



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN
CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE CAPSULAS POROSAS PARA RIEGO

IVÁN LÓPEZ LÓPEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2013

DEDICATORIAS

A los sueños que le dan sentido a la vida.

A mi esposa Patricia Rojas Rojas y a mi hijo Saúl Iván López Rojas con mucho cariño y que siempre se realicen sus sueños, gracias por hacerme el hombre mas feliz y confiar en mí.

A mis padres Eric López Vasquez y Magnolia López Aguilar, por darme la vida, brindarme su amor, apoyo y confianza, son un ejemplo de superación para mí.

A mis hermanos Sherly Haydee, Erick, Karen Desiree y Ulíxes, quienes son parte de mí y de mis logros, gracias por darme las fuerzas para hacerlos.

A la memoria de mi abuelo Fausto López Matus† por los recuerdos inolvidables que perdura.

A mis abuelos Aide López Arrazola, Juana Aguilar Mendez y Rafael Lopez Figueroa por los momentos inolvidables y brindarme su apoyo y sabiduría.

A cada uno de mis tíos, primos, sobrinos con mucho cariño y gratitud, gracias por estar conmigo.

A los amigos por compartir la amistad y momentos de alegría que a pesar del tiempo y la distancia que nos separa siempre cuento con ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, en especial al Posgrado en Hidrociencias por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

A todos los maestros que me enseñaron y aconsejaron, gracias.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco por su apoyo incondicional y orientación acertadas, gracias por su amistad y perseverancia que fue punto clave para poder concluir el presente trabajo.

Al Dr. Leonardo Tijerina Chávez por sus valiosas sugerencias que permitió concluir el presente trabajo, gracias.

Al Dr. Ramon Arteaga Ramírez por el asesoramiento y acertadas sugerencias aportadas al presente trabajo, gracias.

A todo el equipo de la Estación Meteorológica por haber apoyado incondicionalmente en la realización del presente trabajo, gracias.

La presente Tesis, Titulada: **“EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE CAPSULAS POROSAS PARA RIEGO”**, realizada por el Alumno: **Iván López López**, bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

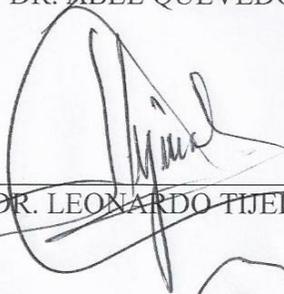
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR:



DR. LEONARDO TIJERINA CHAVEZ

ASESOR:



DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Enero de 2013

EVALUACIÓN HIDRÁULICA DE CÁPSULAS POROSAS PARA RIEGO

RESUMEN

La agricultura ha obtenido logros importantes por la introducción de tecnologías avanzadas para el riego de cultivos agrícolas. Sin embargo, los recursos hídricos y energéticos, pueden resultar competitivos con las necesidades de la población y la industria, sobre todo, en aquellas regiones donde existen limitaciones de este vital líquido.

Por lo que es necesario emplear alternativas de riego que conduzcan al uso racional del agua y a la disminución del uso de la energía para el bombeo, con el desarrollo de investigaciones que se materialicen en proyectos de desarrollo sustentable.

Por lo anterior, en el presente trabajo de investigación, tuvo como objetivo evaluar el funcionamiento hidráulico de capsulas porosas en términos de su conductividad hidráulica, bajo diferentes cargas (a presión y succión); en las interconexiones entre capsulas porosas se propone utilizar conectores comerciales de riego para hacer mejor el funcionamiento y se diseñó un sistema de riego por subirrigación con capsulas porosas, el cual se evaluó su funcionamiento en tezontle como sustrato con diferentes tamaños de partículas.

Se concluyó que la conductividad hidráulica en las capsulas porosas no es igual cuando son sometidas a diferentes cargas de columna de agua; por lo tanto, el gasto emitido por cada capsula es diferente.

Las interconexiones propuestas a partir de conectores para riego comerciales cumplieron su misión, dado que no se presentaron perdidas de agua; por lo tanto, permitió la continuidad del agua en el sistema por subirrigación.

Al conocer la Conductividad hidráulica (K_s) de cada capsula, se permite hacer un diseño correcto de un sistema de riego por subirrigación.

Sobre el funcionamiento del sistema de riego por subirrigación en diferentes tamaños de partículas (al menos dos, una con tamaños de particulas iguales o menores a la malla 8, y la segunda con partículas con tamaños entre la malla 8 y la 6), no se encontró un comportamiento diferente en el funcionamiento del sistema de riego.

Palabras Claves: Capsula Porosa, Conductividad Hidráulica, Conectores Comerciales, Subirrigación, Carga Hidráulica.

HIDRAULIC EVALUATION FOR IRRIGATION POROUS CAPSULES

ABSTRACT

Agriculture has major achievements by the introduction of advanced technologies for irrigation of agricultural crops. However, water resources and energy can be competitive with the needs of the population and industry, especially in regions where limitations this vital liquid.

So is necessary to use alternative irrigation leading to the rational use of water and reducing the use of energy to pump, with the development of research to materialize sustainable development projects.

Therefore, in this research work is to evaluate the hydraulic performance of porous capsules in terms of hydraulic conductivity under different loads (pressure and suction) in the interconnections between porous capsules intends to use commercial connectors irrigation for best performance and was designed subirrigation system with porous capsules, which assessed their performance in tezontle as substrate with different particle sizes.

It was concluded that the hydraulic conductivity is not equal porous capsules when subjected to different loads of water column, therefore, the cost per capsule emitted is different.

Interconnections connectors proposals from commercial irrigation fulfilled their mission, since there were no leaks are, therefore, allowed the continuity of water subirrigation system.

Knowing the hydraulic conductivity (K_s) of each capsule, carries out a proper design of a subirrigation system.

About the operation of subirrigation system in different particle sizes (at least two, one with particle sizes equal to or smaller than 8 mesh, and the second particle with mesh sizes between 8 and 6), no found a different behavior in the operation of the irrigation system.

Keywords: porous capsules, hydraulic conductivity, commercial connectors, subirrigation, hydraulic loads.

CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO E HIPÓTESIS.....	2
2.1 Objetivos.....	2
2.1.1 General.....	2
2.1.2 Particulares.....	2
2.2 Hipótesis	2
2.2.1 General.....	2
2.2.2 Particulares.....	2
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
3.1 Movimiento del agua en el suelo.....	3
3.1.2 Potencial total y sus componentes	3
3.1.3 Curva característica de humedad	6
3.1.4 Observaciones descriptivas del movimiento del agua en el suelo	6
3.1.4 Movimiento del agua del suelo en macroporos y microporos (porosidad dual)	10
3.2 Conductividad hidráulica.....	11
3.2.1 Permeámetro	13
3.3 Riego por succión con cápsulas porosas.....	13
3.3.1 Evaluación del sistema de riego.....	18
3.3.2 Uniformidad del riego	19
3.4 Evaporación.....	20
3.4.1 Factores que determinan la evaporación	21
3.4.2 Cálculo de la evaporación.....	22
3.4.3 Transpiración	22
3.4.4 Evapotranspiración	22
3.4.5 Evapotranspiración de referencia (eto).....	23
3.4.6 Evapotranspiración máxima (etm).....	24
3.4.7 Evapotranspiración real (etr).....	24
3.5 Temperatura.....	24
3.6 Sustratos	25
3.6.1 Propiedades de los sustratos de cultivo	25
3.6.1.2 Propiedades físicas.....	25

3.6.1.3 Propiedades químicas	27
3.6.1.4 Propiedades biológicas	29
3.6.1.5 Características del sustrato ideal	30
4.MATERIALES Y MÉTODOS	33
4.1 Materiales	33
4.2 Métodos	34
5.RESULTADOS	42
6.CONCLUSIONES	50
7.RECOMENDACIONES	51
8.LITERATURA CONSULTADA	52
ANEXOS	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Valores máximos y mínimos de gasto y conductividad hidráulica, a partir de todas las repeticiones y los promedios, de las capsulas porosas.....	42
Cuadro 2. Conductividad hidráulica (cm/h) de las capsulas porosas a diferentes carga.....	45
Cuadro 3. Consumo de agua por evaporación del sustratos, bajo un sistema de subirrigación con capsulas porosas.....	47
Cuadro 4. Volumen emitido de las capsulas con carga 50 cm.....	57
Cuadro 5. Volumen emitido de las capsulas con carga 40 cm de columna de agua.....	58
Cuadro 6. Conductividad hidráulica y gasto de las capsulas a una carga de 50 cm.....	59
Cuadro 7. Conductividad hidráulica y gasto de las capsulas a una carga de 40 cm.....	61
Cuadro 8. Conductividad hidráulica y evaporación de 30 capsulas a una carga de 50 cm.....	62
Cuadro 9. Conductividad hidráulica y evaporación de 30 capsulas a una carga de 40 cm.....	63
Cuadro 10. Volumen de agua recolectado, gasto y conductividad hidráulica a 30, 20, 10, 0 -5 y -10 cm de columna de agua.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Potencial de presión abajo y arriba de la superficie libre del agua.....	4
Figura 2. Permeámetro de carga constante.....	13
Figura 3. Capsulas escogidas al azar.....	35
Figura 4. Capsulas limpias (secandose).....	35
Figura 5. Capsulas interconectadas.....	36
Figura 6. Capsulas niveladas y libre de aire.....	37
Figura 7. Capsulas cubiertas con bolsas de plástico.....	37
Figura 8. Mediciones del volumen emitido por capsula.....	38
Figura 9. Medición del volumen emitido a diferente carga.....	39
Figura 10. Prueba para observar fugas en el montaje de las capsulas.....	40
Figura 11. Grupos de Capsulas seleccionadas para hacer el sistema de riego.....	40
Figura 12. Primera etapa del experimento con sustrato fino.....	41
Figura 13. Segunda etapa del experimento con sustrato mediano.....	41
Figura 14. Relación entre la evaporación y conductividad hidráulica para una carga de 50 cm.....	44
Figura 15. Relación entre los valores promedios de evaporación y conductividad hidráulica para una carga de 50 cm.	44
Figura 16. Relación entre la conductividad hidráulica [cm/h] (y) y la carga de columna de agua [cm] (x).....	45
Figura 17. Relación entre las láminas evaporadas en las tinas con 4 y 5 capsulas respectivamente en un sustrato fino, con riego por subirrigación.....	48
Figura 18. Relación entre las láminas evaporadas en las tinas con 4 y 5 capsulas respectivamente en un sustrato mediano, con riego por subirrigación.....	48
Figura 19. Relación entre las láminas evaporadas en las tinas con 4 y 5 capsulas respectivamente en un sustrato mediano, con riego por subirrigación.....	49

1.INTRODUCCIÓN

En los sistemas de riego de nuestro país no se hace un uso eficiente del agua, se estima que en los Distritos de Riego la eficiencia en la red mayor es de 85%, en la red menor es de 70% y en la parcela del 60%, obteniéndose una eficiencia global del 36%; es decir de cada 100 m³ de agua que es extraída de la fuente de abastecimiento, los cultivos aprovechan únicamente 36 m³. La baja eficiencia en la parcela es debida a las pérdidas de agua como consecuencia de la deficiente operación de los sistemas de riego, diseños y métodos de riego.

La demanda de agua en los últimos años va en orden creciente y debido a la escasez de ésta, actualmente el método de riego más eficiente es el localizado en el cual el agua se aplica en forma local, en la cantidad e intensidad suficiente para cubrir las necesidades hídricas del cultivo obteniéndose mayores rendimientos por unidad de agua extraída de la fuente de almacenamiento. Los métodos de riego generalmente cuando están bien diseñados presentan un 10% de pérdidas de aplicación.

El riego localizado no se ha hecho extensivo en nuestro país, debido a la alta inversión inicial del sistema y los altos costos de operación debido a las grandes presiones que utilizan los emisores para funcionar adecuadamente. Las técnicas tradicionales son relativamente de bajo costo y cuando se combinan por tecnologías modernas, pueden resultar sumamente eficaces.

Ante esta situación el Colegio de Postgraduados y específicamente en el Centro de Hidrociencias, se ha estado trabajando con un método de riego localizado, dicho método se le ha denominado riego por succión, utiliza cápsulas porosas como emisores y no necesita energía externa para su funcionamiento, sola la planta regula su régimen de humedad, en función de las condiciones climáticas del lugar y la presión atmosférica.

2. OBJETIVO E HIPÓTESIS

2.1 OBJETIVOS

2.1.1 GENERAL

A partir de los diseños existentes de capsulas porosas el objetivo fue evaluar hidráulicamente capsulas porosas individuales, para el diseño de sistemas de riego.

2.1.2 PARTICULARES

- Evaluar el funcionamiento hidráulico con diferentes cargas (a presión y succión) de las capsulas porosas.
- Mejorar las interconexiones entre capsulas porosas con el fin de minimizar perdidas.
- Diseño de un sistema de riego a partir de la caracterización hidráulica individual de las capsulas porosas.
- Evaluar el funcionamiento hidráulico de las capsulas porosas en diferentes texturas de sustrato.

2.2 HIPÓTESIS

2.2.1 GENERAL

El funcionamiento hidráulico de las diferentes capsulas porosas son iguales en términos de la conductividad hidráulica y gasto.

2.2.2 PARTICULARES

- La evaluación hidráulica a diferentes cargas (a presión y succión) de las capsulas porosas, se comportan igual entre ellas.
- Las interconexiones propuestas mejoran el funcionamiento de las capsulas porosas en el riego dado que se minimizan las perdidas.
- La evaluación hidráulica de las capsula permite un mejor diseño de un sistema de riego.
- La evaluación hidráulica de las capsulas porosas en diferentes texturas de sustrato se comportan igual entre ellas.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

Palacios *et al* mencionado por Quevedo (2005) indican que cuando el movimiento del agua se da en un medio poroso (en este caso el suelo) es resultado de la diferencia del estado energético del agua en distintos puntos del suelo. Los principales tipos de energía que intervienen son la energía cinética y la potencial. La energía cinética se debe a la carga de velocidad del agua dentro del suelo, y donde la velocidad del flujo es muy baja por lo que este tipo de energía se considera despreciable, por lo tanto, el movimiento del agua depende del cambio de energía potencial entre dos puntos, es decir, el agua se mueve de un mayor a un menor gradiente.

3.1.2 POTENCIAL TOTAL Y SUS COMPONENTES

La condición energética del agua se calcula a través del potencial total, se define como el contenido de energía de una unidad de volumen de agua con respecto a un estado de referencia, que es el agua pura a presión atmosférica. El potencial total está integrado por la atracción de la matriz del suelo (potencial mátrico), la presencia de solutos (potencial osmótico), la gravedad (potencial gravitacional o carga de posición) y la acción de presiones externas (p.e. la presión hidrostática, potencial de presión). En la práctica, el potencial osmótico se acepta que sea igual a cero, es decir, no se considera el contenido de solutos en el perfil del suelo (Quevedo, 2005).

El potencial mátrico (Ψ_m) es una fracción del potencial total que se origina de la interacción del agua con las partículas sólidas que forman el esqueleto del suelo, y en especial con los coloides. Su valor puede ser igual a cero, cuando no existe la interacción mencionada, o negativo cuando hay interacción. En todos los casos el valor se refiere a la fracción de agua afectada en menor proporción por la fase sólida del suelo, cuando éste no está saturado (Narro, 1994).

El potencial mátrico se origina de las fuerzas de adhesión y capilares; su valor es directamente proporcional al contenido de humedad del suelo, es decir, a menor contenido de humedad el valor de Ψ_m crece negativamente. Tal proporcionalidad permite establecer relaciones entre estas dos variables para un suelo dado (Narro, 1994).

El potencial osmótico o de solutos (Ψ_s) es la fracción del potencial total que resulta del efecto de la interacción de las moléculas de agua con todos los solutos presentes en ella. Su valor es igual a cero para el agua pura, y negativo e inversamente proporcional a la concentración de sales

disueltas, es decir, a mayor cantidad de sales el valor de Ψ_s aumenta negativamente, lo que significa que la presencia de iones en el agua reduce la energía de esta (Narro, 1994).

El potencial gravitacional (Ψ_g) es la porción del potencial total que se debe a la colocación vertical de un punto considerado en el agua, con respecto a un plano horizontal de referencia, el cual puede ser fijado de acuerdo con la conveniencia del trabajo o estudio por realizar. El valor de Ψ_g puede ser igual a cero, cuando el punto considerado está exactamente en el plano o nivel horizontal de referencia (NR); el valor es positivo si el punto está sobre el NR, y negativo cuando se encuentra colocado de bajo del NR (Narro, 1994).

El Ψ_g se origina de la fuerza de gravedad que actúa sobre la masa de agua y se refiere a un NR fijo para una condición dada.

El potencial de presión (Ψ_p) resulta de la presión (diferente de la atmosférica) que actúa sobre el agua en un punto bajo consideración. Esta presión generalmente es producida por una lámina de agua y su valor puede ser igual a cero, cuando no existe la acción de otra presión diferente de la atmosférica, ya que es el estado de referencia, o positiva cuando existe tal efecto (Figura 1) (Narro, 1994).

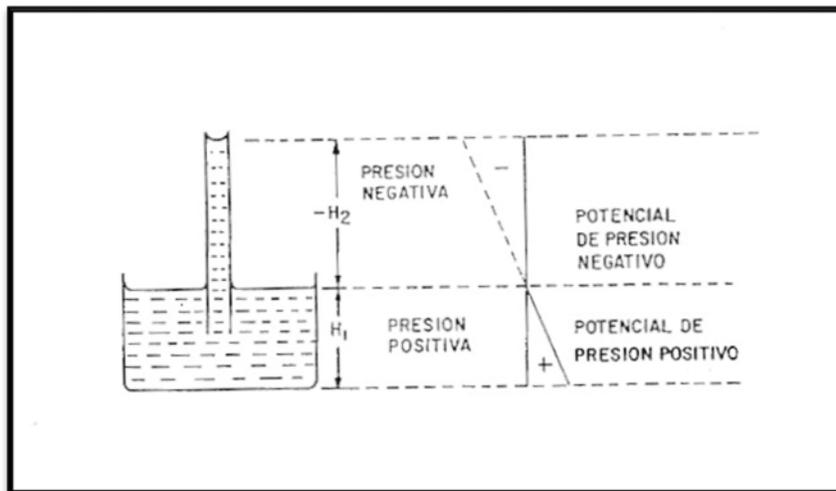


Figura 1. Potencial de presión abajo y arriba de la superficie libre del agua

En resumen es mucho más conveniente considerar el potencial de presión del agua en el suelo como una variable continua que toma valores positivos debajo del nivel freático (zona saturada),

cero en la superficie del manto freático y negativos en la zona no saturada (arriba del nivel freático) .

Por lo anterior, la expresión que describe el potencial total es:

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_p + \Psi_g + \Psi_s + \dots$$

La principal ventaja del concepto de potencial total es que proporciona un criterio unificado para definir el estado del agua, puede ser evaluado en cualquier tiempo y lugar del sistema agua-suelo-planta-atmósfera

Las unidades para expresar el potencial total o sus componentes son: energía por cantidad unitaria de agua, la cual puede referirse a volumen, a masa o a peso. Las unidades de energía en el sistema cegesimal (cgs) son ergios; por lo tanto:

$$\Psi(\text{base volumen}) = \frac{\text{energía}}{\text{volumen}} = \frac{\text{ergio}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2}$$

$$\Psi(\text{base masa}) = \frac{\text{energía}}{\text{masa}} = \frac{\text{ergio}}{\text{g}} = \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2}$$

$$\Psi(\text{base peso}) = \frac{\text{energía}}{\text{peso}} = \frac{\text{ergio}}{\text{dina}} = \text{cm}$$

Quevedo (2005), indica que en suelos no saturados, el potencial total se integra por el potencial mátrico y la carga de posición (potencial gravitacional). Este enfoque de gradiente energético se usa en la ecuación del transporte de humedad en el suelo, como resultado de la aplicación de la ecuación de continuidad (conservación de masas) y la ley de Darcy *“En un suelo saturado el agua se mueve en dirección de la disminución de presión hidráulica, con una velocidad directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica entre dos puntos, y la conductividad del suelo al agua, e inversamente a la distancia entre los dos puntos”* (ley del movimiento de fluidos a través de un medio poroso saturado, desde 1856). La ley de Darcy modificada en condiciones no saturadas se denomina la ecuación de Richards, la cual fue propuesta en 1931.

Si se desea aplicar la teoría de movimiento de agua en el suelo a partir de la diferencia del estado energético, se debe asumir que el suelo es indeformable, homogéneo, sin solutos y con un flujo

isotérmico y los efectos del aire son despreciables (Fuentes *et al.*,1985). Estas condiciones no han sido validadas sin embargo, facilitan la solución de las ecuaciones involucradas.

El esquema anterior es el que se ha desarrollado, en especial la modelación del movimiento del agua en el suelo (Fuentes, 1988; 1989; 1992; van Genuchten, 1994, Simůnek *et al.* 1998, Radcliffe, 2000). Este esquema no considera el movimiento del agua en donde se presenten grietas, cavidades de tuzas, de lombrices, donde ocurre un movimiento de agua con una gran diferencia en velocidades de flujo en el suelo.

3.1.3 CURVA CARACTERÍSTICA DE HUMEDAD

El agua en un suelo saturado se encuentra en equilibrio con el agua libre colocada a la misma elevación, siendo el potencial de presión del agua en el suelo, cero.

Si a una muestra de suelo saturado se le aplica una presión negativa muy pequeña el agua no drena de la muestra, si no hasta que la presión negativa es igual o mayor que un valor crítico a partir del cual empiezan a drenar los poros más grandes del suelo. Este valor crítico se conoce como valor de entrada de aire (air-entry value).

Conforme la presión negativa aumenta (en valor absoluto) más agua drenan los poros más grandes del suelo, quedando los poros más pequeños llenos de agua. Es decir, todo aumento de la presión negativa produce una disminución del contenido de humedad. La cantidad de agua que contiene el suelo en equilibrio es función del volumen de poros llenos de agua y por lo tanto de la presión negativa aplicada. Esta función se puede medir experimentalmente y se representa gráficamente por una curva conocida con el nombre de curva característica de humedad (Tijerina, 2009).

Este concepto es muy importante en relación con el agua disponible para las plantas, ya que cuando la capacidad específica alcanza su valor máximo el esfuerzo que tienen que hacer la planta para absorber agua es mínimo y viceversa .

3.1.4 OBSERVACIONES DESCRIPTIVAS DEL MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

Inoue (1985), a partir de observaciones en un suelo arenoso, clasificó el movimiento del agua en cuatro procesos:

- Infiltración inicial,

- Infiltración con régimen permanente,
- Drenaje
- Redistribución

Los procesos de infiltración dependen del contenido de agua en el suelo y de la intensidad de su aplicación (irrigación); siempre reconociendo que a diferente profundidad en el perfil del suelo, se presentan diferentes capacidades de retención de agua, que es función de la porosidad.

El drenaje ocurre después de que cesa el proceso de infiltración y tiene el mismo tipo de perfil del agua en el suelo que el de la infiltración, a pesar de presentar diferente contenido inicial de agua. La redistribución presenta a su vez dos procesos simultáneos dentro del perfil: secado y humedecimiento, donde el agua tiene cambios momentáneos, con los movimientos de las capas superiores a las inferiores. Groves (1989) indicó que el proceso de redistribución se ha visualizado como un pistón donde asume que la humedad en el perfil del suelo es constante, así el desplazamiento del agua depende del suministro de agua en la superficie.

Nielsen *et al.* (1972), indicaron que durante el proceso de humedecimiento y secado ocurre la histéresis que se manifiesta por las funciones $\theta(h)$ (humedad volumétrica en función del potencial) y $K(h)$ (conductividad hidráulica no saturada en función del potencial) en estas dos condiciones. Estos autores clasificaron los procesos de movimiento de agua en el suelo, sólo en una forma descriptiva, sin indicar que tipo de fuerzas se presentan en cada proceso.

De manera similar, el agua en el suelo se ha dividido en dos regiones de humedad: una saturada y otra no saturada. La primera se encuentra por abajo del nivel freático y la segunda por arriba de éste (zona vadosa), para estudiar el movimiento del agua en el suelo, por medio del método potencial del agua (Driessen y Konijin, 1992).

Aidárov *et al.* (1985) describieron las formas del agua en el suelo; señalan que durante la adsorción del agua por la fase sólida del suelo se forma una capa polimolecular con un espesor de varias decenas a centenas de Ångstroms (la llamada capa de solvato). Las fuerzas de atracción en esta capa decrecen a medida que la partícula sólida se aleja de la superficie; aumentando el grado de movilidad de las moléculas de agua y su accesibilidad para las plantas. Por esto se ha decidido dividir convencionalmente la humedad adsorbida en dos formas: higroscópica y peculiar. El concepto de humedad higroscópica surgió de la capacidad descubierta del suelo seco (llamado

“absolutamente seco”, a diferencia del “seco al aire”) de absorber los vapores de agua de la atmósfera y aumentar su humedad hasta el estado de “seco al aire”.

De acuerdo con Aidárov *et al.* (1985) la cantidad límite de humedad higroscópica absorbida por el suelo desde el aire con una humedad relativa próxima al 100%, se denomina higroscopicidad máxima. La humedad higroscópica se mantiene inmóvil en la superficie de las partículas sólidas y no es accesible para las plantas y puede ser eliminada del suelo sólo al calentarlo hasta los 100-105 °C. La cantidad de humedad higroscópica depende de los coloides y de humus. Su cantidad se correlaciona con la superficie específica de la fase sólida del suelo.

Quevedo (2005), comenta que cuando se aumenta la humedad del suelo por encima de la higroscopicidad máxima, la cantidad de humedad de adsorción crece y alrededor de las partículas sólidas se forma la humedad pelicular. Esta se puede desplazar debido a la diferencia de temperaturas, la diferencia en las concentraciones y por el contenido de humedad (desde las películas gruesas a las finas), con velocidades de desplazamiento muy pequeñas. El papel de la humedad pelicular en el régimen hídrico y de alimentación de las plantas es insignificante; sin embargo, durante el desecado del suelo, las plantas son capaces de asimilar una parte de la humedad pelicular. La cantidad máxima de humedad pelicular es función de la superficie específica, del contenido de coloides y humus del suelo.

Entre los límites de la higroscopicidad máxima y la capacidad de absorción de humedad máxima molecular se encuentra la humedad con la cual se produce la marchitez permanente de las plantas (contenido de humedad del suelo donde las plantas ya no pueden restituir su actividad vital con un humedecimiento posterior). También define la humedad del comienzo de la marchitez, cuando puede ser eliminada con el humedecimiento. La marchitez de las plantas inicia cuando la humedad recuperada del suelo por las raíces es menor que la pérdida por la transpiración. Además, la fuerza de succión de las raíces es diferente según la especie de plantas, por eso la magnitud de la humedad estable de marchitez varía dentro de ciertos límites. Las investigaciones han demostrado que la humedad de marchitez permanente está relacionada con la capacidad higroscópica máxima y alcanza para los distintos suelos 1.2-2.5% de su valor (Aidárov *et al.*, 1985).

Otra forma de agua en el suelo es la humedad libre, cuyo desplazamiento en función de las fuerzas de gravedad se divide en capilar, gravitacional y de vapor de agua. La humedad capilar se

halla bajo la acción de dos fuerzas: capilares y gravitacionales; cuando predominan las primeras en el suelo surgen, por lo general, corrientes ascendentes de humedad, y en caso contrario surgen corrientes descendentes; cuando estas fuerzas son iguales se genera un estado de equilibrio. La humedad capilar se forma debido a la presencia de poros con distintas formas y dimensiones y de micro-agregados en el suelo la cual es sostenida encima del manto frático y después concluir el humedecimiento del suelo (Quevedo, 2005).

La cantidad mínima de humedad suspendida se observa en las partes superiores del suelo cuando las aguas freáticas son profundas y transcurre un tiempo prolongado después del humedecimiento del suelo y el escurrimiento de la humedad gravitacional hacia abajo. Como es natural, en este caso no debe haber evaporación de la humedad desde la superficie del suelo ni absorción de agua por las raíces de las plantas. Esta cantidad mínima de humedad suspendida se denomina capacidad mínima de absorción de humedad de campo (Aidárov *et al.*, 1985).

El otro caso es cuando la superficie de las aguas freáticas asciende (en forma de humedad capilar sostenida) y forma un frente capilar. La humedad en el frente capilar disminuye a medida que asciende sobre la superficie de las aguas freáticas a causa de las diferentes alturas de ascenso por poros con distintos diámetro. La forma de este frente capilar depende de la heterogeneidad en las dimensiones de los poros.

En suelos con poros uniformes (suelos arenosos) la zona capilar es mas definida, en caso contrario, cuando los poros son más irregulares por su tamaño (suelos arcillosos-arenosos) la zona capilar es alargada según la altura. Encima de la zona capilar, la humedad sostenida se convierte en humedad suspendida. La altura de la zona capilar se llama altura máxima de elevación capilar, donde en suelos arenosos es de 0.4-1.0 m; en areno-arcillosos es de 1.0-1.5 m; en arcillo-arenosos es de 1.5-2.5 m, y para arcillosos es de 2.5-5.0 m, con relación al nivel freático.

La humedad capilar se encuentra retenida en la fase sólida del suelo por fuerzas de menor magnitud que la humedad de adsorción, por eso es más accesible para las plantas; a este proceso se le llama humedad productiva que da condiciones de vida a las plantas.

La humedad gravitacional es la humedad que no puede ya ser retenida en el suelo por las fuerzas capilares. Si se forma en el suelo después de un humedecimiento abundante, entonces escurre

hacia abajo. La velocidad de este escurrimiento disminuye con el tiempo. En los horizontes superiores del suelo, los restos de humedad gravitacional pueden mantenerse durante varios días, donde la capacidad de retención del agua que tiene el suelo permite realizar el riego con grandes cantidades y poca frecuencia, hace mas fácil la irrigación.

3.1.4 MOVIMIENTO DEL AGUA DEL SUELO EN MACROPOROS Y MICROPOROS (POROSIDAD DUAL)

Gil (2002) indicó que la distribución de la porosidad en el suelo, no solo influye sobre la cantidad de agua que este puede almacenar, sino además regula la energía con que la misma es retenida, el movimiento hacia la planta, hacia la atmósfera, y a otros puntos del suelo.

Beven y Germann (1981) y Germann y Beven. (1981a y 1981b), desarrollaron un modelo donde se involucra el volumen del sistema poroso y su efecto en la capacidad de infiltración del suelo que se puede estimar en términos del concepto de potencial de agua. Concluyeron que los macroporos tienen un efecto sobre el flujo de agua sólo cuando se mantienen las condiciones de suministro de agua en los macroporos. Esto ocurre cuando el sistema de microporos se aproxima a la saturación o cuando la velocidad del flujo vertical es tal que excede la capacidad de infiltración de los microporos debido a una lluvia o a la ruptura de la permeabilidad dentro del suelo, lo que involucra el sistema de macroporos y microporos en el movimiento del agua en el suelo. Bajo este esquema clasificaron el flujo de agua del sistema macroporos-microporos en cinco etapas:

- Infiltración de un macroporo seco.
- Ascenso de agua dentro del macroporo.
- Macroporo completamente saturado, que inicia cuando se presenta el escurrimiento superficial.
- Caída del agua dentro del macroporo que ocurre después que ha dejado de llover (o regar).
- Se presenta un flujo de agua desde los microporos hacia el macroporo (microporos que rodean el macroporo), presentando un ascenso de agua dentro del macroporo.

Las conclusiones fueron que la presencia de macroporos puede incrementar la pérdida por infiltración, condición que se presenta en un suelo con una conductividad hidráulica intermedia,

debido a que la capacidad de almacenamiento disponible en los macroporos es relativamente pequeña por lo que se saturan rápidamente. Además la infiltración es gobernada por la tasa de pérdida dentro de los microporos que rodean los macroporos. Los autores comentan que es un modelo con una aproximación inicial, para explicar la influencia del sistema poroso en el movimiento del agua.

3.2 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

La conductividad hidráulica es la permeabilidad que presenta un suelo al agua, también se le puede definir como el cociente del flujo unitario de agua entre el gradiente hidráulico, la conductividad hidráulica depende de la permeabilidad del suelo, la fluidez del agua, del contenido de humedad del suelo (Narro,1994).

La conductividad hidráulica es importante para calcular la cantidad de agua infiltrada en el suelo, y se define como la facilidad que tiene el suelo para permitir el flujo de agua en función del gradiente que se presenta (Aguilera y Martínez, 1996).

La conductividad hidráulica es la capacidad del sustrato para conducir el agua. Es importante que el flujo de agua hacia las raíces de las plantas sea elevado con el fin de reponer el agua perdida por transpiración. La conducción del agua en un medio poroso depende de la configuración espacial de los poros y continuidad de los mismos (percolación) y de su geometría, a la vez que depende del material que forma la matriz del sustrato. Este último factor es especialmente importante en los sustratos, puesto que, por una parte, la naturaleza del material determina el ángulo de contacto sólido-líquido, y por otra parte, existen poros interiores a las partículas, creando dos diferentes interfases para el movimiento del agua: el agua externa y el agua interna, con, posiblemente, distintas tasas de flujo para un mismo tamaño de poros (Búres, 1997).

Darcy demostró experimentalmente que la velocidad media con la que se mueve un fluido está dada por la ley que lleva su nombre y se representa por la siguiente ecuación.

$$V = -K \left(\frac{\Delta h}{\Delta s} \right)$$

Donde:

h = Carga

$$\Delta h = h_2 - h_1;$$

Δs = Distancia recorrida de 1 a 2;

k = Conductividad hidráulica que tiene la dimensión de velocidad (generalmente cm s^{-1}), y depende de las características del suelo y del fluido.

El signo negativo en la ecuación de Darcy se debe a que h decrece al aumentar s .

También V se refiere a la velocidad con que fluye el fluido considerando las porciones sólidas y vacías del medio (Sotelo, 1985).

Para la medición de este parámetro físico, Juárez y Rico (1986) clasifican los métodos en directos e indirectos. En los primeros se encuentra el permeámetro de carga constante y el permeámetro de carga variable. Los métodos indirectos son proporcionados en forma secundaria a partir de la curva granulométrica y por la prueba de consolidación; otro de los métodos es el morfológico, permite analizar la distribución de los poros dentro del suelo, previamente se preparan láminas delgadas del suelo montado en porta-objetos, se utilizan un microscopio y un analizador de imágenes para el análisis correspondiente.

Flamand (1981) indicó el procedimiento para obtener la conductividad hidráulica con el método del permeámetro de carga constante, indica, que si se crea una corriente a través de una muestra de suelo de espesor E y una superficie transversal al flujo A , el gasto Q respecto a una carga H , se obtiene al medir el volumen descargado en una probeta durante un tiempo determinado, por lo tanto, la conductividad hidráulica se obtiene con la siguiente expresión:

$$K = \frac{QE}{AH}$$

La conductividad hidráulica (K) depende de las características del suelo y de las propiedades del fluido en cuestión. Las características del suelo que afectan los valores de K son la porosidad total, la distribución del tamaño de poros, la geometría del poro y la tortuosidad del espacio poroso del suelo. Las propiedades del fluido que afectan la conductividad son la densidad y la viscosidad (Hillel, 1980).

3.2.1 PERMEÁMETRO

Básicamente un permeámetro es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a unos de sus extremos un depósito elevado de nivel constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante una llave de paso que en cada experimento mantiene el caudal también constante. Finalmente se mide la columna de agua para saber la carga o presión que se está aplicando (Perea, 1993).

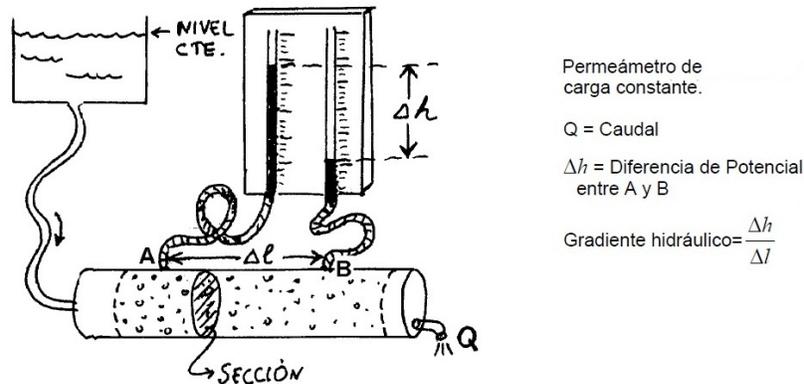


Figura 2. Permeámetro de carga constante

3.3 RIEGO POR SUCCIÓN CON CÁPSULAS POROSAS

Livingston (1918) parece ser el primero en usar autoirrigadores. Los usó en experimentos con plantas que necesitaban mantener un contenido de humedad en el suelo constante por largos períodos. El autoirrigador consistía esencialmente de una o varias cápsulas porosas cilíndricas, se enterraban en el suelo contenido en una maceta, se llenaban con agua y se conectaban a una fuente de abastecimiento de agua, situada a un nivel más bajo. A medida que el suelo iba perdiendo agua debido a la transpiración del cultivo o la evaporación, se rompía el equilibrio capilar entre el agua del suelo y el agua que se encuentra en los poros de la pared de la cápsula y el agua de ésta se mueve hacia el suelo. Las alturas de succión se controlaban por medio de una columna de agua o de mercurio.

Livingston (1918) menciona que para obtener una operación satisfactoria en los autoirrigadores es necesaria una adecuada continuidad capilar entre el agua del suelo y de la cápsula porosa, esto se logra teniendo un buen contacto entre el suelo y la superficie externa de la cápsula. Como se sabe, el suelo al perder agua se contrae y al humedecerse de nuevo, generalmente no regresa a su forma original. Esto puede ocasionar un rompimiento de la continuidad capilar original en

algunas partes del área de contacto, originando una disminución en el gasto proporcionado por el autoirrigador. Esta dificultad se presenta cuando se tienen cápsulas porosas de forma cilíndrica. Para mantener un buen contacto entre las paredes del autoirrigador y el suelo, diseñó unas cápsulas porosas de forma cónica que terminan en su parte superior en un cuello recto.

Livingston (1918) llenó 15 macetas con tres tipos diferentes de suelo, en cada maceta colocó un autoirrigador cónico; cada una de las 5 macetas de cada juego las colocó a una altura de succión de 2, 10, 20, 30 y 40 cm de Hg. En cada maceta se sembraron 5 semillas de trigo, las cuales se desarrollaron por seis semanas; entre algunas determinaciones que se hicieron están, el contenido de humedad de cada maceta y la cantidad total de agua entregada al suelo de cada maceta por el autoirrigador durante el período de seis semanas. De los datos obtenidos del experimento menciona que para cada suelo el contenido de humedad está determinado por la altura de succión; además el contenido de humedad de un suelo autoirrigado puede tener cualquier valor entre el máximo contenido capilar y el que corresponde al equilibrio con la altura de succión, para cualquier suelo hay un cierto rango en su contenido de humedad que se puede establecer y mantener por el autoirrigador, el límite superior de este rango es el máximo contenido capilar que se alcanza cuando la altura de tensión es cero. La cantidad de agua entregada al suelo es mayor cuando se tiene una altura de succión menor, y la velocidad de entrega de agua del irrigador al suelo por supuesto depende en gran parte de la velocidad de absorción de agua por las plantas.

Richards y Blood (1934) dicen que existen dos métodos para mantener constante la humedad del suelo en experimentos de invernaderos; el método de peso constante y el de la tensión capilar constante. Este último método hasta la fecha parece ser el más adecuado para este propósito. También mencionan que uno de los problemas de los autoirrigadores que se usa para controlar la humedad por el método de la tensión capilar constante es la entrada de aire proveniente de la fuente de abastecimiento. Para solucionar este problema proponen la construcción de las macetas. También describen la instalación de las macetas cuando se van a operar en grupo o individualmente.

El riego por succión abastece de agua a la planta en forma local, en este método se utilizan cápsulas porosas cuyo gasto es directamente proporcional al gradiente hidráulico, lo que indica que el flujo a través de la cápsula se puede describir con la ecuación de Darcy. Para el

abastecimiento del sistema se coloca un recipiente abajo del nivel de la cápsula, el cual genera un gradiente y distribuye la humedad en una capa de aproximadamente 1 cm alrededor de la cápsula.

En Cuba, se realizaron estudios para desarrollar la tecnología de Riego por Succión con la utilización de cápsulas porosas para el beneficio de cultivos hortícolas en invernaderos presentados por Vargas *et al* (2008), concluyen lo siguiente:

- En las condiciones de la región central del país, es posible obtener cápsulas porosas a un costo razonable y con propiedades hidrodinámicas apropiadas
- Se caracterizaron los materiales y sus proporciones adecuadas para la fabricación de cápsulas porosas. El costo de los materiales utilizados es relativamente bajo.
- El método constructivo (moldeado por vaciado), así como el procedimiento que se utilizó para la elaboración permitieron obtener cápsulas porosas con propiedades adecuadas para hacer crecer plantas en invernaderos.

En México, los primeros experimentos del riego por succión fueron presentados por Olguín (1975) y recalcó que la aplicación del agua es más eficiente y la operación del sistema de riego más sencilla, además de no requerir de una fuente externa de energía para abastecer las necesidades hídricas de la planta, por lo tanto, el agua es suministrada en forma localizada, de manera eficiente y continua, lo cual se traduce en mayores rendimientos por unidad de volumen de agua utilizada. Su funcionamiento se debe a la diferencia de energía que tiene el agua entre el suelo continuamente desecado, por el efecto de la evapotranspiración de un cultivo, y un cuerpo poroso comunicado a una fuente de abastecimiento que permite satisfacer las necesidades hídricas de la planta, por lo que, se obtiene un abasto más eficiente en la zona radicular del cultivo.

García (1977) reportó los resultados de un experimento que se realizó con el cultivar de fresa Tioga, donde se probó la eficiencia en el uso del agua y la potencialidad de rendimiento que uso un sistema de riego por succión, consiste de capsulas porosas conectadas con tubos de diámetro pequeño (3/8") a una fuente de agua, localizada a un nivel inferior al de la capsula, alrededor de esta última se desarrollan las raíces, se utilizaron tres niveles de fertilización y dos densidades de planta que correspondieron a 80,000 y 40,000 plantas/ha. Se utilizó un diseño de bloques al azar formando por 6 tratamientos y 4 repeticiones. Encontró que a mayor densidad de planta hubo

mayor rendimiento y que el método de riego por succión es capaz de abastecer la demanda de agua de un cultivo tan exigente como la fresa, usa volúmenes ocho veces menores que los usados a nivel comercial con métodos de riego superficiales. Se observó un desarrollo exuberante poco común en las plantas el cual fue debido a las dosis de fertilizantes que se utilizaron, las cuales fueron directamente a la raíz a través del sistema de riego por succión. Se encontró que los rendimientos de la fresa no fueron los esperados debido a que los estolones utilizados habían pasado por un excesivo período de refrigeración; pero aun así, el método de riego por succión resultó ser 7.9 veces más eficiente que el superficial en la producción de fruto por m³ de agua aplicada.

Morales (1978) llevo a cabo una serie de experimentos en condiciones de invernadero con cultivos de trigo (*triticum aestivum*), tomate (*licopersicum sculentum*) y frijol (*phaseolus vulgaris*), son considerados como tolerantes, semitolerante y susceptibles a la salinidad respectivamente. Los principales objetivos fueron determinar la potencialidad del método de riego por succión para cultivos usando agua salada. Determinar la distribución de sales en la zona radical con riego a succión y el efecto de estas sobre la tolerancia de los cultivos. Por último determinar el efecto de la altura de succión sobre la acumulación de las sales en la zona radical y el desarrollo de las raíces. Se comprobó que el método ofrece amplias perspectivas para el riego de cultivos sensibles usando agua salada, ya que estos aumentaron su tolerancia a las sales. Dicha tolerancia se demostró al obtener mayores rendimientos de materia seca, mayor área foliar, menor consumo de agua y mayor altura de planta que las obtenidas por el método de riego superficial. Igualmente en la distribución de sales se encontró que con el método de riego por succión las plantas estuvieron sometidas a una concentración salina muy similar a la del agua de riego, cosa que no ocurrió con el riego superficial; lo que demuestra que con el riego por succión la concentración de sales en la solución del suelo es menor que la generada por aguas de la misma calidad química aplicada con otros métodos de riego.

Rendón (1979) encontró que el taponamiento, las bajas uniformidades y pequeñas conductividades hidráulicas son las principales desventajas que presenta el riego por succión con cápsulas porosas. La causa del taponamiento de los poros no se ha podido explicar, ya que en un principio se pensaba que era ocasionado por el crecimiento de microorganismos en la pared, pero el uso de agua con cloro descartó tal posibilidad, por lo tanto, el autor concluyó que el

taponamiento se debía al depósito y acumulación de sales en los poros debido al lento movimiento del agua a través de las paredes de la cápsula, o bien, al aire que se encuentra disuelto en el agua y se acumula en la pared de la cápsula.

Del Valle (1977) presentó una metodología para abaratar la fabricación de las cápsulas, disminuyendo su volumen y superficie, logrando aumentar el caudal y el diámetro de mojado; obtuvo dos modelos matemáticos: el primero describe la distribución de la humedad del suelo y el segundo la velocidad de propagación de la humedad del suelo. Con la metodología aplicada se llegó a un uso más eficiente del agua, comparado con otros métodos de riego, la diferencia de potencial entre el suelo y la planta permite un abastecimiento constante y pequeño. Esta metodología se recomendó para regiones donde el factor limitante es el agua.

Coras (1979) comprobó que las tres formas geométricas de cápsulas porosas (cónica, cilíndrica y platillo), proporcionan agua al suelo en cantidades diferentes debido a que tuvieron diferentes conductividad hidráulica. Que el riego por succión ofrece grandes perspectivas en el ahorro de agua, eficiencia en uso de la misma y un aumento de hasta tres veces en el número de plantas por unidad de superficie. El mayor rendimiento de producción total correspondió a los tratamientos con riego por succión realizada con cápsulas cónicas.

Tijerina (1988) utiliza el sistema de riego por succión con cápsulas porosas sometió al cultivo de frijol a tres tratamientos de humedad en el suelo, lo cual se logró variando el área filtrante en función del número de cápsulas en operación y la altura de succión. Por otra parte se estudió el estatus del agua en el suelo y la planta mediante la medición de sus potenciales correspondientes y la resistencia a la difusión en la hoja. Semanalmente en cada tratamiento, se hizo la medición del índice de área foliar, la profundidad radical, el número de flores y de ejotes. Finalmente, se hizo un análisis para cada tratamiento de la biomasa total producida y el rendimiento de grano en función de la lámina consumida. Encontró que no obstante que se mantuvo en operación el sistema todo el ciclo del cultivo en dos tratamientos se observó una disminución del potencial del agua en el suelo después de los 55 días de la siembra, posiblemente debido a un taponamiento de los poros de la cápsula, por los pelos absorbentes de las raíces y precipitación del fertilizante dentro de los poros. Observó que la resistencia a la difusión, en la hoja durante la etapa de maduración aumentó y el potencial del agua en las hojas alcanzó un valor de -12 bars medido a

medio día. El análisis del rendimiento de grano resultó ser muy superior al compararlo con los rendimientos obtenidos por los métodos de riego tradicionales.

Albanil (1991) determinó la evapotranspiración, eficiencia en el uso del agua y fertilización del cultivo de fresa mediante riego por succión. Utilizó este sistema para investigar y comparar dos métodos de fertilización en fresa: por succión y tradicional. Se estimó la evapotranspiración y el crecimiento del cultivo con mediciones de área foliar y el sistema radical. Fertilizando a través del sistema de riego o fertilizando por el método convencional y usando el riego por succión, el desarrollo de raíces y producción de frutos por unidad de área fueron mejores. La productividad del agua por unidad de rendimiento de fruto en los tratamientos regados por succión fue 4.5 veces mayor que los tratamientos irrigados en forma tradicional.

Perea (1993) desarrolló una metodología para diseño, construcción y evaluación en laboratorio de un sistema de riego a baja presión con capsulas porosas. Se realiza como una alternativa de riego en lugares con exceso o deficiencia del recurso agua y cuyos objetivos fueron la construcción y caracterización de las capsulas porosas, diseñar y evaluar en laboratorio una línea regante y diseñar un sistema de riego para una parcela experimental. Los resultados indicaron que la metodología de construcción es aceptable, ya que los coeficientes de variación de las dimensiones de las capsulas porosas son bajos, 1.42% para el material del sitio No. 1 y 2.54% para el material del sitio No. 2. En la determinación de la conductividad hidráulica el método del permeámetro de carga constante tuvo una menor variabilidad comparada con el método morfológico, este último puede ser recomendado para el análisis de suelos y materiales porosos como un método de referencia. El coeficiente de uniformidad de la línea regante fue de 47.74%, este valor es bajo debido a la variación de la presión de funcionamiento de la capsula como consecuencia del estrangulamiento de la manguera alimentadora. El diseño del sistema de riego se realizó para un terreno con fuertes pendientes y cuyo problema principal fueron las grandes presiones al final de la línea regante. El costo total estimado para una hectárea de riego fue de \$1378. U.S.D.

3.3.1 EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO

El manejo de los sistemas de riego es importante para un uso más eficiente de los recursos naturales y la producción de los cultivos. La evaluación de los sistemas puede ser hecha con la definición de la eficiencia y uniformidad expresada numéricamente (Herman,1982).

3.3.2 UNIFORMIDAD DEL RIEGO

La definición de la uniformidad de riego se puede expresar como función de los volúmenes de agua medidos al utilizar diferentes sistemas de riego (Herman,1982). Varias ecuaciones de uniformidad se han usado para describir la uniformidad del sistema, tales como el coeficiente de uniformidad de varios autores.

El coeficiente de uniformidad de Christiansen fue propuesto en 1942 para la evaluación de sistemas de riego por aspersión, éste se define como:

$$CU = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{\sum_{i=1}^n x_i} \right]$$

Donde:

CU Coeficiente de uniformidad de Christiansen;

X_i Lámina de agua captada en recipientes en una malla igualmente espaciada;

\bar{x} Lámina media captada de todos los colectores o recipientes.

Herman (1982) indica que la descarga en el emisor se utiliza en lugar de las láminas aplicadas. La variabilidad de las descargas de los emisores causadas por la variación en los emisores y características hidráulicas son el resultado del control de calidad del fabricante.

Vermeiren y Jobling (1986) recalcaron que en las redes de riego localizado, el agua se transporta por una red de canalizaciones hasta un punto por donde se infiltra en el suelo, por lo que la uniformidad del flujo en las distribuciones de la red da una idea de la uniformidad en la distribución. La falta de uniformidad de los caudales, se puede deber a las variaciones de la presión en la red y la obstrucción y/o mala fabricación de los distribuidores.

Martínez (1991) recalcó que al inicio se utilizó la fórmula propuesta por Christiansen (1942) para calcular el coeficiente de uniformidad; sin embargo, se observó que presentaba algunos inconvenientes en el riego localizado ya que esta fórmula mide las desviaciones con respecto a la lámina media aplicada. Lo anterior significa que se da la misma importancia a las variaciones por encima de la media que las que están por debajo, esto es grave en el caso de riego por goteo, por lo que, las variaciones por encima indican desperdicio de agua que no afectan al cultivo pero si a

la eficiencia de riego, y las variaciones por debajo de la media indican que la planta recibe menos cantidad de agua, por lo tanto, su producción disminuye e incluso se puede perder totalmente.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede definir estadísticamente el CU con la fórmula propuesta por Karmeli y Keller (1975):

$$CU = 100 \left[1 - \frac{1.27CV}{\sqrt{e}} \right] \frac{q_n}{q_a}$$

Donde:

CV=Coeficiente de variación de fabricación del emisor

.e=Número de emisores de los que recibe agua cada planta

q_n =Caudal mínimo del emisor que corresponde a la presión mínima

q_a =Caudal medio de todos los emisores considerados

CU = Coeficiente de uniformidad

La ecuación anterior se puede desglosar en dos, esto permite determinar la fuente que ocasiona la no uniformidad del riego, por lo tanto, si la fuente de variación es provocada por la construcción y funcionamiento del emisor, es decir, si la presión se mantiene constante, el coeficiente de uniformidad se calcula por la ecuación:

$$CU' = 100 \left[1 - \frac{1.27CV}{\sqrt{e}} \right]$$

Cuando se requiere detectar la influencia de la presión no considerando la construcción de los emisores, el coeficiente de uniformidad se obtiene como:

$$CU'' = 100 \left[\frac{q_n}{q_a} \right]$$

3.4 EVAPORACIÓN

La evaporación es un proceso físico por el cual determinadas moléculas de agua aumentan su nivel de agitación por aumento de temperatura, y si están próximas a la superficie libre, escapan a la atmósfera. Inversamente otras moléculas de agua existentes en la atmósfera, al perder energía y

estar próximas a la superficie libre pueden penetrar en la masa de agua. Se denomina evaporación el saldo de este doble proceso que implica el movimiento de agua hacia la atmósfera.

La evaporación depende de la insolación, del viento, de la temperatura y del grado de humedad de la atmósfera. Por todo esto la evaporación contemplada en un período corto de tiempo es muy variable, no así cuando el ciclo a considerar es un año, en el cual la insolación total es bastante constante. Como magnitud en zonas templadas continentales, la evaporación diaria en verano es del orden de 6 a 8 mm/día y en invierno puede ser casi despreciable.

3.4.1 FACTORES QUE DETERMINAN LA EVAPORACIÓN

- Radiación solar. Es el factor determinante de la evaporación ya que es la fuente de energía de dicho proceso.
- Temperatura del aire. El aumento de temperatura en el aire facilita la evaporación ya que: en primer lugar crea una convección térmica ascendente, que facilita la aireación de la superficie del líquido; y por otra parte la presión de vapor de saturación es más alta.
- Humedad atmosférica. Es un factor determinante en la evaporación para que ésta se produzca, es necesario que el aire próximo a la superficie de evaporación no esté saturado (situación que se facilita con la humedad atmosférica baja).
- El viento. Después de la radiación es el más importante, ya que renueva el aire próximo a la superficie de evaporación que está saturado. La combinación de humedad atmosférica baja y viento resulta ser la que produce mayor evaporación. El viento también produce un efecto secundario que es el enfriamiento de la superficie del líquido y la consiguiente disminución de la evaporación.
- Tamaño de la masa de agua. El volumen de la masa de agua y su profundidad son factores que afectan la evaporación por el efecto de calentamiento de la masa. Volúmenes pequeños con poca profundidad sufren un calentamiento mayor que facilita la evaporación.
- Salinidad. Disminuye la evaporación, fenómeno que sólo es apreciable en el mar.

3.4.2 CÁLCULO DE LA EVAPORACIÓN

Método de Balance Energético

Para estimar la evaporación por unidad de superficie, en función de la radiación neta que entra, de la densidad del agua, y del calor latente de evaporación (calor necesario para que una sustancia cambie de estado):

$$E = R_n / (L_v \cdot f_w) \text{ mm/día} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

E: Evaporación (mm/día)

R_n: Radiación neta (W/m²)

f_w: Densidad del agua (kg/m³)

L_v: Calor latente de evaporación = (2,501*10⁶ – 2370*T^aH₂O°C) J/Kg.

El calor latente de vaporización, L_v, expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. El valor del calor latente de vaporización varía en función de la temperatura del agua (T^aH₂O°C).

3.4.3 TRANSPIRACIÓN

La transpiración consiste en la evaporación de agua líquida contenida en los tejidos de la planta y ésta es removida a la atmósfera. Los cultivos predominantemente pierden su agua a través de los estomas. Éstos son aperturas pequeñas ubicadas en la hoja de la planta a través de la cual los gases y el vapor de agua de la atmósfera se intercambian. El agua, junto con algunos nutrientes, es absorbida por las raíces y se transporta a través de la planta. La vaporización ocurre dentro de la hoja, en los espacios intercelulares, y el intercambio de vapor con la atmósfera es controlado por la abertura de los estomas. Casi toda el agua absorbida es perdida por transpiración y sólo un fragmento diminuto se usa dentro de la planta (Allen et.al., 1998, citado por Gómez, 2006).

3.4.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración, más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrollan.

La evapotranspiración puede ser limitada por la humedad disponible dentro de una zona radicular, por las enfermedades de cultivos y por algunas características morfológicas externas e internas del cultivo.

La correcta determinación de la evapotranspiración es uno de los mayores problemas prácticos de la agrometeorología y su resolución contribuiría en gran medida al aumento de la efectividad de la agricultura, tanto de riego como de secano. En algunos países, la agricultura es la actividad que consume más agua, con una muy baja eficiencia, llegando a representar más del 85% del consumo total, lo que va acompañado de una eficiencia global del 30% al 40%; en general, se trata de una utilización excesiva del recurso (Martelo, 1986, citado por Muñoz, 2002).

Los trabajos de investigación deberían entonces, orientarse hacia el mejoramiento de la eficiencia del riego, a través de la determinación de sus montos o cantidades de agua y frecuencias referidas a la capacidad de retención del agua del suelo y a la tasa de evapotranspiración en función de condiciones locales. Así mismo este tipo de investigación sería de gran utilidad para la agricultura de secano, puesto que permitiría un mejor aprovechamiento de las potencialidades edafoclimáticas de un lugar, a través de estudios de zonificación de cultivos y de calendarios de labores más detallados.

De hecho, no es la evapotranspiración por ella misma lo interesante, sino el déficit hídrico que soporta la planta; es la intensidad y/o frecuencia del déficit lo que va a influenciar el rendimiento del cultivo, y en este punto intervienen igualmente la reacción de cada cultivo en cada fase específica de su desarrollo (Doorenbos y Pruitt, 1979, citado por Muñoz, 2002). Sólo tomando en cuenta todos estos factores puede llegarse a una aproximación más realista de las necesidades hídricas de los cultivos.

El llamado “Uso consuntivo” está formado por la evapotranspiración más el agua que utilizan las plantas en la formación de los tejidos durante todo el ciclo vegetativo de los cultivos, 1% del agua total utilizada, aproximadamente (Aguilera y Martínez, 1996, citado por Muñoz, 2002).

3.4.5 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ETO)

Thornthwaite (1944) citado por Aguilera y Martínez (1996), define el término Evapotranspiración Potencial como “La pérdida de agua que ocurriría si en ningún momento hubiera una deficiencia de agua en el suelo para el uso de la vegetación”. Penman (1956), sugirió

modificar esa definición para incluir la especificación “que la superficie estuviera cubierta totalmente por vegetación verde”, pues se ha encontrado que la Evapotranspiración, depende de la densidad de cubierta vegetal sobre el suelo y de la edad de la planta.

El método del tanque tipo “A” se utiliza en el cálculo de la ET_o y su relación es la siguiente:

$$ET_o = K_p \times E_v$$

Donde:

ET_o : Evapotranspiración de Referencia (mm)

E_v : Evaporación tomada del tanque tipo “A” (mm)

K_p : Coeficiente del tanque tipo “A”

3.4.6 EVAPOTRANSPIRACIÓN MÁXIMA (ETM)

Es la cantidad máxima de agua perdida por un cultivo en condiciones climáticas específicas y cuando permanece casi siempre a su capacidad máxima de almacenamiento (Muñoz, 2002).

$$ETM = K_c * ET_o$$

Donde:

ETM: Evapotranspiración máxima (mm)

ET_o : Evapotranspiración de Referencia (mm)

K_c : Coeficiente del cultivo

3.4.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL (ETR)

Es la cantidad de agua expresada como lámina de riego que pierde un cultivo dado en las condiciones fenológicas, edáficas y meteorológicas existentes (Apuntes de Meteorología Agrícola, 2005).

3.5 TEMPERATURA

Se usa para estimar los requerimientos de calor de las plantas, por lo tanto es uno de los elementos climatológicos más importantes que determinan el desarrollo y rendimiento de los cultivos, se habla de que una planta requiere 1500 °C-día ó 1500 “unidades de calor” para

completar su ciclo vegetativo. En términos generales los procesos fisiológicos que realizan los cultivos como la fotosíntesis, la respiración y el crecimiento están fuertemente influenciados por ella (Romo y Arteaga, 1989).

Por tradición este elemento meteorológico se ha manejado utilizando sus promedios mensuales y anuales, sin embargo para fines agrícolas estos valores no reflejan la variación que se presenta a través del año o durante el ciclo de los cultivos (Granados, 1988).

Para que el uso de la temperatura tenga un significado más preciso sobre el desarrollo de los cultivos y poder determinar la posible adaptación y probabilidad de éxito, tanto de especies anuales como de especies perennes, ésta debe expresarse en forma de elementos agroclimatológicos (Granados, 1988).

3.6 SUSTRATOS

Un sustrato es todo material sólido, natural, de síntesis, mineral u orgánico distinto del suelo *in situ*, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el desarrollo del sistema radicular y el crecimiento de la planta (Abad y Noguera, 2000) y que puede intervenir o no en la nutrición de la planta. Por su parte Burés (1998), lo define como cualquier medio que se utilice para cultivar plantas en contenedores entendiéndose por contenedor cualquier recipiente que tenga una altura limitada y que su base este sobre la superficie del suelo.

3.6.1 PROPIEDADES DE LOS SUSTRATOS DE CULTIVO

De acuerdo a Urrestarazu (2004) con respecto a la caracterización de sustratos se suelen distinguir tres tipos de propiedades: físicas, químicas y biológicas comenta lo siguiente.

3.6.1.2 PROPIEDADES FÍSICAS

La caracterización física estudia la distribución volumétrica del material sólido, el agua y el aire, así como su variación en función del potencial matricial.

- Porosidad

Es el volumen total del medio no ocupado por las partículas orgánicas o minerales y por tanto, lo estará por aire o agua en una cierta proporción. Su valor óptimo no debería ser inferior al 85% del volumen.

- Capacidad de aireación

Se define como la proporción del volumen del sustrato de cultivo que contiene aire después de que dicho sustrato ha sido saturado con agua y dejado drenar, usualmente a 10 cm de tensión de columna de agua. Su valor óptimo debe ser entre 20-30% del volumen.

- Agua fácilmente disponible

Es la diferencia entre el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión (mátrica), y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua. Su valor óptimo es de entre 20-30% del volumen.

- Agua de reserva

Es la cantidad de agua (% en volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de columna de agua (c.a). Su valor óptimo está entre 4-10% volumen.

- Densidad aparente

La densidad de un sustrato se puede referir al material sólido que lo compone y entonces se habla de densidad real, o bien a la densidad calculada considerando el espacio total ocupado por los componentes sólidos más el espacio poroso, y se denomina porosidad aparente, la densidad aparente del sustrato puede ser tan baja como 0.15 g cm^{-3} .

- Mojabilidad

Algunos materiales orgánicos presentan dificultades para ser humedecidos inicialmente y para ser rehúmedecidos una vez se han secado en el contenedor, lo que puede provocar un retraso y una reducción en el crecimiento de la planta. Las dificultades para mojar un sustrato se atribuye generalmente a dos causas: la hidrofobicidad del material y la contracción que experimenta al secarse.

La mojabilidad se expresa como el tiempo (en minutos) necesarios para que se absorban 10 mL de agua destilada a través de la superficie de una muestra de sustrato seco a $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El nivel óptimo es igual o inferior a 5 minutos.

- Estructura

Puede ser granular como la de la mayoría de los sustratos minerales o bien fibrilares. La primera no tiene forma estable, acoplándose fácilmente a la forma del contenedor,

mientras que la segunda dependerá de las características de las fibras. Si son fijadas por algún tipo de material de cementación, conservan formas rígidas y no se adaptan al recipiente pero tienen cierta facilidad de cambio de volumen y consistencia cuando pasan de secas a mojadas.

- **Granulometría**

El tamaño de los gránulos o fibras condiciona el comportamiento del sustrato, ya que además de su densidad aparente varía su comportamiento hídrico a causa de su porosidad externa, que aumenta de tamaño de poros conforme sea mayor la granulometría.

- **Contracción de volumen**

Se refiere al porcentaje de pérdida de volumen cuando el sustrato se seca (generalmente a 105°C), referido al volumen aparente inicial en unas determinadas condiciones de humedad (generalmente saturación y drenaje posterior a 10 cm de tensión de c.a). Informa sobre el grado de variación del volumen del sustrato bajo condiciones de cultivo, en ciclos de humectación-deseccación.

La contracción del volumen facilita la compactación del sustrato y la compresión de las raíces, disminuye la eficiencia del riego y la fertilización, etc.

El nivel óptimo de la contracción, expresada como pérdida de volumen, se sitúa por debajo del 30%.

3.6.1.3 PROPIEDADES QUÍMICAS

Las propiedades químicas de los sustratos caracterizan las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del sustrato: reacciones de disolución e hidrólisis de los constituyentes minerales (química), reacciones de intercambio de iones (físico-química) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímica).

Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen en mayor grado a la química de los sustratos, debido principalmente a la formación y presencia de las sustancias húmicas, es uno de los productos finales de la descomposición de la materia orgánica.

- **Capacidad de intercambio catiónico**

Se define como la suma de los cationes que pueden ser adsorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Dichos cationes quedan así retenidos frente al efecto lixivante del agua y están disponibles para la planta.

El valor óptimo de la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos depende de la frecuencia de la fertirrigación.

Los materiales orgánicos presentan una elevada capacidad de intercambio catiónico y una alta capacidad de amortiguamiento a cambios rápidos en la disponibilidad de los nutrientes y en el pH. Una capacidad de intercambio catiónico elevada constituye un depósito de reserva para los nutrientes.

La capacidad de los sustratos orgánicos para adsorber cationes metálicos depende del pH: cuanto más alto es el pH, más elevada es la capacidad de intercambio catiónico.

- Disponibilidad de los nutrientes

Los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre sí en el contenido en nutrientes asimilables. Así, algunos (turba, corteza de pino, mantillo de bosque, etc.) poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables, mientras que otros (composta, p.ej.) presentan niveles elevados, dependiendo del origen de la composta y del proceso del compostaje.

Para un crecimiento óptimo de las plantas, se deben añadir nutrientes adicionales, como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo.

Se consigue frecuentemente un crecimiento óptimo de las plantas cuando una aplicación moderada de abonos de liberación lenta o progresiva es complementada con una fertilización a través del riego.

- Salinidad

Se refiere a la concentración de las sales solubles presentes en la solución del sustrato.

Las causas que provocan un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar éste en el contenedor, son:

- ✓ La presencia de fertilizantes insolubles

- ✓ Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución nutritiva es superior a las cantidades absorbidas por la planta.
- ✓ Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.
- pH

Las plantas pueden sobrevivir en un amplio intervalo de pH del sustrato sin sufrir desórdenes fisiológicos aparentes, siempre y cuando todos los nutrientes se suministren en forma asimilable. No obstante, el crecimiento y el desarrollo de las plantas se ven reducidos de modo marcado en condiciones de acidez o alcalinidad extremas.

El pH ejerce sus efectos principales sobre la asimilabilidad de los nutrientes, la capacidad de intercambio catiónico y la actividad biológica. Bajo condiciones de cultivo intensivo, se recomienda mantener el pH del sustrato dentro de un intervalo estrecho.

Nivel de referencia en el cultivo de plantas ornamentales en contenedor: pH (extracto de saturación) = 5.2-6.3. Nivel óptimo en el cultivo sin suelo de hortalizas: pH (disolución del sustrato) = 5.5-6.8.

- Relación Carbono: Nitrógeno (C/N)

La relación C/N se usa como un índice del origen de la materia orgánica, de su madurez y de su estabilidad. Los daños que aparecen en las plantas cultivadas sobre materiales orgánicos inmaduros son debidos a tanto a una inmovilización del nitrógeno como a una baja disponibilidad del oxígeno en la rizosfera. Esta situación está provocada por la actividad de los microorganismos, que descomponen los materiales orgánicos y utilizan el nitrógeno para la síntesis de sus proteínas celulares. El oxígeno es también consumido por la actividad microbiana. Una relación C/N inferior a 40 se considera como óptima para el cultivo en sustrato y es un índice de un material orgánico maduro y estable.

3.6.1.4 PROPIEDADES BIOLÓGICAS

Cualquier actividad biológica en los sustratos es claramente perjudicial, los microorganismos compiten con la raíz por oxígeno y nutrientes. También pueden degradar el sustrato y empeorar sus características físicas de partida. Generalmente disminuye su capacidad de aireación,

pudiéndose producir asfixia radicular. La actividad biológica está restringida a los sustratos orgánicos y se eliminarán aquellos cuyo proceso degradativo sea demasiado rápido.

Así las propiedades biológicas de un sustrato se pueden concretar en:

- Velocidad de Descomposición

La velocidad de descomposición es función de la población microbiana y de las condiciones ambientales en las que se encuentre el sustrato. Esta puede provocar deficiencias de oxígeno y de nitrógeno, liberación de sustancias fitotóxicas y contracción del sustrato. La disponibilidad de compuestos biodegradables (carbohidratos, ácidos grasos y proteínas) determina la velocidad de descomposición.

- Efectos de los Productos de Descomposición

Muchos de los efectos biológicos de los sustratos orgánicos se atribuyen a los ácidos húmicos y fúlvicos, que son los productos finales de la degradación biológica de la lignina y la hemicelulosa. Una gran variedad de funciones vegetales se ven afectadas positivamente por los ácidos húmicos y fúlvicos. Las sustancias húmicas actúan, asimismo, como transportadoras de los micronutrientes para las plantas.

- Actividad Reguladora del Crecimiento

Es conocida la existencia de actividad auxínica (que controla el crecimiento celular y la iniciación de las raíces) en los extractos de muchos materiales orgánicos utilizados en los medios de cultivo.

Propiedades supresivas. Dificultan o inhiben el crecimiento y/o desarrollo de determinados agentes fitopatógenos, especialmente hongos. Estas propiedades se han encontrado en materiales (residuos) orgánicos compostados, particularmente cortezas de árboles, con supresividad frente a enfermedades inducidas por *Phytophthora*, *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, etc.

Los fenómenos de supresividad de las cortezas de árboles compostadas son debido principalmente a la microflora presente en dichas compostas.

3.6.1.5 CARACTERÍSTICAS DEL SUSTRATO IDEAL

El mejor medio de cultivo depende de numerosos factores como son el tipo de material vegetal con el que se trabaja (semillas, plantas, estacas, etc.), especie vegetal, condiciones climáticas, sistemas y programas de riego y fertilización, aspectos económicos, etc.

Para obtener buenos resultados durante la germinación, el enraizamiento y el crecimiento de las plantas, se requieren las siguientes características del medio de cultivo:

Propiedades Físicas:

- Elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible.
- Suficiente suministro de aire.
- Distribución del tamaño de las partículas que mantenga las condiciones anteriores.
- Baja densidad aparente.
- Elevada porosidad.
- Estructura estable, que impida la contracción (o hinchazón del medio).

Propiedades Químicas:

- Baja o apreciable capacidad de intercambio catiónico, dependiendo de que la fertirrigación se aplique permanentemente o de modo intermitente, respectivamente.
- Suficiente nivel de nutrientes asimilables.
- Baja salinidad.
- Elevada capacidad de amortiguamiento y capacidad para mantener constante el pH.
- Mínima velocidad de descomposición.

Otras Propiedades

- Libre de semillas de malas hierbas, nematodos y otros patógenos y sustancias fitotóxicas.
- Reproductividad y disponibilidad.
- Bajo costo.
- Fácil de mezclar.
- Fácil de desinfectar y estabilidad frente a la desinfección.
- Resistencia a cambios externos físicos, químicos y ambientales.

Basándose de investigaciones anteriores acerca de sistemas de riego por subirrigación y de azoteas verdes.

El propósito de esta investigación fue evaluar las características hidráulicas de las capsulas porosas, y el diseño de un sistema de riego por subirrigación por medio de capsulas porosas, a partir de dicha caracterización (que se puede usar en diversa áreas además de la agricultura, p.e, azoteas verdes, jardinería). Este tipo sistema de riego es sustentable por lo cual no necesita energía para su funcionamiento, (dado que opera por medio de presiones negativas con la fuerza de la presión atmosférica).

4.MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIALES

Materiales objetivos fueron las capsulas porosas conicas

Limpieza de capsulas, que consiste en eliminar partículas (sales) en una solución de ácido clorhídrico a 3 molar.

- Ácido clorhídrico
- Agua
- Bote de 150L

Perforaciones y taponamiento

- Vernier
- Taladro
- Brocas
- Tapón de hule

Interconexiones

- Manguera ciega de polietileno 16 mm
- Inciales de 16 mm
- Goma de 16 mm
- Cople de 16 mm
- T(tees) 16 mm
- Codo 90° 16 mm
- Valvula de paso de 16 mm

Evaluación

- Hilo cáñamo
- Nivel
- Botes de 20L
- Bolsas de plástico

- Ligas
- Tinajas
- Balanza digital
- Sustratos
- Computadora
- Microsoft office Excel
- Microsoft office Word

4.2 MÉTODOS

Búsqueda y selección de capsulas porosas.

Para empezar la evaluación hidráulica de capsulas porosas, se buscó en distintas tesis sobre capsulas porosas si ya habían hecho experimentos con este tipo de capsulas porosas, por lo que se encontró algunas investigaciones hechas en el Colegio de Postgraduados, por lo que se procedió a buscar capsulas de las que se probaron en las investigaciones anteriores y así poder darles continuidad a las investigaciones previas.

Se encontró en la estación meteorológicas del Colegio de Postgraduados que habían capsulas porosas fabricadas con barro de la región de Oaxaca, con distintas formas (cónicas, cilíndricas y de platillo) de las cuales habían un mayor número de capsulas cónicas, por lo que se escogieron al azar 50 capsulas con esta forma (figura 3), en condiciones completas (es decir no rotas).

Limpieza de las capsulas

Dado el estado de las mismas por su uso (de hace algunos años) se procedió a limpiarlas. Así que se dejaron remojando en una solución de ácido clorhídrico a 3 molar durante 15 días para poder eliminar el excedente de sales que contenían (en un tanque de aproximadamente 150 litros).



Figura 3. Capsulas escogidas al azar.

Medición de la superficie exterior de las capsulas

Ya limpias las capsulas (figura 4) se le midieron sus dimensiones obteniendo las siguientes medidas 13 cm de alto, 11 cm de diámetro inferior y 4 cm de diámetro superior con un espesor promedio de 6.1 mm y un área total de 384.5 cm^2 , todas las capsulas tienen 4 perforaciones 2 en la parte superior y 2 en la inferior de 8 mm de diámetro.



Figura 4. Capsulas limpias (secándose).

Modificación de las interconexiones entre capsulas

Ya que se encontraban libre de excedentes de sales, se hizo más grande uno de los orificios superiores a 16 mm de diámetro introduciendo así una manguera de polietileno ciega de 16 mm con su respectiva inicial y su goma de la misma medida de marca comercial para poder mejorar las interconexiones entre capsulas con el fin de minimizar perdidas y evitar fugas.

Cabe mencionar que los tres orificios restantes se sellaron con tapones de hule.

Permeámetro modificado para la evaluación hidráulica de las capsulas

Se conectaron 10 capsulas (figura 5) en serie con la manguera de 16 mm, por medio de codos y T (tees) se fueron interconectando 5 capsulas de lado izquierdo y 5 del derecho, y en medio se colocó un bote dándole la carga requerida y otro bote de almacenamiento.



Figura 5. Capsulas interconectadas.

Conectadas y nivelada las capsulas (figura 6) se prosiguió a purgar el sistema para evitar partículas de aire dentro del mismo.



Figura 6. Capsulas niveladas y libre de aire.

Con el sistema libre de fugas de agua y de aire, se procedió a cubrir con una bolsa de plástico (figura 7) sujetadas en la parte superior con una liga cada capsula para recolectar volumen de agua que emiten.



Figura 7. Capsulas cubiertas con bolsas de plástico.

Con esta variante del permeámetro tradicional se pudo acelerar las mediciones de volumen emitido por capsula (figura 8), estas mediciones se hicieron a dos diferentes cargas 50 y 40 cm para las 50 capsulas seleccionadas.



Figura 8. Mediciones del volumen emitido por capsula.

Se hicieron cuatro mediciones del volumen de agua que emitió, por cada capsula, el cual se pesó en una báscula digital quitándole el peso de la bolsa. Con el peso neto del volumen se convirtió a los gramos a centímetros cúbicos (donde se asumió una densidad de agua igual a 1 g cm^{-3}) para cada una de las 50 capsulas, que se probaron a dos cargas (40 y 50 cm de columna de agua). Se procedió a calcular el gasto y la conductividad hidráulica para cada capsula para cada una de las cuatro repeticiones, por medio de las siguientes ecuaciones.

Gasto

$$Q = \frac{V}{t} \dots\dots\dots(2)$$

Dónde:

Q: Gasto (cm^3/h)

V: Volumen (cm^3)

t: Tiempo (h)

Conductividad Hidráulica

$$K = \frac{QE}{AH} \dots\dots\dots(3)$$

Dónde:

K = Conductividad hidráulica (cm/h)

Q = Gasto (cm³/h)

E = Espesor (cm)

A = Área (cm²), en el caso de las capsulas la superficie de exposición.

H : Carga (cm)

Dado que sólo se contó con dos pares de datos para cada capsula porosa de conductividad hidráulica, se seleccionaron diez capsulas a partir de las 50 capsulas. A estas por medio del permeámetro se determinó la conductividades hidráulicas a 30, 20, 10, 0, -5, -10 cm de columna de agua (figura 9).



Figura 9. Medición del volumen emitido a diferente carga.

Se calculó la evaporación de cada hora en que se hicieron las mediciones y el fotoperiodo para cada día en las que se hicieron, esto para ver la relación del volumen emitido o conductividad hidráulica con respecto a la evaporación y las horas brillo sol. Para el cálculo se usa la ecuación (1), del método del balance energético para estimar la evaporación.

Diseño de un sistema de riego por medio de capsulas porosas

Dado la variación en la conductividad hidráulica que se observó en la primera parte del experimento (cuadro 6 y 7 del anexo). Se seleccionaron diferentes capsulas para hacer el sistema de riego, lo cual se realizó de la siguiente manera. Uno determina una demanda de agua máxima,

en este caso se consideró una demanda de 6 mm/día. Dado una superficie, se determina el volumen de agua necesario a satisfacer, y dado que se cuenta con la caracterización de las capsulas, en este caso de la conductividad hidráulica, la pregunta es cuantas capsulas se requieren para satisfacer esta demanda hídrica, por lo que se buscan las capsulas que en la suma de su conductividad hidráulica cumplen con la demanda.



Figura 10. Prueba para observar fugas en el montaje de las capsulas.

Así que se hicieron dos grupos de capsulas que satisfacen la demanda de agua, a partir de las últimas diez capsulas.



Figura 11. Grupos de Capsulas seleccionadas para hacer el sistema de riego.

El primer grupo fue con 4 y el segundo con 5 capsulas (figura 11), donde en cada grupo la suma de la conductividad hidráulica son iguales, a pesar que cada una presenta diferente conductividad hidráulica. Se realizó el experimento en dos etapas, en la primera (figura 12), se tomaron 4 capsulas y se pusieron en un recipiente de 2507.18 cm² cubiertas de un sustrato de tezontle fino

(malla 8). En otro recipiente de las mismas dimensiones se colocaron 5 capsulas y se cubrieron con el mismo sustrato. De este experimento se probó que si se diseña a partir de características de las capsulas en ambos casos se debe consumir lo mismo de agua, si se exponen a las mismas condiciones atmosféricas.



Figura 12. Primera etapa del experimento con sustrato fino.

En una segunda etapa se sustituyó el sustrato (figura 13), por el tezontle mediano (partículas que se retuvieron entre las mallas 8 y malla 6). En parte se completó la hipótesis anterior que es que sin importar el tipo de sustrato (en tamaño), el sistema de riego por subirrigación también debe funcionar.

En ambas etapas se manejó el sistema de subirrigación con una carga de succión de 10 cm de columna de agua, donde se midió la laminada evaporada.



Figura 13. Segunda etapa del experimento con sustrato mediano.

5.RESULTADOS

Conductividad hidráulica de las capsulas porosas

Los resultados que a continuación se exponen, se inicia con los volumen medidos con su respectivo tiempo de evaluación para cada una de las 50 capsulas. En el cuadro 4 del anexo se indican los resultados obtenidos para una carga de columna de agua de 50 cm y en el cuadro 5 se indica para una carga de 40 cm, respectivamente con cuatro repeticiones.

A partir de la información de los cuadros 4 y 5 del anexo (de volumen agua de emitida por capsulas y el tiempo de evaluación) y de la geometría de la capsula (área promedio de 384.5 cm^2) se calcularon los gastos y la conductividad hidráulica con las ecuaciones (2) y (3) ya citadas, los resultados se indican en los cuadro 6 y 7 del anexo.

Donde se observa que con una carga de 50 cm de agua el gasto vario de 1.7 a $244.5 \text{ cm}^3/\text{h}$, en el caso de la conductividad hidráulica oscilo entre 0.0001 a 0.0072 cm/h . En términos de los promedios el gasto vario de 2.216 a $221.62 \text{ cm}^3/\text{h}$ y la conductividad hidráulica entre 0.0001 a 0.00662 cm/h .

De manera similar para una carga de 40 cm de agua el gasto oscilo de 0.68 a $454.57 \text{ cm}^3/\text{h}$, en el caso de la conductividad hidráulica fue de 0.0001 a 0.0177 cm/h . En términos de promedios vario entre 1.11 a $331.5 \text{ cm}^3/\text{h}$ el gasto y entre 0.0001 a 0.0127 cm/h para la conductividad hidráulica. Como un resumen se puede consultar el cuadro 1.

Cuadro 1. Valores máximos y mínimos de gasto y conductividad hidráulica, a partir de todas las repeticiones y los promedios, de las capsulas porosas.

Q (cm^3/h)	De todas las muestras		Desviación estándar	Promedio	
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
H = 40	0.68	454.57*	73.71	1.11	331.5
H= 50	1.7	244.5	55.65	2.216	221.62
Ks (cm/h)	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
H= 40	0.0001	0.0177	0.00268	0.0001	0.0127
H= 50	0.0001	0.0072	0.00163	0.0001	0.00662

- El gasto máximo con un carga de 40 cm solo se presentó en dos capsulas por arriba de 400 cm³/h.

Donde se puede concluir que las capsulas porosas no son homogéneas en términos de la conductividad hidráulica, dada su gran variación, los valores máximos fueron muy erráticos por lo que se concluye con base a los valores mínimos. Donde a mayor carga le corresponde una mayor conductividad hidráulica y gasto.

Conductividad hidráulica y evaporación durante la prueba de medición

Dado que el sistema de evaluación de la conductividad hidráulica (en el permeámetro) se recolecto el gasto (y no a partir del volumen desplazado, como lo es el los permeámetros de carga constante), por lo que fue necesario evaluar si existe una relación entre la conductividad hidráulica y la evaporación en el momento de hacer la medición.

Para ello se calculó la evaporación a partir de la radiación solar neta y la temperatura cuando se evaluaron las 30 capsulas, por medio de la ecuación (1). La evaporación se estimó durante el intervalo de tiempo que duro cada prueba, que se midió el gasto y después la conductividad hidráulica, a partir de la información meteorológica de la estación automática. Esto se realizó en 30 capsulas para las cargas de 40 y 50 cm de columna de agua.

Para evaluar este efecto se ajustó un modelo lineal entre la Evaporación (cm/h) con la K_s (cm/h) a todos los datos y a los promedios de las repeticiones. En el caso para una carga de 50 cm de columna de agua y con toda la información, se determinó que no existe relación significativa (dado su coeficiente de determinación) a partir del modelo lineal que se obtuvo (figura 14):

$$\text{Evaporación (cm/h)} = 0.0265 K_s \text{ (cm/h)} + 0.0015, r^2 = 0.09504$$

De manera similar se realizó para los promedios (como se indica en la figura 15):

$$\text{Evaporación (cm/h)} = 0.0313 K_s \text{ (cm/h)} + 0.0012; r^2 = 0.12686$$

En ambos casos se tiene un coeficiente de determinación bajo, por lo que el sistema de medición, en este caso el permeámetro, fue aceptable con un efecto mínimo entre ambas variables (evaporación y K_s).

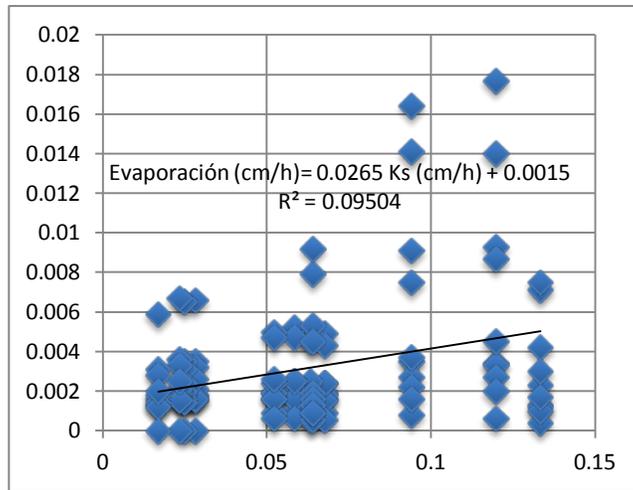


Figura 14. Relación entre la evaporación y conductividad hidráulica para una carga de 50 cm.

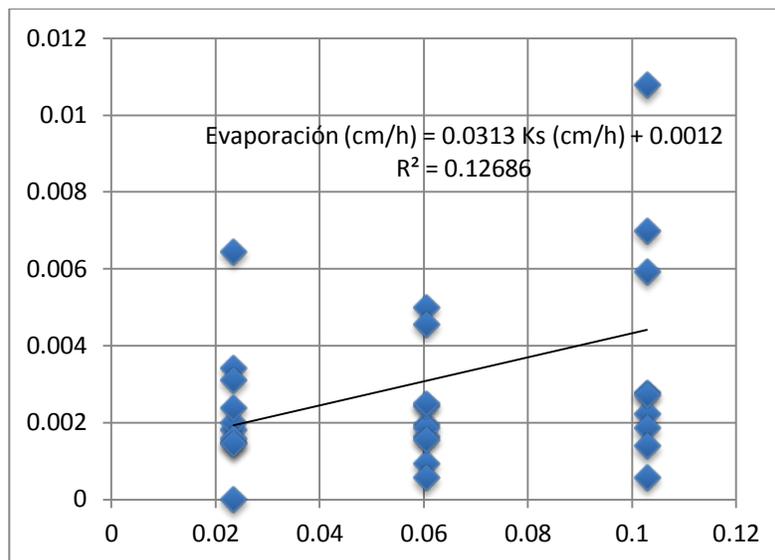


Figura 15. Relación entre los valores promedios de evaporación y conductividad hidráulica para una carga de 50 cm.

La conductividad hidráulica de las capsulas a diferentes cargas de columna de agua.

A partir de las 50 capsulas, que se evaluaron previamente, se escogieron al azar 10 capsulas para evaluarlas a seis cargas, que fueron 30, 20, 10, 0, -5, -10 cm de columna de agua. La información del tiempo de muestreo, volumen de agua, gasto y conductividad hidráulica a cada una de las cargas citadas, como se indica en el Cuadro 10 del anexo. Con el fin de evaluar su comportamiento a diferentes cargas el procedimiento fue el mismo que se utilizó con las primeras capsulas. A partir de los volúmenes de agua emitida por cada capsula, columna de agua (a presión y succión) y con el área promedio de 384.5 cm² se calcularon los gastos y la

conductividad hidráulica para cada una de las repeticiones. En el caso de que el agua esté a una presión igual que la atmosférica entonces su conductividad hidráulica se consideró cero. Y cuando el agua está a una presión menor que la atmosférica entonces su conductividad hidráulica es negativa.

A partir del cuadro 10 del anexo, se estimó el promedio de las conductividades hidráulica para cada uno de las 10 capsulas, y para cada carga de columna de agua (30,20,10,0,-5 y -10 cm). El resumen de estos promedios se indica en el cuadro 2, que a partir de estos datos se obtuvo la figura 16.

Cuadro 2. Conductividad hidráulica (cm/h) de las capsulas porosas a diferentes carga.

NÚMERO DE CAPSULA										
H	13	14	50	22	2	28	49	44	20	35
30	0.006725	0.004075	0.00145	0.002325	0.000025	0	0.00075	0.004875	0.004125	0.006775
20	0.007675	0.00455	0.0016	0.0026	0.000025	0	0.000775	0.005325	0.00475	0.00745
10	0.01135	0.00715	0.00245	0.0042	0	0	0.00135	0.009325	0.009025	0.013425
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5	-0.002525	-0.000875	0	-0.000425	0	0	-0.00005	-0.002075	-0.002225	-0.003175
-10	-0.000425	-0.000725	-0.000325	-0.000575	-0.000175	-0.000475	-0.000575	-0.000775	-0.000575	-0.000675

H.- Columna de agua en cm

A partir de esta información (carga de columna de agua en cm y la conductividad hidráulica en cm/h), excepto de las cápsulas 2 y 28 por contar con poca información, se obtuvo la siguiente gráfica.

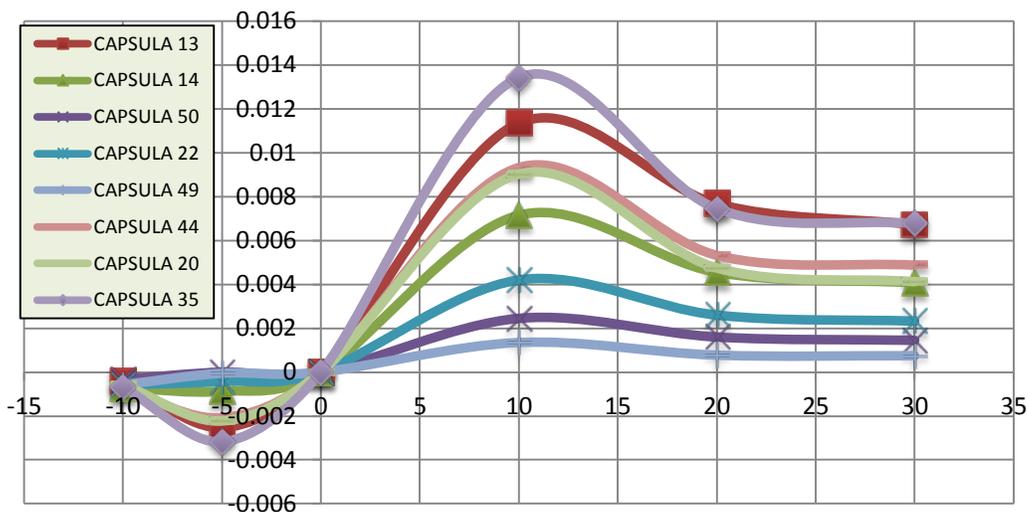


Figura 16. Relación entre la conductividad hidráulica [cm/h] (y) y la carga de columna de agua [cm] (x).

Donde se observa que las cápsulas presentan diferentes características de conductividad hidráulica (K_s) a diferentes cargas y entre ellas hay de igual manera no homogeneidad en su K_s , lo que implica una diferencia en los poros. Sin embargo se observa que entre 10 y 15 cm de columna de agua se presenta la mayor conductividad hidráulica. Para cargas negativas los valores más pequeños de K_s están alrededor de -5 cm y es inversamente con respecto a la carga positiva en términos absolutos. Sin embargo solo fueron dos cargas negativas de columna de agua, y además el sistema de medición, no se diseñó para tal fin por lo que se requiere de una revisión para cargas negativas (a succión).

Diseño de riego a partir de las características de las capsulas.

Para probar la hipótesis que se planteó, es decir que se pueden diseñar sistemas de riego con cápsulas, si se conocían las características hidráulicas de cada una.

Las mediciones hechas en un mismo sustrato (tezontle) con dos granulometrías diferentes, con el fin de diseñar un sistema de riego, se procedió de la siguiente manera. Se asumió una demanda máxima (6 mm/día), y dada una superficie se determina el volumen máximo, así se integró dos grupos de capsulas de 4 y de 5, donde en cada grupo la suma de su conductividad hidráulica (K_s) se ajusta a la misma demanda, la H que se uso fue a 10 cm.

Así se probaron cada grupo en dos tinas una para cada grupo (con 4 y 5 cápsulas respectivamente) y con un sustrato (tezontle) con dos tamaños de partículas. El sustrato fino corresponde a aquellas partículas menores o iguales a la malla 8, para el sustrato mediano se integró por aquellas partículas que están entre la malla 6 y 8 (el número corresponde al número de hilos por pulgada).

Para la evaluación con fines de riego con un área de exposición cada tina de 2507.18 cm^2 y un área del tanque de almacenamiento de 347.76 cm^2

En un experimento inicial se tenía la fuente de agua y el control del nivel con un flotador, sin embargo no se detectaban cambios de nivel principalmente por un consumo muy bajo (por días nublados) y por atorarse el sistema de flotadores. Por lo que se decidió cambiar la forma de suministra el agua, que fue en forma directa, sin mantener un nivel constante y ahora vario de los $10 \pm 2.5 \text{ cm}$ (entre 7.5 y 12.5 cm con respecto a la altura media de la cápsula), y a succión.

El las dos tinas primero se instalaron el grupo de cápsulas (5 o 4) por tina, con el sustrato fino y al concluir se realizó con el sustrato más grueso.

Los resultados se indican en el cuadro 3.

Cuadro 3. Consumo de agua por evaporación del sustratos, bajo un sistema de subirrigación con capsulas porosas.

Sustrato	Tina con cuatro capsulas					Tina con cinco capsulas				
	Hora	Fecha	Lectura del nivel	Diferencia	Volumen	Lámina evaporada	Lectura del nivel	Diferencia	Volumen	Lámina evaporada
		Julio	[cm]	[cm]	[cm ³]	[mm]	[cm]	[cm]	[cm ³]	[mm]
Fino	11:30	2	27.5	2.2	765.07	3.05	6.5	1.9	660.74	2.64
	07:00	3	29.7				8.4			
	08:30	3	29.7	2	695.52	2.77	8.4	1.9	660.74	2.64
	08:30	4	31.7	0.8	278.21	1.11	10.3	0.8	278.21	1.11
	08:00	5	32.5	1.5	521.64	2.08	11.1	1.4	486.86	1.94
	08:00	6	34				12.5			
	10:00	6	27.5	1.9	660.74	2.64	6.5	1.9	660.74	2.64
	08:00	7	29.4				8.4			
		8								
		08:30	9	31.5	0.8	278.21	1.11	10.1	0.7	243.43
	08:30	10	32.3	1.5	521.64	2.08	10.8	1.2	417.31	1.66
Mediano	08:30	12	29.6	1.4	486.86	1.94	10.7	1	347.76	1.39
	09:00	13	31	0.8	278.21	1.11	11.7	1	347.76	1.39
	07:30	14	31.8	1.9	660.74	2.64	12.7	1.8	625.97	2.50
		15								
	08:30	16	33.7				14.5			
	10:00	16	27.4	1.4	486.86	1.94	6.5	1.6	556.42	2.22
	08:30	17	28.8	0.9	312.98	1.25	8.1	1.1	382.54	1.53
	08:30	18	29.7	0.7	243.43	0.97	9.2	1.1	382.54	1.53
	08:00	19	30.4	0.8	278.21	1.11	10.3	0.8	278.21	1.11
	08:30	20	31.2	0.5	173.88	0.69	11.1	0.6	208.66	0.83
	08:00	21	31.7	0.5	173.88	0.69	11.7	0.8	278.21	1.11

Se compararon los consumos en términos de lámina evaporada a partir de las dos tinas,

En el sustrato fino se observa un alta relación entre las evaporaciones (con un coeficiente de determinación de $r^2= 0.95129$) y un modelo lineal $y = 0.9123x + 0.0075$, donde x representa la

lámina evaporada en la tina con 4 capsulas y en el eje y la lámina evaporada en la tina con 5 capsulas (ver figura 17).

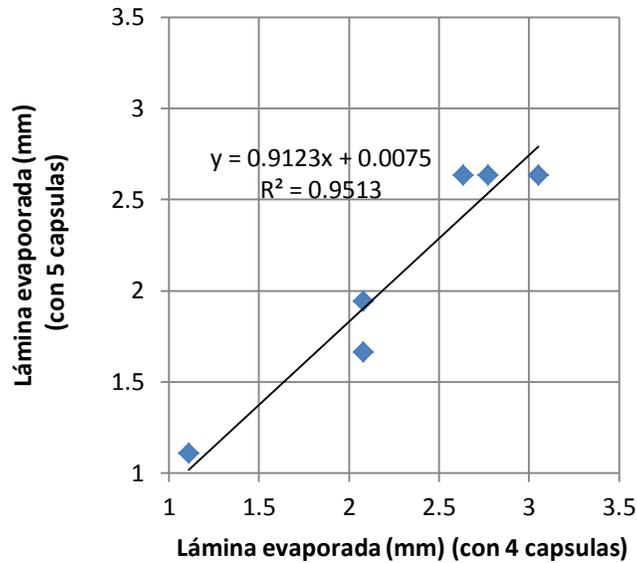


Figura 17. Relación entre las láminas evaporadas en las tinas con 4 y 5 capsulas respectivamente en un sustrato fino, con riego por subirrigación.

En el sustrato mediano también se observa una menor relación entre los consumos de evaporación (con un coeficiente de determinación de $r^2 = 0.85508$) y un modelo lineal $y = 0.7864x + 0.3575$, donde x representa la lámina evaporada en la tina con 4 capsulas, y en el eje y la lámina evaporada en la tina con 5 capsulas (ver figura 18).

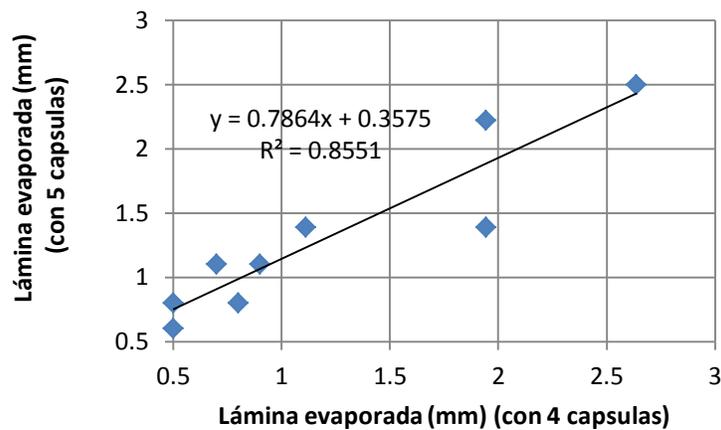


Figura 18. Relación entre las láminas evaporadas en las tinas con 4 y 5 capsulas respectivamente en un sustrato mediano, con riego por subirrigación.

Finalmente se integraron todos los datos de evaporación de ambos sustratos y se observó una alta relación entre los consumos de evaporación (con un coeficiente de determinación de $r^2=0.91005$) y un modelo lineal $y = 0.8006x + 0.2982$, donde x representa la lámina evaporada en la tina con 4 capsulas, y en el eje y la lámina evaporada en la tina con 5 capsulas (ver figura 19).

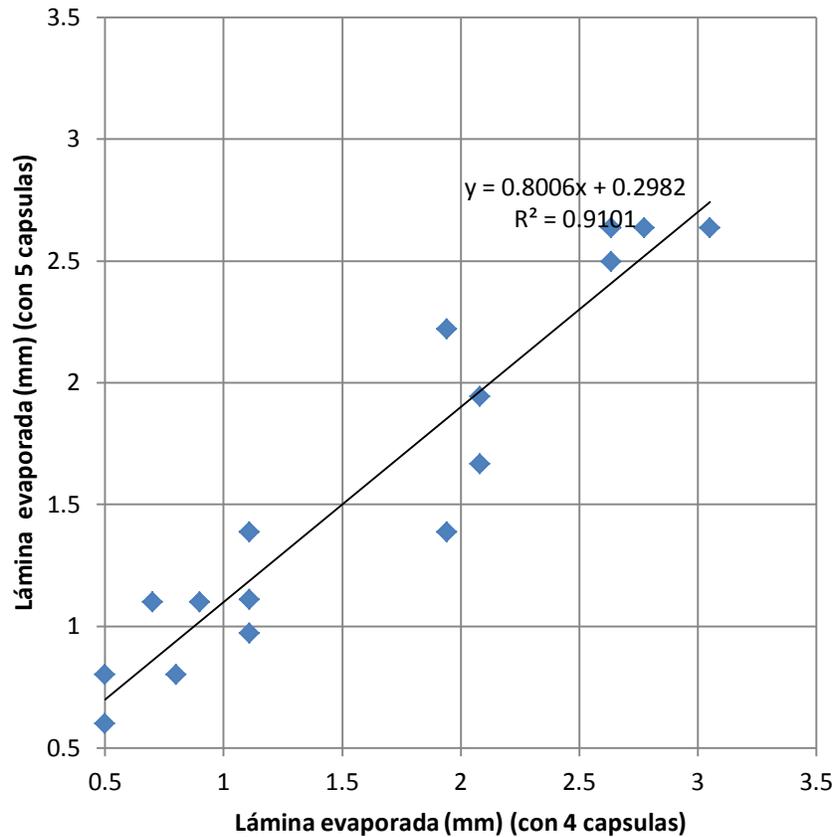


Figura 19. Relación entre las láminas evaporadas en las tinas con 4 y 5 capsulas respectivamente en un sustrato mediano, con riego por subirrigación.

6. CONCLUSIONES

Con base en las hipótesis que se plantearon se concluye lo siguiente.

De la hipótesis general se rechaza, dado que las capsulas porosas no son iguales en términos de su conductividad hidráulica, gasto, cuando se sometieron a diferentes cargas de columna de agua.

Dentro de las hipótesis particulares la primera también se rechaza, dada que en términos de carga (a presión y succión) no se comportan igual, dado que presentan diferentes conductividades hidráulicas y gasto.

Las interconexiones propuestas a partir de conectores para riego comerciales cumplieron su misión, dado que no se presentaron pérdidas de agua, por lo tanto permitió la continuidad del agua en el sistema por subirrigación. Con la observación que se requirió mucho cuidado en su adaptación a las capsulas ya diseñadas hace tiempo, por lo que se acepta esta hipótesis.

En la tercera hipótesis particular se acepta, dado que al conocer la conductividad hidráulica (K_s) de cada capsula, permitió un diseño correcto de un sistema de riego por subirrigación.

De la última hipótesis sobre el funcionamiento de un sistema de riego por subirrigación en diferentes tamaños de partículas (al menos dos, una con tamaños de partículas iguales o menores a la malla 8, y la segunda con partículas con tamaños entre la malla 8 y la 6), no se encontró un comportamiento diferente en el funcionamiento del sistema de riego, por lo que se acepta.

7.RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con la investigación de este sistema de riego por succión con capsulas porosas ya que son muy prometedoras, se tienen resultados extraordinarios.
- Mejorar el diseño de las capsulas porosas, p.e. un diseño más manejable y práctico y que tenga un área de mojado óptimo.
- Ser homogéneo en la construcción de estas capsulas porosas.
- Probar las capsulas porosas a succión con un cultivo en particular.
- Hacer este sistema de riego a un nivel industrial.

8.LITERATURA CONSULTADA

Abad, M. y P. Noguera. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. in: Manual de cultivo sin suelo. M. Urrestarazu (ed). 2ª ed. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 137-185.

Aidárov I. P., Golovárov A. I. y Mamáev M.G. 1985. El riego. Ed. Mir-Moscu. 367 p.

Albanil Encarnación, A. 1991. Determinación de la evapotranspiración y eficiencia en el uso del agua y fertilización en el cultivo de fresa mediante riego por succión. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados; Montecillos, México.

Aguilera, C.M y Martínez, E. R. 1996. Relaciones Agua – Planta – Atmósfera. Cuarta Edición. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Apuntes de Meteorología Agrícola. 2005. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Beven, K. and P. Germann. 1981. Water flow in soil macropores II. A combined flow model. J. Soil Sci. 32: 15-29.

Burés, S. 1998. Introducción a los sustratos. Aspectos generales. In: Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal. J. Narciso Pastor S. (ed). Universitat de Lleida. pp: 19-31

Christiansen, J. E. 1942. Irrigation by Sprinkling. University of California, College of Agriculture, Agric. Exper. Station Bull. 670. 124 p.

Coras Merino, P. M. 1979. Efecto de riego por succión con tres formas de cápsulas porosas sobre rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa L.*). Tesis de maestría. Chapingo, México.

Del Valle Florencia, H. 1977. Experimento preliminary en invernadero con riego por succión para el diseño de cápsulas porosas. Nueva Epoca, Chapingo, México, (7-8): 39-53, Sep-Dic.

Driessen, M. P. and Konijín, T. N. 1992. Land-use systems analysis. Wageningen Agricultural University, Department of Soil Science and Geology. Netherlands.

Flamand Rodríguez, C. L. 1981. Introducción a la mecánica de suelos. Universidad Autónoma Chapingo; Chapingo, Edo de México, México.

Fuentes, R. C. 1985. El potencial de presión y la conductividad hidráulica: análisis y predicción. Tesis profesional. Universidad Atunóma Chapingo. Chapingo, México.

_____ 1988. Teoría de la infiltración unidimensional: 1. La absorción. Agrociencia No. 73. 263-279. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México.

_____ 1989. Teoría de la infiltración unidimensional: 2. La infiltración vertical. Agrociencia 78: 119-153.

_____ R. Haverkamp and J.Y. Parlante. 1992. Parameter constraints on closed-form soil water relationships. J. Hydrol. 134: 117-142.

García Real, C.A. 1977. Efecto del riego por succión sobre la potencialidad de rendimiento de la fresa y eficiencia en el uso del agua. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Gómez, C. L. A. 2006. Índices hídricos agroclimáticos, sus variaciones en la región Fronteriza del estado de Chiapas. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Granados, A. J. 1988. Metodología para la elaboración de estudios agroclimáticos. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Gil R. 2002. Algunos criterios para la cuantificación y diagnóstico del comportamiento estructural del suelo y su relación con la dinámica del agua y la producción de cultivos. En línea <http://www.elsitioagricola.com/articulos/gil/>.

Germann, P. and K. Beven. 1981 1a. Water flow in soil macropores I. An experimental approach. J. Soil Sci.

_____ and K. Beven. 1981 1b. Water flow in soil macropores II. A statistical approach. J. Soil Sci.

Groves, R. J. 1989. A practical soil moisture profile model. Water Resources Bulletin, 25 (4): 875-880.

Herman, J. F. 1982. Handbook of irrigation technology. CRC Press, Inc. Boca Ratón, Florida, United States. Vol. 1.

- Hillel, D. 1980. Fundamentals of soils physics. Academic Press, Inc. New York.
- Inoue, M. 1985. Soil wáter regime in sand dune field without crop. J. Fac. Agric. Totori Univ. 20: 34-30.
- Juárez Badillo, E. y A. Rico Rodríguez. 1986. Mecánica de suelos. Ed. Limusa; D.F., México. Tomo I.
- Karmeli, D. and Keller J. 1975. Trickle irrigation design. Ed. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. California, USA.
- Livingston, B. E. 1918. Porous clay cones for the auto-irrigation of potted plants. Plant World. 21: 202-208.
- Martínez Elizondo, R. 1991. Riego localizado. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Edo. de México, México.
- Morales Velasquez, D.F.1978. Uso de aguas saladas para riego de cultivos por succión. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Muñoz, G. G. 2002. Zonificación agroclimática del Valle de Toluca. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- Narro Farías, E.1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Ed. Trillas. México, D.F. Primera edición.
- Nielsen, D.R., R.D. Jackson, J.W. Cary and D.D. Evans (Eds). 1972. Soil Water. American Society of Agronomy Soil Science of American, Madison, Wisconsin. pp. 175.
- Olguín Palacios, C. 1975. Riego por succión, Descripción del Método y Avances en la Investigación. Memorias del 1er Seminario Nacional sobre Riego por Goteo, Hermosillo Sonora. Tomo II. Pp. 1165-181.
- Penman, H.L. 1956. Evaporation: An introductory survey. Netherlands J. Agric. Sci. 1:9-29, 87-97,151-153.

Perea Estrada, H. 1993. Metodología de diseño y construcción de un sistema de riego a baja presión con cápsulas porosas. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados; Montecillos, México.

Quevedo Nolasco, A. 2005. Evaluación del concepto sección de control de humedad en suelos aluviales. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados; Montecillos, Texcoco, Edo. México.

Radcliffe, E. D. and T.C. Rasmussen. 2000. Soil water movement. P. A-87-A-128. In M. E. Summer (ed.). Handbook of soil science. CRC Press, Washington, D.C. United States of America.

Rendón Pimentel, L. 1979. Desarrollo y calibración de un modelo matemático para riego por succión. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados; Chapingo, México.

Richards, L. A., and Blood, H. L. 1934. Some improvements in auto-irrigator apparatus. Jour. Agric. Res. 49: 115-121.

Romo, G. J. y Arteaga, R. R. 1989. Meteorología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.

Simûnek, J., M. Sejna, and M. Th. Van Genuchten. 1998. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. U.S. salinity laboratory. USDA. Riverside, California.

Sotelo Avila. G.1985. Hidraulica General. Vol. I. Editorial Limusa, México, D.F.

Tijerina Chavez, L.1988. Cultivo de frijol irrigado por el método de riego por succión. Volumen 6, número 2, pag. 117-130, Revista Terra.

Tijerina Chavez, L. 2009. Notas del curso de Relación Agua Suelo Planta Atmosfera II. Postgrado Hidrociencias. Colegio de Postgraduados.

Urrestarazu Gavilán, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Tercera edición. México, D.F.

Vargas R., Pável; Peña C., Manuel; Gonzáles A., Jorge; Hernández C., Geisy. Obtención de cápsulas porosas para el beneficio de cultivos protegidos. Revista Ciencias Técnicas

Agropecuarias, vol. 17, núm. 3, 2008, pp. 14-17. Universidad Agraria de La Habana Fructuoso Rodríguez Pérez. La Habana, Cuba.

Van Genuchten, M. Th. 1994. New issues and challenges in soil physics research. Volume 1, Inaugural and state of the art conferences. 15th World Congress of Soil Science. Acapulco, México.

Vermeiren, L. y Jobling, G. A. 1986. Riego localizado. FAO. Roma, Italia. Serie Riego y Drenaje N° 36, 203 p.

ANEXOS

Cuadro 4. Volumen emitido de las capsulas con carga 50 cm.

NO. DE CAPSULA	TIEMPO DE EVALUACIÓN (h)				VOLUMEN RECOLECTADO (cm ³)			
	Repetición				Repetición			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1.00	16.16	1.00	1.00	59.50	982.90	81.30	88.80
2	1.00	16.16	1.00	1.00	32.20	467.90	42.50	36.70
3	1.00	16.16	1.00	1.00	6.30	120.70	9.40	8.90
4	1.00	16.16	1.00	1.00	0.00	41.20	1.70	2.40
5	1.00	16.16	1.00	1.00	50.30	441.50	27.10	21.20
6	1.00	16.16	1.00	1.00	98.30	1494.10	185.10	138.20
7	1.00	16.16	1.00	1.00	48.30	729.60	71.50	64.50
8	1.00	16.16	1.00	1.00	21.30	341.10	34.40	29.30
9	1.00	16.16	1.00	1.00	41.30	612.10	68.10	54.60
10	1.00	16.16	1.00	1.00	38.30	546.90	53.70	49.40
11	1.00	1.00	1.00	1.00	7.10	7.30	8.30	10.10
12	1.00	1.00	1.00	1.00	52.90	46.00	45.70	54.00
13	1.00	1.00	1.00	1.00	233.30	203.20	205.50	244.50
14	1.00	1.00	1.00	1.00	119.80	109.70	111.90	136.90
15	1.00	1.00	1.00	1.00	214.80	210.20	193.60	231.40
16	1.00	1.00	1.00	1.00	30.20	27.40	27.50	35.00
17	1.00	1.00	1.00	1.00	19.30	16.80	18.00	22.10
18	1.00	1.00	1.00	1.00	12.40	12.90	13.90	17.40
19	1.00	1.00	1.00	1.00	40.10	38.30	38.20	46.10
20	1.00	1.00	1.00	1.00	129.00	114.50	126.30	124.20
21	1.00	2.50	1.00	0.83	24.90	57.80	28.20	13.00
22	1.00	2.50	1.00	0.83	109.90	265.10	113.70	72.30
23	1.00	2.50	1.00	0.83	69.90	168.10	72.40	46.50
24	1.00	2.50	1.00	0.83	71.90	159.20	70.70	44.70
25	1.00	2.50	1.00	0.83	11.20	28.00	13.70	9.40
26	1.00	2.50	1.00	0.83	193.40	458.50	204.20	117.30
27	1.00	2.50	1.00	0.83	38.00	90.10	41.30	26.40
28	1.00	2.50	1.00	0.83	7.90	18.90	8.90	7.30
29	1.00	2.50	1.00	0.83	48.70	117.00	52.60	34.50
30	1.00	2.50	1.00	0.83	62.30	155.70	69.00	46.50
31	0.50	0.58	0.50	0.50	29.5	35.1	30.9	26.4
32	0.50	0.58	0.50	0.50	67	77.6	69.2	59.4
33	0.50	0.58	0.50	0.50	50.9	57.1	52.2	44.3
34	0.50	0.58	0.50	0.50	29	33.2	30.4	25.4
35	0.50	0.58	0.50	0.50	106	120.8	107.8	94.9
36	0.50	0.58	0.50	0.50	34	37	34.1	29.5
37	0.50	0.58	0.50	0.50	26.6	28.9	26	22.7
38	0.50	0.58	0.50	0.50	27.2	28.6	25.5	21.7
39	0.50	0.58	0.50	0.50	0	0	0	0
40	0.50	0.58	0.50	0.50	47.7	51.1	46	35.6

NO. DE CAPSULA	TIEMPO DE EVALUACIÓN (h)				VOLUMEN RECOLECTADO (cm ³)			
	Repetición				Repetición			
	A	B	C	D	A	B	C	D
41	0.50	0.50	0.50	0.50	15.2	14.8	16.2	15.1
42	0.50	0.50	0.50	0.50	24	23.9	26	24.4
43	0.50	0.50	0.50	0.50	25	25.4	26.9	25.9
44	0.50	0.50	0.50	0.50	79	77.8	83	80.5
45	0.50	0.50	0.50	0.50	28.9	28.9	30.8	29.8
46	0.50	0.50	0.50	0.50	33.5	33.2	35.5	33.9
47	0.50	0.50	0.50	0.50	29.6	29.2	31.5	31
48	0.50	0.50	0.50	0.50	9.3	9.7	10.3	9.9
49	0.50	0.50	0.50	0.50	35.8	36.6	37.5	37.9
50	0.50	0.50	0.50	0.50	73.2	76.2	80	80.1

Cuadro 5. Volumen emitido de las capsulas con carga 40 cm de columna de agua.

NO. DE CAPSULA	TIEMPO DE EVALUACIÓN (h)				VOLUMEN RECOLECTADO (cm ³)			
	Repetición				Repetición			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1.00	1.00	1.33	1.00	63.70	60.90	76.90	61.80
2	1.00	1.00	1.33	1.00	27.50	27.80	34.00	27.20
3	1.00	1.00	1.33	1.00	4.30	4.60	6.10	4.00
4	1.00	1.00	1.33	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1.00	1.00	1.33	1.00	13.60	12.40	16.70	13.10
6	1.00	1.00	1.33	1.00	96.20	99.30	123.20	100.80
7	1.00	1.00	1.33	1.00	44.50	45.10	56.10	46.10
8	1.00	1.00	1.33	1.00	20.50	21.20	25.40	21.30
9	1.00	1.00	1.33	1.00	34.90	35.10	44.60	38.00
10	1.00	1.00	1.33	1.00	31.00	32.20	40.40	32.10
11	18.25	1.16	1.00	1.33	175.80	15.90	17.40	14.50
12	18.25	1.16	1.00	1.33	1149.30	110.40	97.00	70.60
13	18.25	1.16	1.00	1.33	3992.30	501.00	433.70	321.40
14	18.25	1.16	1.00	1.33	1892.30	268.40	226.00	175.00
15	18.25	1.16	1.00	1.33	3492.40	527.30	419.80	314.10
16	18.25	1.16	1.00	1.33	608.70	97.70	69.60	54.30
17	18.25	1.16	1.00	1.33	480.20	69.50	48.90	37.70
18	18.25	1.16	1.00	1.33	525.20	64.40	45.30	33.00
19	18.25	1.16	1.00	1.33	671.00	114.10	82.20	27.70
20	18.25	1.16	1.00	1.33	1390.40	258.30	192.90	151.90
21	1.00	1.00	1.00	1.50	25.70	23.30	25.20	36.50
22	1.00	1.00	1.00	1.50	103.80	94.10	101.70	150.50
23	1.00	1.00	1.00	1.50	65.50	58.80	62.70	93.30
24	1.00	1.00	1.00	1.50	67.00	60.90	64.80	96.80
25	1.00	1.00	1.00	1.50	12.20	11.70	12.80	18.60
26	1.00	1.00	1.00	1.50	192.00	170.70	182.60	270.00

NO. DE CAPSULA	TIEMPO DE EVALUACIÓN (h)				VOLUMEN RECOLECTADO (cm ³)			
	Repetición				Repetición			
	A	B	C	D	A	B	C	D
27	1.00	1.00	1.00	1.50	35.60	31.80	33.70	49.30
28	1.00	1.00	1.00	1.50	5.90	6.90	8.70	12.30
29	1.00	1.00	1.00	1.50	48.30	43.10	46.30	68.60
30	1.00	1.00	1.00	1.50	60.60	52.70	56.80	83.60
31	1.00	1.00	1.33	0.91	50	42	-	49.6
32	1.00	1.00	1.33	0.91	90.3	96	131.3	93.9
33	1.00	1.00	1.33	0.91	-	70.4	101.4	73.5
34	1.00	1.00	1.33	0.91	41.8	42.2	60	46.2
35	1.00	1.00	1.33	0.91	142.8	154.1	223.8	162
36	1.00	1.00	1.33	0.91	47.4	48.8	71.5	49.7
37	1.00	1.00	1.33	0.91	-	-	60.4	43.8
38	1.00	1.00	1.33	0.91	46.6	47.7	63.4	44.6
39	1.00	1.00	1.33	0.91	0	0	0.9	1.4
40	1.00	1.00	1.33	0.91	77.1	78	106.7	74.1
41	0.50	0.50	0.50	0.50	11.9	11.6	12.7	12.4
42	0.50	0.50	0.50	0.50	19.4	18.5	20.7	20.2
43	0.50	0.50	0.50	0.50	19.9	19.3	20.9	20.7
44	0.50	0.50	0.50	0.50	63.9	61.8	67.5	66.5
45	0.50	0.50	0.50	0.50	23.9	22.6	24.4	24.4
46	0.50	0.50	0.50	0.50	26.8	24.2	27.7	27.1
47	0.50	0.50	0.50	0.50	24.9	22.7	25.1	24.6
48	0.50	0.50	0.50	0.50	7.1	6.8	7.7	7.5
49	0.50	0.50	0.50	0.50	30.5	27.9	31.1	29.4
50	0.50	0.50	0.50	0.50	65.1	57.4	65.3	62.4

Cuadro 6. Conductividad hidráulica y gasto de las capsulas a una carga de 50 cm.

CAPSULA	ESPESOR (cm)	GASTO(cm ³ /h)				CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/h)			
		Repetición				Repetición			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.63	59.50	60.82	81.30	88.80	0.0019	0.0020	0.0027	0.0029
2	0.70	32.20	28.95	42.50	36.70	0.0012	0.0011	0.0015	0.0013
3	0.60	6.30	7.47	9.40	8.90	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003
4	0.70	0.00	2.55	1.70	2.40	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001
5	0.66	50.30	27.32	27.10	21.20	0.0017	0.0009	0.0009	0.0007
6	0.60	98.30	92.46	185.10	138.20	0.0031	0.0029	0.0058	0.0043
7	0.70	48.30	45.15	71.50	64.50	0.0018	0.0016	0.0026	0.0023
8	0.60	21.30	21.11	34.40	29.30	0.0007	0.0007	0.0011	0.0009
9	0.63	41.30	37.88	68.10	54.60	0.0014	0.0012	0.0022	0.0018

CAPSULA	ESPEJOR (cm)	GASTO(cm ³ /h)				CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/h)			
		Repetición				Repetición			
10	0.63	38.30	33.84	53.70	49.40	0.0013	0.0011	0.0018	0.0016
11	0.70	7.10	7.30	8.30	10.10	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004
12	0.55	52.90	46.00	45.70	54.00	0.0015	0.0013	0.0013	0.0015
13	0.50	233.30	203.20	205.50	244.50	0.0061	0.0053	0.0053	0.0064
14	0.62	119.80	109.70	111.90	136.90	0.0039	0.0035	0.0036	0.0044
15	0.60	214.80	210.20	193.60	231.40	0.0067	0.0066	0.0060	0.0072
16	0.60	30.20	27.40	27.50	35.00	0.0009	0.0009	0.0009	0.0011
17	0.70	19.30	16.80	18.00	22.10	0.0007	0.0006	0.0007	0.0008
18	0.55	12.40	12.90	13.90	17.40	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005
19	0.70	40.10	38.30	38.20	46.10	0.0015	0.0014	0.0014	0.0017
20	0.60	129.00	114.50	126.30	124.20	0.0040	0.0036	0.0039	0.0039
21	0.60	24.90	23.12	28.20	15.66	0.0008	0.0007	0.0009	0.0005
22	0.70	109.90	106.04	113.70	87.11	0.0040	0.0039	0.0041	0.0032
23	0.65	69.90	67.24	72.40	56.02	0.0024	0.0023	0.0024	0.0019
24	0.63	71.90	63.68	70.70	53.86	0.0024	0.0021	0.0023	0.0018
25	0.66	11.20	11.20	13.70	11.33	0.0004	0.0004	0.0005	0.0004
26	0.52	193.40	183.40	204.20	141.33	0.0052	0.0050	0.0055	0.0038
27	0.50	38.00	36.04	41.30	31.81	0.0010	0.0009	0.0011	0.0008
28	0.60	7.90	7.56	8.90	8.80	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003
29	0.60	48.70	46.80	52.60	41.57	0.0015	0.0015	0.0016	0.0013
30	0.55	62.30	62.28	69.00	56.02	0.0018	0.0018	0.0020	0.0016
31	0.60	59.00	60.52	61.80	52.80	0.0018	0.0019	0.0019	0.0016
32	0.50	134.00	133.79	138.40	118.80	0.0035	0.0035	0.0036	0.0031
33	0.60	101.80	98.45	104.40	88.60	0.0032	0.0031	0.0033	0.0028
34	0.50	58.00	57.24	60.80	50.80	0.0015	0.0015	0.0016	0.0013
35	0.60	212.00	208.28	215.60	189.80	0.0066	0.0065	0.0067	0.0059
36	0.60	68.00	63.79	68.20	59.00	0.0021	0.0020	0.0021	0.0018
37	0.60	53.20	49.83	52.00	45.40	0.0017	0.0016	0.0016	0.0014
38	0.55	54.40	49.31	51.00	43.40	0.0016	0.0014	0.0015	0.0012
39	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	0.53	95.40	88.10	92.00	71.20	0.0026	0.0024	0.0025	0.0020
41	0.60	30.40	29.60	32.40	30.20	0.0009	0.0009	0.0010	0.0009
42	0.75	48.00	47.80	52.00	48.80	0.0019	0.0019	0.0020	0.0019
43	0.60	50.00	50.80	53.80	51.80	0.0016	0.0016	0.0017	0.0016
44	0.60	158.00	155.60	166.00	161.00	0.0049	0.0049	0.0052	0.0050
45	0.60	57.80	57.80	61.60	59.60	0.0018	0.0018	0.0019	0.0019
46	0.69	67.00	66.40	71.00	67.80	0.0024	0.0024	0.0025	0.0024
47	0.50	59.20	58.40	63.00	62.00	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016
48	0.54	18.60	19.40	20.60	19.80	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006
49	0.65	71.60	73.20	75.00	75.80	0.0024	0.0025	0.0025	0.0026
50	0.57	146.40	152.40	160.00	160.20	0.0043	0.0045	0.0047	0.0047

Cuadro 7. Conductividad hidráulica y gasto de las capsulas a una carga de 40 cm.

CAPSULA	ESPESOR (cm)	GASTO(cm ³ /h)				CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/h)			
		Repetición				Repetición			
		1	2	3	4	1	2	3	4
1	0.63	63.70	60.90	57.82	61.80	0.0026	0.0025	0.0024	0.0025
2	0.70	27.50	27.80	25.56	27.20	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012
3	0.60	4.30	4.60	4.59	4.00	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
4	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.66	13.60	12.40	12.56	13.10	0.0006	0.0005	0.0005	0.0006
6	0.60	96.20	99.30	92.63	100.80	0.0038	0.0039	0.0036	0.0039
7	0.70	44.50	45.10	42.18	46.10	0.0020	0.0021	0.0019	0.0021
8	0.60	20.50	21.20	19.10	21.30	0.0008	0.0008	0.0007	0.0008
9	0.63	34.90	35.10	33.53	38.00	0.0014	0.0014	0.0014	0.0016
10	0.63	31.00	32.20	30.38	32.10	0.0013	0.0013	0.0012	0.0013
11	0.70	9.63	13.71	17.40	10.90	0.0004	0.0006	0.0008	0.0005
12	0.55	62.98	95.17	97.00	53.08	0.0023	0.0034	0.0035	0.0019
13	0.50	218.76	431.90	433.70	241.65	0.0071	0.0140	0.0141	0.0079
14	0.62	103.69	231.38	226.00	131.58	0.0042	0.0093	0.0091	0.0053
15	0.60	191.36	454.57	419.80	236.17	0.0075	0.0177	0.0164	0.0092
16	0.60	33.35	84.22	69.60	40.83	0.0013	0.0033	0.0027	0.0016
17	0.70	26.31	59.91	48.90	28.35	0.0012	0.0027	0.0022	0.0013
18	0.55	28.78	55.52	45.30	24.81	0.0010	0.0020	0.0016	0.0009
19	0.70	36.77	98.36	82.20	20.83	0.0017	0.0045	0.0037	0.0009
20	0.60	76.19	222.67	192.90	114.21	0.0030	0.0087	0.0075	0.0045
21	0.60	25.70	23.30	25.20	24.33	0.0010	0.0009	0.0010	0.0009
22	0.70	103.80	94.10	101.70	100.33	0.0047	0.0043	0.0046	0.0046
23	0.65	65.50	58.80	62.70	62.20	0.0028	0.0025	0.0026	0.0026
24	0.63	67.00	60.90	64.80	64.53	0.0027	0.0025	0.0027	0.0026
25	0.66	12.20	11.70	12.80	12.40	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
26	0.52	192.00	170.70	182.60	180.00	0.0065	0.0058	0.0062	0.0061
27	0.50	35.60	31.80	33.70	32.87	0.0012	0.0010	0.0011	0.0011
28	0.60	5.90	6.90	8.70	8.20	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003
29	0.60	48.30	43.10	46.30	45.73	0.0019	0.0017	0.0018	0.0018
30	0.55	60.60	52.70	56.80	55.73	0.0022	0.0019	0.0020	0.0020
31	0.60	50.00	42.00	-	54.51	0.0020	0.0016	-	0.0021
32	0.50	90.30	96.00	98.72	103.19	0.0029	0.0031	0.0032	0.0034
33	0.60	-	70.40	76.24	80.77	-	0.0027	0.0030	0.0032
34	0.50	41.80	42.20	45.11	50.77	0.0014	0.0014	0.0015	0.0017
35	0.60	142.80	154.10	168.27	178.02	0.0056	0.0060	0.0066	0.0069
36	0.60	47.40	48.80	53.76	54.62	0.0018	0.0019	0.0021	0.0021
37	0.60	-	-	45.41	48.13	-	-	0.0018	0.0019
38	0.55	46.60	47.70	47.67	49.01	0.0017	0.0017	0.0017	0.0018
39	0.60	0.00	0.00	0.68	1.54	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
40	0.53	77.10	78.00	80.23	81.43	0.0027	0.0027	0.0028	0.0028
41	0.60	23.80	23.20	25.40	24.80	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010

CAPSULA	ESPESOR (cm)	GASTO(cm ³ /h)				CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (cm/h)			
		Repetición				Repetición			
		1	2	3	4	1	2	3	4
42	0.75	38.80	37.00	41.40	40.40	0.0019	0.0018	0.0020	0.0020
43	0.60	39.80	38.60	41.80	41.40	0.0016	0.0015	0.0016	0.0016
44	0.60	127.80	123.60	135.00	133.00	0.0050	0.0048	0.0053	0.0052
45	0.60	47.80	45.20	48.80	48.80	0.0019	0.0018	0.0019	0.0019
46	0.69	53.60	48.40	55.40	54.20	0.0024	0.0022	0.0025	0.0024
47	0.50	49.80	45.40	50.20	49.20	0.0016	0.0015	0.0016	0.0016
48	0.54	14.20	13.60	15.40	15.00	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
49	0.65	61.00	55.80	62.20	58.80	0.0026	0.0024	0.0026	0.0025
50	0.57	130.20	114.80	130.60	124.80	0.0048	0.0043	0.0048	0.0046

Cuadro 8. Conductividad hidráulica y evaporación de 30 capsulas a una carga de 50 cm.

CARGA (H) 50 cm								
CAPSULA	EVAPORACION (cm/h)				CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/h)			
	Repetición				Repetición			
	1	2	3	4	1	2	3	4
11	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0004	0.0006	0.0008	0.0005
12	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0023	0.0034	0.0035	0.0019
13	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0071	0.0140	0.0141	0.0079
14	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0042	0.0093	0.0091	0.0053
15	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0075	0.0177	0.0164	0.0092
16	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0013	0.0033	0.0027	0.0016
17	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0012	0.0027	0.0022	0.0013
18	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0010	0.0020	0.0016	0.0009
19	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0017	0.0045	0.0037	0.0009
20	0.1333	0.1198	0.0942	0.0640	0.0030	0.0087	0.0075	0.0045
31	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0018	0.0019	0.0019	0.0016
32	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0035	0.0035	0.0036	0.0031
33	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0032	0.0031	0.0033	0.0028
34	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0015	0.0015	0.0016	0.0013
35	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0066	0.0065	0.0067	0.0059
36	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0021	0.0020	0.0021	0.0018
37	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0017	0.0016	0.0016	0.0014
38	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0016	0.0014	0.0015	0.0012
39	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40	0.0282	0.0250	0.0235	0.0169	0.0026	0.0024	0.0025	0.0020
41	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0009	0.0009	0.0010	0.0009
42	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0019	0.0019	0.0020	0.0019
43	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0016	0.0016	0.0017	0.0016
44	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0049	0.0049	0.0052	0.0050
45	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0018	0.0018	0.0019	0.0019
46	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0024	0.0024	0.0025	0.0024

CARGA (H) 50 cm								
CAPSULA	EVAPORACION (cm/h)				CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/h)			
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
47	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016
48	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006
49	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0024	0.0025	0.0025	0.0026
50	0.0677	0.0633	0.0584	0.0522	0.0043	0.0045	0.0047	0.0047

Cuadro 9. Conductividad hidráulica y evaporación de 30 capsulas a una carga de 40 cm.

CARGA (H) 40 cm								
CAPSULA	EVAPORACION (cm/h)				CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/h)			
	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Repetición 4
11	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0004	0.0006	0.0008	0.0005
12	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0023	0.0034	0.0035	0.0019
13	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0071	0.0140	0.0141	0.0079
14	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0042	0.0093	0.0091	0.0053
15	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0075	0.0177	0.0164	0.0092
16	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0013	0.0033	0.0027	0.0016
17	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0012	0.0027	0.0022	0.0013
18	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0010	0.0020	0.0016	0.0009
19	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0017	0.0045	0.0037	0.0009
20	0.5378	0.1171	0.0721	0.0050	0.0030	0.0087	0.0075	0.0045
31	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0020	0.0016	-	0.0021
32	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0029	0.0031	0.0032	0.0034
33	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	-	0.0027	0.0030	0.0032
34	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0014	0.0014	0.0015	0.0017
35	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0056	0.0060	0.0066	0.0069
36	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0018	0.0019	0.0021	0.0021
37	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	-	-	0.0018	0.0019
38	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0017	0.0017	0.0017	0.0018
39	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001
40	0.0950	0.0650	0.0295	0.0005	0.0027	0.0027	0.0028	0.0028
41	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010
42	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0019	0.0018	0.0020	0.0020
43	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0016	0.0015	0.0016	0.0016
44	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0050	0.0048	0.0053	0.0052
45	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0019	0.0018	0.0019	0.0019
46	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0024	0.0022	0.0025	0.0024
47	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0016	0.0015	0.0016	0.0016
48	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
49	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0026	0.0024	0.0026	0.0025
50	0.0276	0.0188	0.0084	0.0018	0.0048	0.0043	0.0048	0.0046

Cuadro 10. Volumen de agua recolectado, gasto y conductividad hidráulica a 30, 20, 10, 0 -5 y -10 cm de columna de agua.

CAPSULA	VOLUMEN DE AGUA [cm ³]*				GASTO [cm ³ /h]				CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA [cm/h]				
	GROSOR [cm]	REPETICIÓN				REPETICIÓN				REPETICIÓN			
H=30 cm													
13	0.5	60.4	79.3	85.1	84.8	120.8	158.6	170.2	169.6	0.0052	0.0069	0.0074	0.0074
14	0.62	30.2	40.3	41.2	40.7	60.4	80.6	82.4	81.4	0.0032	0.0043	0.0044	0.0044
50	0.57	11.6	15.6	16.2	16.2	23.2	31.2	32.4	32.4	0.0011	0.0015	0.0016	0.0016
22	0.7	14.7	20.2	20.5	20.4	29.4	40.4	41	40.8	0.0018	0.0025	0.0025	0.0025
2	0.7	0.2	0.2	0.3	0.5	0.4	0.4	0.6	1	0	0	0	0.0001
28	0.6	0	0.1	0	0.1	0	0.2	0	0.2	0	0	0	0
49	0.65	5.3	6.9	7.4	7.5	10.6	13.8	14.8	15	0.0006	0.0008	0.0008	0.0008
44	0.6	39	48.1	50.3	49.8	78	96.2	100.6	99.6	0.0041	0.005	0.0052	0.0052
20	0.6	32.9	41.1	42.5	42.2	65.8	82.2	85	84.4	0.0034	0.0043	0.0044	0.0044
35	0.6	55.2	67.1	69.7	68.4	110.4	134.2	139.4	136.8	0.0057	0.007	0.0073	0.0071
H=20 cm													
13	0.5	56.4	60	60.4	59.5	112.8	120	120.8	119	0.0073	0.0078	0.0079	0.0077
14	0.62	27.8	28.5	28.8	28.2	55.6	57	57.6	56.4	0.0045	0.0046	0.0046	0.0045
50	0.57	10.7	10.6	11	10.6	21.4	21.2	22	21.2	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
22	0.7	13.5	14.4	15	14.3	27	28.8	30	28.6	0.0025	0.0026	0.0027	0.0026
2	0.7	0	0.3	0	0.1	0	0.6	0	0.2	0	0.0001	0	0
28	0.6	0	0	0	0.2	0	0	0	0.4	0	0	0	0
49	0.65	4.4	4.9	4.8	4.5	8.8	9.8	9.6	9	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008
44	0.6	33	34.9	36.3	33	66	69.8	72.6	66	0.0051	0.0054	0.0057	0.0051
20	0.6	29.2	30.6	32.3	29.7	58.4	61.2	64.6	59.4	0.0046	0.0048	0.005	0.0046
35	0.6	46.9	47.6	50.9	46.3	93.8	95.2	101.8	92.6	0.0073	0.0074	0.0079	0.0072
H= 5 cm													
13	0.5	74.8**	43.7	46.9	38.8	89.76	87.4	93.8	77.6	0.0117	0.0114	0.0122	0.0101
14	0.62	17.4	23.4	26.2	22.1	34.8	46.8	52.4	44.2	0.0056	0.0075	0.0084	0.0071
50	0.57	6.1	8.7	10.1	8	12.2	17.4	20.2	16	0.0018	0.0026	0.003	0.0024
22	0.7	9.5	12.3	13.5	10.6	19	24.6	27	21.2	0.0035	0.0045	0.0049	0.0039
2	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0.65	3.4	4.4	4.8	3.5	6.8	8.8	9.6	7	0.0011	0.0015	0.0016	0.0012
44	0.6	28.6	29.8	32.9	28.3	57.2	59.6	65.8	56.6	0.0089	0.0093	0.0103	0.0088
20	0.6	27.4	29.2	32.3	26.5	54.8	58.4	64.6	53	0.0086	0.0091	0.0101	0.0083
35	0.6	42.7	43.7	43.2	59.5	85.4	87.4	86.4	85	0.0133	0.0136	0.0135	0.0133
H=0 cm													
13	0.5	27.7	21.3	32.7	13.2	55.4	42.6	32.7	26.4	0	0	0!	0
14	0.62	7.7***	14.1	10	9.4	15.4	28.2	20	9.4	0	0	0	0
50	0.57	1.9***	5	2.2	2.8	3.8	10	4.4	2.8	0	0	0	0
22	0.7	4.2***	6.3	2	2.2	8.4	12.6	4	2.2	0	0	0	0
2	0.7	0***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0.6	0***	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0.65	0.7***	1.2	0.7	1.4	1.4	2.4	1.4	1.4	0	0	0	0
44	0.6	10.3***	13.9	11.3	22.8	20.6	27.8	22.6	22.8	0	0	0	0
20	0.6	10.7***	15	12.4	24.3	21.4	30	24.8	24.3	0	0	0	0
35	0.6	21.1***	20.4	16.7	35.9	42.2	40.8	33.4	35.9	0	0	0	0

CAPSULA	VOLUMEN DE AGUA [cm ³] *				GASTO [cm ³ /h]				CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA [cm/h]				
	GROSOR [cm]	REPETICIÓN				REPETICIÓN				REPETICIÓN			
H= - 5.0 cm		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
13	0.5	4.2	4.4	4.2	6.5	8.4	8.8	8.4	13	-0.0022	-0.0023	-0.0022	-0.0034
14	0.62	1.2	1	1.7	1.5	2.4	2	3.4	3	-0.0008	-0.0006	-0.0011	-0.001
50	0.57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0.7	0.6	0.6	0.7	0.5	1.2	1.2	1.4	1	-0.0004	-0.0004	-0.0005	-0.0004
2	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0.65	0	0	0.2	0.1	0	0	0.4	0.2	0	0	-0.0001	-0.0001
44	0.6	3.2	3	3.3	3.7	6.4	6	6.6	7.4	-0.002	-0.0019	-0.0021	-0.0023
20	0.6	3.3	3.4	3.7	3.9	6.6	6.8	7.4	7.8	-0.0021	-0.0021	-0.0023	-0.0024
35	0.6	4.3	4.3	5.4	6.2	8.6	8.6	10.8	12.4	-0.0027	-0.0027	-0.0034	-0.0039
H= -10.0 cm													
13	0.5	1.4	2	1.8	1	2.8	4	3.6	2	-0.0004	-0.0005	-0.0005	-0.0003
14	0.62	0.7	3	3.2	2.2	1.4	6	6.4	4.4	-0.0002	-0.001	-0.001	-0.0007
50	0.57	1.1	1.8	0.5	1.5	2.2	3.6	1	3	-0.0003	-0.0005	-0.0001	-0.0004
22	0.7	1.1	1.7	1.9	1.7	2.2	3.4	3.8	3.4	-0.0004	-0.0006	-0.0007	-0.0006
2	0.7	0.5	0.6	0.2	0.6	1	1.2	0.4	1.2	-0.0002	-0.0002	-0.0001	-0.0002
28	0.6	1.5	2	2.3	0.3	3	4	4.6	0.6	-0.0005	-0.0006	-0.0007	-0.0001
49	0.65	1.6	1.8	2	1.6	3.2	3.6	4	3.2	-0.0005	-0.0006	-0.0007	-0.0005
44	0.6	1.7	2.9	3.6	1.8	3.4	5.8	7.2	3.6	-0.0005	-0.0009	-0.0011	-0.0006
20	0.6	1.2	2.3	2.3	1.5	2.4	4.6	4.6	3	-0.0004	-0.0007	-0.0007	-0.0005
35	0.6	1.6	2.9	3	1.3	3.2	5.8	6	2.6	-0.0005	-0.0009	-0.0009	-0.0004

Nota: * El tiempo de recolecta del volumen de agua fue de 0.5 horas, con las excepciones de,

** en 0.83 horas y *** de 1 hora.