hidráulica, en condiciones de saturación sea más alta que en el horizonte subsuperficial. Asociado a lo anterior, el tipo de estructura del suelo, también podría favorecer dicho movimiento, en el caso de estructura prismática o columnar, el espacio entre los agregados tendrían cierta orientación vertical. En el presente ensayo no se realizó un análisis de la estructura (tipo) de los agregados, ni se realizaron medidas de conductividad hidráulica, por lo cual no podemos concluir acerca de esta hipótesis.

A partir de las gráficas se delimitó el área mojada y se determinó el diámetro del bulbo a los 0,30 m de profundidad (Cuadro 9).

Cuadro 9: Diámetro del bulbo húmedo en suelo franco arcilloso, en función del caudal del emisor y del tiempo de riego

Caudal	Diámetro del bulbo húmedo (m)			
	Tiempo de riego			
	1 hora	2 horas	4 horas	6 horas
1 lh ⁻¹	-	0,40	0,40	0,60
2 lh ⁻¹	0,40	0,40	*	0,70
4 lh ⁻¹	0,30	0,50	0,90	1,00
6 lh ⁻¹	0,40	0,80	0,70	1,00
8 lh ⁻¹	0,40	0,80	0,70	1,20

Las dimensiones del bulbo húmedo, fueron inferiores a lo que indica la bibliografía, en el caso de emisores de 4 lh⁻¹ el diámetro de mojado varió entre 0,30 y 1,0 m para el rango de tiempos utilizados en el ensayo. Quezada *et al.* (2005) midió bulbos de mojado de 1,32 m de diámetro con 2 horas de riego y de 1,04 m con 1 hora de riego trabajando con suelos de textura franco arcilloso, estos valores difieren ampliamente de los obtenidos en este trabajo. Según Keller (1978), con un caudal de 4 lh⁻¹, suelo estratificado y textura media, el diámetro de mojado debería ser de 1,25 m.

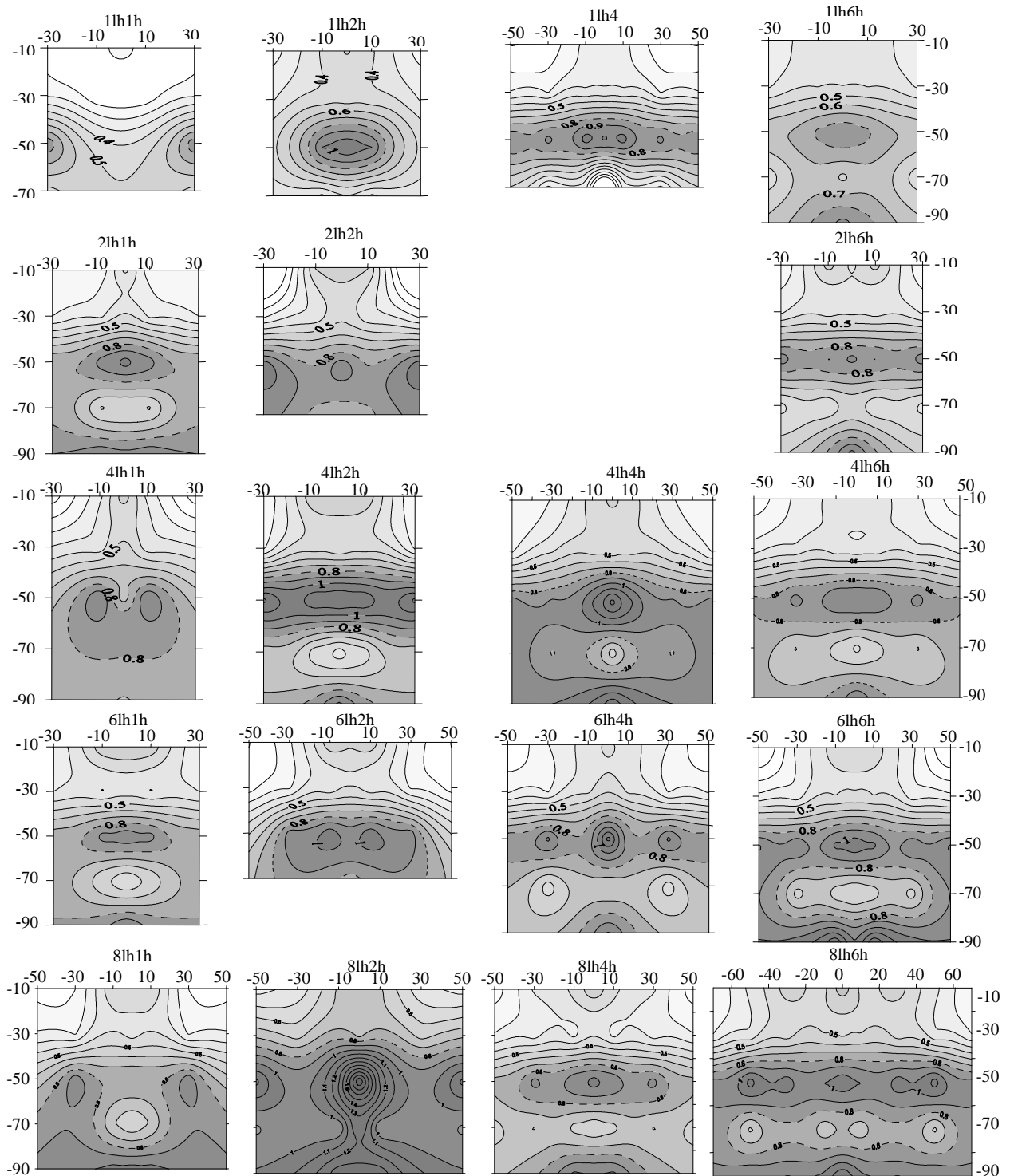


Figura 5: Distribución del agua en suelo franco arcilloso con emisores de 1, 2, 4, 6 y 8 lh^{-1} y tiempos de aplicación de 1, 2, 4 y 6 horas. El gotero se encuentra en el punto 0, la línea punteada representa el contenido de humedad correspondiente al 80% del agua disponible.

El tiempo de espera entre el final del riego y el inicio del muestreo, no fue suficiente en el caso de caudales de 6 y 8 $l\ h^{-1}$, 2 horas de riego y 2 horas pre-muestreo, ya que se observó agua libre a los 0,50 m de profundidad (agua disponible superior a 100 %).

El aumento de la humedad del horizonte profundo (por debajo de los 0,40 m) y en algunos casos, acumulación de agua libre implica una menor eficiencia de aplicación, debido a que parte del agua queda por debajo de las raíces. Esta situación es importante principalmente en el caso de cultivos recién instalados cuya exploración radicular es escasa y los volúmenes de agua son reducidos (bajos requerimientos del cultivo), ya que parte de ese volumen de agua se pierde en profundidad y el cultivo empieza a sufrir estrés hídrico. Esta situación ya fue constatada en ensayos de riego llevados a cabo por la Unidad de Hidrología, en montes jóvenes de duraznero, regados con riego localizado, cuyas necesidades netas fueron calculadas considerando una eficiencia de aplicación del 90 %, que es la citada en la mayoría de los manuales de riego localizado.

Es conveniente la realización de nuevos ensayos, similares a este, agregando medidas de conductividad hidráulicas y observación del tipo de estructura, de los diferentes estratos del suelo, que permitan explicar el flujo de agua hacia los estratos más profundos.

2.6. Conclusiones

En los suelos estratificados y pesados, típicos de la zona frutícola sur del Uruguay, se detectó que:

- Los patrones de mojado fueron diferentes a los esperados de acuerdo a la bibliografía, se obtuvieron menores diámetros de mojado en todos los casos.
- El ancho de la banda mojada fue menor a lo esperado, y en situaciones de riego tal cual lo manejan los productores, muchas veces no llegan a solaparse los bulbos mojados.
- El incremento de las horas de riego, provocó un aumento del volumen de suelo mojado.
- Como consecuencia del aumento del tiempo de riego se incrementaron las pérdidas por percolación, que disminuyeron la eficiencia de aplicación del método ya que parte del agua aplicada no fue aprovechada por el cultivo.
- Existe un flujo preferencial del agua hacia capas profundas, aún con tiempos de aplicación cortos y emisores de bajo caudal.

En suelos arenosos con horizonte de menor permeabilidad a los 0,80 m de profundidad se observó que:

- Para caudales bajos los diámetros de mojado se aproximaron a los citados en la bibliografía

- Para caudales altos la bibliografía cita diámetros mayores a los obtenidos en este trabajo
- Se registraron pérdidas por percolación profunda, la cual no es citada en la bibliografía ni siquiera para caudales mayores a 8 lh-1

Estos resultados indican que se debe continuar esta línea de investigación con el fin de ampliar la información que permita desarrollar modelos matemáticos validados localmente. Se deberá ajustar la metodología de investigación, ajustando los tiempos de espera entre la finalización de la aplicación del riego y el inicio de la extracción de muestras, será necesario realizar medidas de conductividad hidráulica vertical y horizontal de los diferentes horizontes del perfil del suelo, así como una descripción del tipo de estructura presente en los suelos bajo estudio. La incorporación de estos parámetros permitiría dar una mejor explicación del flujo preferencial del agua en profundidad que fue observado en los suelos del ensayo.

2.7. Bibliografía

- Assaf R, Levin I, Bravdo BA.** 1989. Optimization of water for fruit trees by a computerized irrigation system. *Agronomy Journal*. 9: pp. 451 – 456.
- Assouline S.** 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Science Society of American Journal*. 66: pp. 1630-1636
- Badr MA.** 2007. Spatial distribution of water and nutrients in root zone under surface and subsurface drip irrigation and cantaloupe yield. *World Journal of Agricultural Sciences*. 3 (6): pp. 745-756.
- Ben-Asher J, Lomen DO, Warrick AW.** 1978. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of American Journal* 42: pp. 3 - 6.
- Bouwer H.** 2000. Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*. 45: pp. 217 – 228.
- Brandt A, Bresler E, Diner N, Ben-Asher J, Heller J, Goldberg D.** 1971. Infiltration from a trickle source. I. Mathematical models. *Soil Science Society of American Proceedings*. 35: 675 – 683.
- Bresler E.** 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*. 1: pp. 3 – 17.
- Clothier BE, Scotter DR, Harper ER.** 1985. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. *Transactions of the ASAE*. 28: pp. 497 - 501.
- Clothier BE.** 1984. Solute travel times during trickle irrigation. *Water Resource Research*. 20: pp. 1848 – 1852.
- Cook FJ, Thorburn PJ, Fitch P, Bristow KL.** 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. *Irrigation Science*. 22: pp. 129-134
- Dasberg S, Or D.** 1999. Drip irrigation. Springer. New York. 162 p.
- Dasberg S, Bresler E.** 1985. Drip irrigation manual. International Irrigation Information Center. 95 p.
- Durán A, Califra A, Molfino J H, Lynn W.** 2005. Keys to soil taxonomy for Uruguay. Washington: USDA, Natural Resources Conservation Service. 77p.

- García Petillo M.** 2002. Respuesta a diferentes manejos del riego y balance hídrico de un huerto de cítricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 194 p.
- Gispert Folch JR.** 2005 Definición del volumen de suelo húmedo (VHS) en microirrigación, mediante la resistividad eléctrica: aplicación al estudio del porcentaje de VSH en el comportamiento del manzano (*Malus doméstica* Borkh). *Estudios de la zona no saturada del suelo* Vol. VII. pp. 75-80.
- Karmeli D, Peri G, Todes M.** 1985. Irrigation Systems: Design and operation. Oxford University Press. Cape Town, England. 1985. 187p.
- Keller J.** 1978: "Trickle Irrigation". Section 15 -7. National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. USDA. USA. 129p.
- Keller J, Bliesner R.** 1990. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold. New York 652 p.
- Koo RCJ.** 1985. Response of "Marsh" grapefruit tree to drip, under tree spray and sprinkler irrigation. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society.* 98: pp. 29-32.
- Koo RCJ.** 1978. Response of densely planted "Hamlin" orange on two rootstocks to low volume irrigation. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society.* 91: pp. 8-10.
- Koo RCJ, Smajstrla AG.** 1985. Trickle irrigation of citrus on sandy soils in a humid region. *Proceedings of the 3rd international drip irrigation congress.*
- Koo RCJ, Smajstrla AG.** 1984. Effects of trickle irrigation and fertigation on fruit production and juice quality of "Valencia" orange. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society.* 97: pp. 8-10.
- Or D.** 1996. Drip irrigation in heterogeneous soils: study -state field experiments for stochastic model evolution. *Soil Science Society of American Journal.* 60: pp. 1339 - 1349.
- Or D.** 1995. Stochastic analysis of water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soil. *Soil Science Society of American Journal.* 59: pp. 1222 - 1233.
- Ould Mohamed El-Hafedh AV, Daghari H, Maalej M.** 2001. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. *Agricultural Water Management.* 52: pp.33 - 52.
- Pizarro F.** 1990. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 471 p.

- Quezada C, Venegas A, García H, Ocampo J.** 2005. Frecuencia de reposición hídrica en olivos (*Olea europaea* L.) bajo riego por goteo en un suelo franco arcilloso. *Agro Sur* 33 (2): pp. 74-85.
- Randall HC, Salvatore JL.** 1988. Root growth and water status of trickle-irrigated cucumber and tomato. *Journal of American Society for Horticultural Science*. 113: pp. 830 - 835.
- Revol P, Vachaud G, Clothier BE.** 1997. Infiltration from a surface point source and drip irrigation 1: The midpoint soil water pressure. *Water Resource Research*. 33: pp. 1861 - 1867.
- Richards LA.** 1947. Pressure-membrane apparatus construction and use. *Agricultural Engineering*. 28: pp. 451-454.
- Rodrigo J, Hernández JM, Pérez A, González JF.** 1992. Riego localizado. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 405p.
- Silva A, Ponce de León J, García F, Durán A.** 1988: Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Facultad de Agronomía. Boletín de investigación N° 10. 20.
- Shrivastava PK, Parikh MM, Sawani NG, Raman S.** 1994. Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield. *Agricultural Water Management*. 25: pp. 179 - 184.
- Surfer Versión 8.00.** 2002. Reference Manual. Golden Software, Inc., Golden, Colorado.
- Thabet M, Zayani K.** 2008. Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. *American Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*. 3 (1): pp. 38-42.
- Thorburn PJ, Cook FJ, Bristow KL.** 2003. Soil dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*. 22: pp. 121-127.
- Vermeiren L, Jobling GA.** 1980: "Riego Localizado". Estudio FAO. Riego y Drenaje. Vol., 36. Roma Italia. 203p.
- Warrick AW.** 1974: "Time dependent linearized infiltration. I.: Point sources" *Soil Science Society of American Journal Proceedings*, 38 (3). USA. pp. 383-386.
- Wooding RA.** 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research*. 4: pp. 1259 - 1273.
- Wu IP, Gitlin HM.** 1983. Drip irrigation application efficiency and schedules. *Transactions of the ASAE*. 26: pp. 92 - 99

Zazueta FS. 1992. Microirrigación. ICFA International, Guadalajara, México. 212 p.

Zekri M, Parsons LR. 1988. Water relations of grapefruit tree in response to drip, microsprinkler irrigation. *Journal of American Society for Horticultural Science*. 113(6): pp. 819-823.

3. DISCUSIÓN GENERAL

En las pruebas realizadas con la instalación Tipo 1 (ensayos con equipos de riego comercial), se observaron bulbos húmedos cuyas dimensiones variaron entre 0,50 m con emisores de bajo caudal ($1,6 \text{ lh}^{-1}$) y 1,10 m en los de mayor caudal (4 lh^{-1}), menores a las citadas en la bibliografía. En todos los casos el aumento de las horas de riego aumentó el volumen de suelo humedecido, pero dicho aumento fué más significativo en profundidad, que en sentido horizontal, quedando agua en una zona donde las plantas no pueden extraerla. Por tanto esa práctica disminuye la eficiencia de aplicación del método.

En teoría, la presencia de un horizonte Bt a los 0,40 m, con menor velocidad de infiltración, frenaría el avance del agua, generando una acumulación y expansión del área humedecida sobre este horizonte (Pizarro, 1990), sin embargo esto no sucedió, al contrario el agua atravesó este horizonte y se acumuló en los horizontes más profundos.

En las pruebas con la instalación Tipo 2 (ensayos con el dispositivo portátil), en el caso del suelo de textura franco arcillosa el contenido de humedad del suelo previo al inicio del riego, se encontraba por debajo del contenido a capacidad de campo, en toda la profundidad del suelo. En los primeros cm del suelo el contenido de agua disponible fué menor a 0 % (menor al Punto de Marchitez Permanente) y por debajo de los 0,40 m era 50 % de AD. Por lo cual el contenido de humedad después del riego apenas superó los 20-30 % del agua disponible en la zona mojada por los emisores. Por esta razón los bulbos de mojado se determinaron fijándose como limite un contenido de humedad de entre 10 y 20 % del agua disponible, porque se considero que fue debido al agua aplicada.

El tiempo que transcurre entre el final del riego y el inicio del muestreo, no fue suficiente en el caso de caudales de 6 y 8 l/h, 2 horas de riego y 2 horas pre-muestreo, ya que se observó agua libre a los 0,50 m de profundidad (agua disponible superior a 100 %).

Las dimensiones del bulbo de mojado, fueron inferiores a lo que indica la bibliografía, en el caso de emisores de 4 l/h el diámetro de mojado varió entre 0,30 y 1,0 m para el rango de tiempos utilizados en el ensayo. Según Keller (1978), con un caudal de 4 l/h, suelo estratificado y textura media, el diámetro de mojado debería ser de 1,25 m. Para Karmeli *et al.* (1985) dicho diámetro debe ser de 1,20 m.

En suelos de perfil estratificado, como el suelo del ensayo, según la bibliografía, las dimensiones del bulbo de mojado son mayores que en un suelo de perfil homogéneo debido a que la presencia de una capa de menor permeabilidad, como un Bt, frena el avance del agua generando un bulbo más chato y ancho en el horizonte superficial (Pizarro, 1990). En el ensayo lo que se observó fue un aumento de la humedad del horizonte profundo (por debajo de los 0,40 m) y en algunos casos, acumulación de agua libre, lo cual se contradice con lo citado anteriormente. Se observó en la mayoría de los casos la formación de un “cuello de botella” en el horizonte superficial, que da pasaje al agua hacia abajo. Una posible explicación es que, el riego por goteo genera una zona de suelo saturado debajo del gotero, donde según la teoría el movimiento del agua estaría gobernado por potenciales de gravedad que conducen el agua a los horizontes más profundos hasta alcanzar el horizonte B de menor permeabilidad, generando los perfiles de mojado observados en las pruebas de campo. También la presencia de galerías creadas por animales o raíces muertas, podrían provocar el flujo preferencial hacia abajo, sin embargo esta suposición es descartada ya que el fenómeno se repite en todos los tratamientos y no ocurre en forma aleatoria como se da la ocurrencia de estas galerías. Otro factor que puede estar afectando este flujo vertical del agua es la conductividad hidráulica del suelo, probablemente el mayor contenido de macroporos en el horizonte superficial, hace que la conductividad hidráulica, en condiciones de saturación sea más alta que en el horizonte subsuperficial. Asociado a lo anterior, el tipo de estructura del suelo, también podría favorecer dicho movimiento, en el caso de estructura prismática o columnar, el espacio entre los agregados tendrían cierta orientación vertical. En el presente ensayo no se realizó un análisis de la estructura (tipo) de los agregados, ni se realizaron

medidas de conductividad hidráulica, por lo cual no podemos concluir acerca de esta hipótesis.

Este flujo de agua a estratos profundos lleva a una disminución de la eficiencia de aplicación, debido a que parte del agua queda por debajo de las raíces y no es aprovechada por el cultivo. Esta situación es importante principalmente en el caso de cultivos recién instalados cuya exploración radicular es escasa y los volúmenes de agua son reducidos (bajos requerimientos del cultivo), ya que parte de ese volumen de agua se pierde en profundidad y el cultivo empieza a sufrir estrés hídrico. Esta situación ya fue constatada en ensayos de riego llevados a cabo por la Unidad de Hidrología, en montes jóvenes de duraznero, regados con riego localizado, cuyas necesidades netas fueron calculadas considerando una eficiencia de aplicación del 90 %, que es la citada en la mayoría de los manuales de riego localizado.

En el suelo arenoso con caudales chicos (1 y 2 $l\ h^{-1}$), no llegó a formar charco debido a la baja pluviometría del riego y a la alta infiltración del suelo arenoso y para el caso de caudales mayores las dimensiones del charco no superaron los 0,07 m. En el caso de la mancha mojada, esta varió desde 0,12 m, con el menor caudal y tiempo de riego, hasta 0,40 m con el mayor caudal. Al respecto, la bibliografía cita para el caso de un suelo arenoso y emisores de 4 $l\ h^{-1}$, diámetro de la zona saturada de hasta 0,10 m para tiempos de aplicación mayores a 1 hora (Bresler, 1977, citado por Rodrigo et al, 1992)

Cabe mencionar que estas dimensiones son afectadas directamente del estado de la superficie sobre la cual cae el agua, especialmente del microrelieve del sitio. Por esta razón es que en algunos casos el diámetro del área mojada fue superior con 2 horas de riego respecto a 4 horas de riego. También se dio el caso en que para un caudal mayor las dimensiones fueron menores que con un caudal menor (4 y 6 $l\ h^{-1}$). Estas diferencias hacen que los bulbos de mojado sean levemente superiores en el de menor caudal, como se observa en la figura 4.

En general el diámetro de mojado no superó los 0,60 m, lo cual no coincide con Karmeli *et al.*, 1985, quienes expresan que a caudales crecientes, el diámetro se incrementa en forma lineal, llegando a 1,2 m en el caso de emisores de 8 $l\ h^{-1}$. La excepción es el tratamiento de 4 $l\ h^{-1}$ con 2 horas de riego, que generó una zona húmeda de 0,80 m de

diámetro, lo cual fue debido al mayor desarrollo del charco húmedo, como fue mencionado anteriormente.

Es de notar el efecto que tuvo la presencia de un horizonte arcilloso a los 0,80 m de profundidad, que asociado a la alta velocidad de infiltración del horizonte arenoso, favoreció un rápido ascenso de la napa freática, como pudo observarse en la mayoría de los tratamientos.

4. CONCLUSIONES

En los suelos estratificados y pesados, típicos de la zona frutícola sur del Uruguay, se detectó que:

- Los patrones de mojado fueron diferentes a los esperados de acuerdo a la bibliografía, se obtuvieron menores diámetros de mojado en todos los casos.
- El incremento de las horas de riego, provocó un aumento del volumen de suelo mojado.
- Como consecuencia del aumento del tiempo de riego se incrementaron las pérdidas por percolación, que disminuyeron la eficiencia de aplicación del método ya que parte del agua aplicada no fue aprovechada por el cultivo.

En suelos arenosos con horizonte de menor permeabilidad a los 0,80 m de profundidad se observó que:

- Para caudales bajos los diámetros de mojado se aproximaron a los citados en la bibliografía
- Para caudales altos la bibliografía cita diámetros mayores a los obtenidos en este trabajo
- Se registraron pérdidas por percolación profunda, la cual no es citada en la bibliografía ni siquiera para caudales mayores a 8 lh-1

Es necesario continuar con esta línea de investigación, incluyendo otras variables, como la realización de varios ciclos de riego previo al muestreo, en especial si el suelo se encuentra muy seco. El ajuste los tiempos de espera para la redistribución del agua luego de finalizado el riego, es un factor importante a tener en cuenta ya que afecta directamente sobre la forma final del bulbo húmedo, cuando el suelo debajo del gotero deja de estar saturado.

También se deberían incluir medidas de conductividad hidráulica del suelo, y el efecto de la extracción realizado por los cultivos. De ser posible, evaluar el volumen de agua de riego que no queda disponible para las plantas, nos permitiría cuantificar la eficiencia del riego por goteo.

El uso de tensiómetros electrónicos que permitan la medición continua de la humedad del suelo serán de gran utilidad ya que permitirán visualizar la dinámica del agua en el bulbo de mojado, así como el efecto del consumo de las plantas.

La realización de este tipo de pruebas permitirá la elaboración de modelos que puedan ser validados localmente. Actualmente, técnicos del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (Facultad de Ingeniería) están probando algunos modelos numéricos, que mejor se adapten a nuestras condiciones.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Assaf R, Levin I, Bravdo BA. 1989. Optimization of water for fruit trees by a computerized irrigation system. *Agronomy Journal*. 9: 451 – 456.
- Badr MA. 2007. Spatial distribution of water and nutrients in root zone under surface and subsurface drip irrigation and cantaloupe yield. *World Journal of Agricultural Science* 3 (6): 745-756.
- Ben-Asher J, Lomen DO, Warrick AW. 1978. Linear and non-linear models of infiltration from a point source. *Soil Science Society of American Journal*. 42: 3 - 6.
- Bouwer H. 2000. Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*. 45: 217 – 228.
- Brandt A, Bresler E, Diner N, Ben-Asher J, Heller J, Goldberg D. 1971. Infiltration from a trickle source. I. Mathematical models. *Soil Science Society of American Proceedings*. 35: 675 – 683.
- Bresler E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science* 1: 3 – 17.
- Bresler E. 1977. "Trickle-drip irrigation: Principles and applications to soil-water management". *Advances in Agronomy*, 29. USA. 344 - 393.
- Clothier BE. 1984. Solute travel times during trickle irrigation. *Water Resource Research*. 20: 1848 – 1852.
- Clothier BE, Scotter DR, Harper ER. 1985. Three-dimensional infiltration and trickle irrigation. *Transactions of the ASAE*. 28: 497 - 501.
- Cook FJ, Thorburn PJ, Bristow KL. 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. In *Micro – Irrigation: Advances in System Design and Management*. *Irrigation Science*. 22: 129 – 134.
- Dasberg S, Or D. 1999. Drip irrigation. 162 p.
- Dasberg S, Bresler E. 1985. Drip irrigation manual. *Internacional Irrigation Information Center*. 95 p.
- DIEA. 2003. Anuario estadístico agropecuario. Montevideo; MGAP.
- Durán A, Califra A, Molfino JH, Lynn W. 2005. Keys to soil taxonomy for Uruguay. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. 77p.

- García Petillo M. 2002. Respuesta a diferentes manejos del riego y balance hídrico de un huerto de cítricos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 194 p.
- Gispert Folch JR. 2005. Definición del volumen de suelo húmedo (VHS) en microirrigación, mediante la resistividad eléctrica: aplicación al estudio del porcentaje de VSH en el comportamiento del manzano (*Malus doméstica* Borkh). Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. VII. 75-80
- Karmeli D, Peri G, Todes M. 1985. Irrigation Systems: Design and operation. Oxford University Press. Cape Town, England. 1985. 187p.
- Keller J. 1978: "Trickle Irrigation". Section 15 -7. National Engineering Handbook. Soil Conservation Service. USDA. USA. 129p
- Keller J, Bliesner R. 1990. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold. New York. 652 p.
- Koo RCJ. 1985. Response of "Marsh" grapefruit tree to drip, under tree spray and sprinkler irrigation. Proceedings of the Florida State Horticultural Society. 98: 29-32.
- Koo RCJ. 1978. Response of densely planted "Hamlin" orange on two rootstocks to low volume irrigation. Proceedings of the Florida State Horticultural Society. 91: 8-10.
- Koo RCJ, Smajstrla AG. 1985. Trickle irrigation of citrus on sandy soils in a humid region. Proceedings of the 3rd international drip irrigation congress.
- Koo RCJ, Smajstrla AG. 1984. Effects of trickle irrigation and fertigation on fruit production and juice quality of "Valencia" orange. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*. 97: 8-10.
- Levin I. Assaf R. Bravdo B. 1979. Soil moisture and root distribution in apple orchard irrigation by tricklers. Plant and soil. 52: 31-40.
- Or D. 1996. Drip irrigation in heterogeneous soils: study -state field experiments for stochastic model evolution. Soil Science Society of American Journal. 60: 1339 - 1349.
- Or D. 1995. Stochastic análisis of water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soil. Soil Science Society of American Journal. 59: 1222 - 1233.
- Ould Mohamed El-Hafedh AV, Daghari H, Maalej M. 2001. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. Agricultural Water Management. 52: 33 - 52.

- Pizarro F. 1990. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. 471 p.
- Quezada C, Venegas A, García H, Ocampo J. 2005. Frecuencia de reposición hídrica en olivos (*Olea europaea* L.) bajo riego por goteo en un suelo franco arcilloso. *Agro Sur* 33 (2) 74-85.
- Randall HC, Salvatore JL. 1988. Root growth and water status of trickle-irrigated cucumber and tomato. *Journal of American Society for Horticultural Science*. 113: 830 - 835.
- Revol P, Vachaud G, Clothier BE. 1997. Infiltration from a surface point source and drip irrigation 1: The midpoint soil water pressure. *Water Resource Research*. 33: 1861 - 1867.
- Richards LA. 1947. Pressure-membrane apparatus construction and use. *Agricultural Engineering*. 28:451-454.
- Rodrigo J, Hernández JM, Pérez A, González JF. 1992. Riego localizado. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 405p.
- Sellés G, Ferreyra R, Contreras G, Ahumada R, Valenzuela J, Bravo R. 2003. Manejo de riego por goteo en uva de mesa cv. Thompson seedless cultivada en suelos de textura fina. *Agricultura Técnica*, ISSN 0365-2807, vol.63 N° 2. 180-192
- Silva A, Ponce de León J, García F, Durán A. 1988: Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. *Facultad de Agronomía. Boletín de investigación* N° 10. 20.
- Shrivastava PK, Parikh MM, Sawani NG, Raman S. 1994. Effect of drip irrigation and mulching on tomato yield. *Agricultural Water Management*. 25: 179 - 184.
- Surfer Version 8.00. 2002. Reference Manual. Golden Software, Inc., Golden, Colorado.
- Thabet M, Zayani K. 2008. Wetting patterns under trickle source in a loamy sand soil of south Tunisia. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science* 3 (1): 38-42.
- Thorburn PJ, Cook FJ, Bristow KL. 2003. Soil dependent wetting from trickle emitters: implications for system design and management. *Irrigation Science*. 22: 121-127
- Vermeiren L, Jobling GA. 1980: "Riego Localizado". Estudio FAO. Riego y Drenaje. Vol., 36. Roma Italia. 203p.

- Warrick AW. 1974: "Time dependent linearized infiltration. I.: Point sources" Soil Science Society of American Journal Proceedings, 38 (3). USA. 383-386p.
- Wooding RA. 1968. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water Resource Research. 4: 1259 - 1273.
- Wu IP, Giltin HM. 1983. Drip irrigation application efficiency and schedules. Transactions of the ASAE. 26: 92 - 99
- Zazueta FS. 1992. Microirrigación. ICFA International, Guadalajara, México. 212 p.
- Zekri M, Parsons LR. 1988. Water relations of grapefruit tree in response to drip, microsprinkler irrigation. Journal of American Society for Horticultural Science. 113(6). 819-823.