



**UNIVERSIDAD DE ORIENTE  
FACULTAD DE CONSTRUCCIONES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



# PERTINENCIAS DE PRUEBAS DE CAMPO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO EN CÍTRICOS

**Tesis en opción al título de Ingeniero Hidráulico**

**Diplomante: EVA DEL ROSARIO GONZALEZ RAMIREZ**

**Tutor: DR.C. PÁVEL VARGAS RODRÍGUEZ**

**SANTIAGO DE CUBA  
2019**

## PENSAMIENTO

*...el hidráulico ha de ser ante todo, algo así como un psicólogo del agua, conocedor profundo de su naturaleza.*

Enzo Levi

## **RESUMEN**

Un análisis sobre el consumo de agua para todos los usos en Cuba, muestra que del volumen de agua planificado para todo el país, las actividades agrícolas consumen el 50% cada año y de este volumen se destina aproximadamente el 40% para el riego del cultivo del arroz, Dorticos (2012). En este trabajo se comparan los resultados de diferentes procedimientos de diseño agronómico de sistemas de riego por goteo en cítricos y se propone uno que considere de manera apropiada elementos de la relación agua-suelo-planta-clima en el escenario del proyecto y que tenga en cuenta las ventajas que proporcionan las pruebas de campo con respecto a los otros métodos como el procedimiento alternativo, el uso de tablas, el punto óptimo de riego y los software. Los resultados evidencian la necesidad de realizar las pruebas de campo como premisa para el diseño de estos y como garantía de la utilización racional del agua y la energía de cara al cambio climático. Las deducciones de la investigación aportaran elementos de rigor a la dirección técnica de la ENPA para establecer el procedimiento para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo más adecuado a la agricultura cubana.

## **ABSTRACT**

An analysis of water consumption for all uses in Cuba shows that of the volume of water planned for the whole country, agricultural activities consume 50% each year and of this volume approximately 40% is destined to the irrigation of the crop of rice, Dorticos (2012). This research compares the results of different agronomic design procedures of citrus drip irrigation systems and proposes one that properly considers elements of the water-soil-plant-climate relationship in the project scenario and one procedure that takes into account the advantages that the field tests provide regarding the other methods such as the alternative procedure, the use of tables, the optimum point of irrigation and the software. The results show the need to perform the field tests as a premise for the design of these ones and as a guarantee of the rational use of water and energy in the face of climate change. The deductions from the research will provide elements of rigor to the technical direction of the ENPA to establish the procedure for the agronomic design of drip irrigation systems more appropriate to Cuban agriculture.

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis en primer lugar a mis abuelas Eliza y Eva porque sé que aunque no tuvieron la oportunidad de estudiar ven en mí su sueño cumplido, nunca las decepcionaré. A mis padres que pese a cualquier circunstancia siempre me han apoyado y guiado, a mis hermanas porque espero que algún día lleguen más lejos que yo en cualquier meta que se propongan, a mi familia en general, a mi novio, a mis amigos, a todos los profesores que me enseñaron lecciones académicas y lecciones de vida, a mi tutor, mil gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente a dios.

A mi tutor por ir a cada paso conmigo en la realización de este trabajo, gracias por su paciencia.

A mis padres, por sus sacrificios, por su amor, por nunca dejar de confiar en mí, SON LOS MEJORES.

A mis abuelos Eva, Eliza y Orlando por su insaciable amor.

A mis tíos, Dailis, Isabel, Made y Damir por ser mis segundos padres.

A mi novio por quererme, sostenerme y acompañarme en días muy difíciles, por su inesperado amor.

A mis amigas Tani, Yura y Dalia porque desde que entre a la universidad fuimos inseparables y más que amigas somos familia.

A mi amigo Pedro, el ovejo, por las risas y las lágrimas compartidas, por tu apoyo, mil gracias por tu amistad.

A los ovejos Maivi, Ariel, Yoel y Merencio por ser los mejores compañeros de equipo y amigos que alguien pudiese desear.

A Anita y Yailen

A los amigos de ingeniería civil por los incalculables e inolvidables momentos que pase a su lado.

A mi mejor amiga Roxana.

A todos los profesores del Departamento de Ingeniería Hidráulica que brindan sus conocimientos a los hidráulicos del futuro.

A todas aquellas personas que me acompañaron a lo largo de este período de mi vida y aportaron un granito de arena a este trabajo, a los que ya conocía y a los que conocí,

**MUCHAS GRACIAS**

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	8
<b>CAPÍTULO I. Revisión Bibliográfica .....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.- Generalidades de los sistemas de Riego Localizado de alta frecuencia .....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.1.- Definición .....</b>	<b>14</b>
<b>I.1.2.- Clasificación .....</b>	<b>14</b>
<b>I.1.4.- Componentes de un sistema Riego Localizado convencional .....</b>	<b>19</b>
<b>I.1.5.- Características principales de los sistemas RLAF. ....</b>	<b>21</b>
<b>I.1.6.- Ventajas e Inconvenientes de los sistemas RLAF .....</b>	<b>23</b>
<b>I.2.- Relación suelo -agua .....</b>	<b>25</b>
<b>I.2.1.- Contenido de humedad en el suelo.....</b>	<b>25</b>
<b>I.2.2.- Potencial hídrico en el suelo.....</b>	<b>25</b>
<b>I.2.3.- Estados de humedad del suelo .....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.4.- Movimiento del agua en el suelo .....</b>	<b>30</b>
<b>I.3.-Relaciones agua-planta .....</b>	<b>31</b>
<b>I.3.1.- Potencial hídrico en las plantas .....</b>	<b>31</b>
<b>I.3.2.- Movimiento del agua en las plantas.....</b>	<b>32</b>
<b>I.3.3.- Déficit hídrico en las plantas.....</b>	<b>32</b>
<b>I.3.4.- Momento óptimo de riego.....</b>	<b>33</b>
<b>I-4.- Necesidades de agua para cultivos bajo riego localizado de alta frecuencia.....</b>	<b>34</b>
<b>I.4.1.- Efectos de la localización y de la alta frecuencia.....</b>	<b>35</b>
<b>I.4.2.- Bulbo húmedo en riego localizado.....</b>	<b>35</b>
<b>I.4.3.- Factores que afectan la forma del bulbo húmedo.....</b>	<b>36</b>
<b>I.4.4.- Rendimiento de los cultivos contra el régimen de humedad.....</b>	<b>37</b>
<b>I-5.- Conclusiones parciales .....</b>	<b>38</b>
<b>II.-MATERIALES Y MÉTODOS. ....</b>	<b>39</b>
<b>II.1.Descripción de los componentes de la relación AGUA – SUELO – PLANTA – CLIMA y los agregados de riego.....</b>	<b>39</b>
<b>II.2.Procedimientos para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo .....</b>	<b>40</b>
<b>II.2.1.- Dosis, frecuencia y duración de los riego utilizando los datos de la prueba de campo .....</b>	<b>40</b>
<b>II.2.2.- Dosis, frecuencia y duración de los riego por medio de tablas .....</b>	<b>43</b>
<b>II.2.3.- Dosis, frecuencia y duración de los riego a través de la variante alternativa ...</b>	<b>44</b>

II.2.4.- Dosis, frecuencia y duración de los riego a través del punto óptimo del riego	45
II.2.5.- Dosis, frecuencia y duración de los riego a través del software de riego localizado.....	46
III.ANALISIS DE LOS RESULTADOS .....	47
III.1.1- Dosis, frecuencia y duración del riego utilizando los resultados de la prueba de campo .....	47
III.1.2- Dosis, frecuencia y duración del riego por medio de tablas .....	48
III.1.3 - Dosis, frecuencia y duración del riego utilizando la variante alternativa .....	49
III.1.4- Dosis, frecuencia y duración del riego considerando el punto óptimo de riego..	49
III.1.5.- Dosis, frecuencia y duración del riego utilizando los procedimientos del software RIEGOLOC.....	50
III.2.- Análisis de las variantes. ....	51
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES .....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## INTRODUCCIÓN

Desde el surgimiento de la vida humana, la agricultura ha jugado un papel muy importante para la subsistencia del hombre. Cuando las precipitaciones no son suficientes ni frecuentes es necesario que las plantas reciban una dosis adicional de agua para su desarrollo y la obtención de altos rendimientos, un método muy antiguo era el de aplicar el agua a las plantas por medio de regaderas o cubetas de riego, pero el mismo fue restringiendo su campo de aplicación debido a las trabajosas y extensas que se tornaban las labores en la medida que las áreas tomaban porciones significativas, por lo que surgió la necesidad de crear nuevos sistemas de riego y saneamiento agrícola. Con el transcurso de los años se implementaron nuevos métodos de riego tales como: Riego Superficial, Riego por Aspersión y Riego Localizado.

El riego por goteo es uno de los sistemas más eficientes en la actualidad, el suministro de agua es constante y uniforme, gota a gota, que permite mantener el agua de la zona radicular en condiciones de baja tensión. El agua aplicada por los goteros forma un humedecimiento en forma de cebolla en el interior del suelo, al que comúnmente se le denomina bulbo húmedo. Este bulbo normalmente alcanza su máximo diámetro a una profundidad de 30 cm aproximadamente y su forma está condicionada fuertemente por las características del suelo, en particular la textura.

Por otra parte, del total de agua dulce que hay en la tierra, casi el 80% está en forma de hielo, bajo forma líquida 1% se considera superficial y de ella, en los suelos, habría entre un 20 y un 40% utilizable para las plantas. Un análisis sobre el consumo de agua para todos los usos en Cuba, muestra que del volumen de agua planificado para todo el país, las actividades agrícolas consumen el 50% cada año y de este volumen se destina aproximadamente el 40% para el riego del cultivo del arroz, Dorticos (2012). Los sistemas de riego superficial clasifican como los de más baja eficiencia en el uso del agua, con valores medios inferiores al 60%; siendo los más bajos entre todas las técnicas de riego que se utilizan en el país. Esta situación justifica el uso de técnicas de riego más eficientes, que propicien mayores rendimientos de los cultivos y contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático.

Los procedimientos de diseño que se utilizan de forma alternativa en las Empresas de Consultoría y Diseño de la ENPA para el riego por goteo en cítricos no tienen en cuenta

parámetros tales como el radio, el volumen de agua y la profundidad a que se obtiene el resultado esperado en la producción, elementos que a su vez son indispensables en la relación agua-suelo-planta, por lo tanto lo más probable es que no se esté utilizando la cantidad de agua necesaria para el cultivo, ya sea por exceso o por falta del líquido.

Los métodos utilizados hasta el momento son: el uso de tablas que será más inadecuado cuantos más factores se ignoren, debido a la dificultad de cuantificar a partir de las propiedades del suelo otros parámetros importantes como el grado de estratificación, la pedregosidad y otros relacionados con el contenido de humedad. Por tanto aunque se disponga de tablas muy completas en ciertos datos, su utilización adolecerá de la precisión necesaria para el diseño, por lo que siempre deberán emplearse con mucha precaución.

Los software de simulación son otro método, pero el empleo de estos se enfrenta con la dificultad matemática para integrar las ecuaciones diferenciales a que se llega después de su análisis, así como de establecer sus límites de integración y de estimar la difusividad hidráulica que es el parámetro que define la variación de los contenidos de humedad en condiciones de no saturación. En la actualidad existen algunos de estos modelos de simulación, pero la dificultad para obtener los datos que se le deben proporcionar al mismo unido al precio de adquisición, hace que esta no sea por el momento una solución viable a los efectos del diseño.

Ante la dificultad de diseñar los sistemas de riego por goteo también ha surgido un método alternativo que no considera con el mismo rigor las soluciones que surgieren los otros métodos. Las pruebas de campo en las que se podría ampliar analíticamente el procedimiento para que realmente se consideren los tres parámetros.

En este trabajo se comparan los resultados de diferentes procedimientos de diseño de sistemas de riego por goteo en cítricos y se propone uno que tenga en cuenta las ventajas que proporcionan las pruebas de campo con respecto a los otros métodos como el procedimiento alternativo, el uso de tablas, el punto óptimo de riego y los software. Los resultados evidencian la necesidad de realizar las pruebas de campo como premisa para diseñar los sistemas de riego por goteo y como garantía de la utilización racional del agua y la energía de cara al cambio climático.

Por lo antes expuesto este trabajo presenta la siguiente metodología investigativa:

## **PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

Los procedimientos para el diseño de sistemas de riego por goteo en cítricos que se utilizan de forma alternativa en las empresas de Consultoría y Diseño de la ENPA no consideran algunos elementos de las relaciones agua-suelo-planta; necesarios para obtener un diseño apropiado del sistema de drenaje.

## **OBJETO DE INVESTIGACIÓN**

Las técnicas de riego localizado que utilizan emisores de goteo como dispositivos de emisión.

## **CAMPO DE ACCION DE LA INVESTIGACIÓN**

Los procedimientos para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo.

## **OBJETIVO GENERAL**

Proponer un procedimiento para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo que considere de manera apropiada elementos de la relación agua-suelo-planta – clima en el escenario del proyecto.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- 1- Actualizar el estado del arte referido a las técnicas de riego por goteo y específicamente los procedimientos para el diseño agronómico.
- 2- Comparar los resultados del diseño agronómico de sistemas de riego por goteo a partir de diferentes procedimientos utilizados en la práctica del diseño.
- 3- Aportar argumentos que permitan seleccionar el procedimiento de diseño agronómico de sistemas de riego por goteo más apropiado para los cultivos cítricos y frutales.

## **HIPÓTESIS**

Si se propone un procedimiento para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo en cítricos que considere de manera apropiada elementos de la relación agua-suelo-planta, se contribuye a incrementar el rigor de las soluciones de proyecto teniendo en cuenta la protección y conservación de los recursos naturales. .

## **RESULTADOS ESPERADOS**

- 1-Como resultado del trabajo de diploma quedaran identificados los procedimientos para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo más utilizados en la práctica de diseño.

2-La evaluación del rigor técnico de los resultados del diseño obtenido para cada procedimiento permitirá establecer las ventajas e inconvenientes para cada escenario de uso.

3-Los resultados de la investigación aportaran elementos de rigor a la dirección técnica de la ENPA para establecer el procedimiento para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo más adecuado a la agricultura cubana.

### **ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE DIPLOMA**

El presente trabajo de diploma está dividido en tres partes, en las cuales se reflejan las informaciones detalladas de cada elemento relacionado con el tema tratado, la primera está conformada por una presentación de la tesis en la cual aparecen, un breve resumen del trabajo y la tabla de contenidos. En la segunda se incluye una introducción que aborda la argumentación y el diseño de la investigación. Consta de tres capítulos; un capítulo I que contiene la revisión bibliográfica con temas tales como los sistemas de riego localizado de alta frecuencia, su definición, clasificación, componentes, características, ventajas e inconvenientes, principales cultivos a beneficiar, áreas bajo riego localizado en el mundo y en Cuba. La relación suelo-agua, analizando el contenido de humedad en el suelo, el potencial hídrico del suelo: mátrico, osmótico, de presión y gravitacional; mecanismos de retención de agua en el suelo; relación entre el potencial mátrico y contenido de humedad; curvas de retención de humedad; movimiento del agua en el suelo. Las relaciones agua-planta donde se recogen informaciones tales como el potencial hídrico en las plantas; el movimiento del agua en la planta; el déficit hídrico; el punto óptimo de riego y el potencial hídrico óptimo. También se verán reflejadas las necesidades de agua de los cultivos bajo riego localizado de alta frecuencia; los factores que afectan la forma del bulbo húmedo; el rendimiento de los cultivos contra el régimen de humedad; los efectos de la localización y de la alta frecuencia, y el bulbo húmedo en riego localizado.

En un segundo capítulo se muestran los materiales y métodos utilizados profundizando en los procedimientos para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo, con el uso de tablas, los resultados de las pruebas de campo, mediante el empleo de la variante alternativa, el punto óptimo y el software RIEGOLOC. Antes se caracterizará el caso de estudio con la localización, los datos básicos (A-S-P-C más los agregados de riego).

En un tercer capítulo se verá reflejado el análisis de los resultados de la investigación, donde se espera que queden mostrados los procedimientos para el diseño agronómico de sistema de riego por goteo más utilizados en la práctica de diseño; la evaluación del rigor técnico de los resultados del diseño obtenidos para cada procedimiento lo que permitirá establecer las ventajas e inconvenientes para cada escenario de uso. Los resultados de la investigación aportarán elementos de rigor a la dirección técnica de la ENPA para establecer el procedimiento para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo más adecuado a la agricultura cubana .En este tercer capítulo finalmente se enfocan las conclusiones del trabajo, referidas a los objetivos propuestos inicialmente y la hipótesis planteada en el mismo, así como las principales recomendaciones que contribuyen a su continuidad en posteriores investigaciones. El informe de tesis contiene además una tercera parte donde se recogen las referencias bibliográficas y los documentos utilizados en el trabajo.

## **CAPÍTULO I. Revisión Bibliográfica**

### **I.1.- Generalidades de los sistemas de Riego Localizado de alta frecuencia**

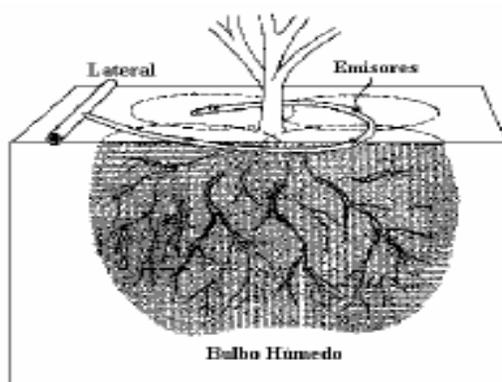
El riego localizado es compatible con la conservación del agua y la protección del medio ambiente, dos objetivos primordiales del siglo XXI (Pennunzio, 2010). Mediante este método de riego se aplica agua filtrada y productos químicos al suelo a través de una red de tuberías y otros dispositivos especiales llamados emisores (Mujica, 2002). El agua es llevada desde la fuente hasta muy cerca del sistema radical del cultivo, minimizando las pérdidas debidas a la evaporación directa del suelo y a la percolación profunda, generando en la zona radical un ambiente de características físicas, químicas y biológicas que conduce a mayores rendimientos, mejor calidad del producto agrícola y un incremento en la rentabilidad del sistema de producción, sin someter a las plantas a condiciones extremas (Zazueta, 1994), citado por (Veliz, 2007).

Los propósitos de los sistemas de Riego Localizado de Alta Frecuencia (RLAF), desde el punto de vista agronómico e ingenieril, consideran mantener en la zona radical de la planta una sección de dimensiones adecuadas en la cual se mantenga la humedad próxima a la capacidad de campo y adecuar la distribución y el nivel de la humedad de forma tal que la relación entre los factores agua-suelo-planta optimice el uso de los recursos, el desarrollo y el rendimiento de la planta, y maximice el retorno económico al productor (Keller y Bliesner, 2000).

Es importante también tener presente consideraciones de tipo ambiental en el diseño y operación de estos sistemas, (Cuenca, 1999), citado por (Veliz, 2007). Las ventajas potenciales de los sistemas RLAF se relacionan con el ahorro del agua, (Pizarro, 1990), citado por (Ferrerres, 1996). En estos sistemas de distribución y aplicación de agua para el riego, el régimen de sales obliga a un manejo especial de riegos y de lavados. Así como el régimen de sales se ve afectado por la localización y la alta frecuencia a veces es conveniente no detener el riego aún en presencia de lluvias ligeras e incluir cierto exceso en la dosis de entrega o también provocar lavados mediante riegos complementarios por aspersion (Boswel, 1990).

### I.1.1.- Definición

Varios autores se han referido a la definición del método de Riego Localizado de Alta Frecuencia (RLAF), en las mismas el factor común ha sido destacar las características fundamentales de este método y que le permiten generar una transferencia de humedad en el suelo muy propicia para los cultivos. De acuerdo con Pizarro (1987), el riego localizado consiste en aplicar agua al suelo a muy bajos caudales, a través de un sistema de tuberías plásticas de pequeños diámetros en los cuales están fijados los emisores, estos llevan el agua muy cerca de las plantas de forma que solo se humedezca una porción del suelo en las cuales se desarrollan la mayoría de las raíces, con esto se pretende obtener de ese pequeño volumen aplicado, el agua y los nutrientes que necesitan las plantas para su desarrollo.



**Figura I.1.-** Representación del bulbo húmedo en RLAF. Pizarro (1987).

### I.1.2.- Clasificación

En la actualidad se desarrollan investigaciones encaminadas a establecer nuevas alternativas de riego que contribuyan a la producción de alimentos agrícolas con una utilización eficiente del agua y la energía, así como de los suelos agrícolas. En este sentido es difícil referirse a una clasificación definitiva de este método de riego, el cual en sus inicios fue considerado el más joven y discutido de entre los métodos convencionales o tradicionales de riego. Una clasificación muy práctica para la docencia y utilizada en las Empresas de Consultoría y Diseño de la Empresa Nacional de Proyectos Agropecuarios (ENPA) del país, agrupa las diferentes técnicas que componen este método de riego en:

1. Técnicas de riego por goteo.
2. Técnicas de riego por microaspersión.

### 3. Técnicas de riego por exudación.

Es el sistema de riego localizado por goteo es considerado el más popular y generalizado en todo el mundo. En ellos, el agua circula a presión por la instalación hasta llegar a los goteros, en los que se pierde presión y velocidad, saliendo gota a gota. En Cuba los sistemas de riego por goteo son utilizados mayormente en cultivos en hilera con marco de plantación amplio (cítricos y frutales, caña de azúcar, cafetos, algunos cultivos varios y hortalizas). También es utilizado para el riego de cultivos en invernadero (tomate, pimiento, pepino, melón, ornamentales), y en algunos cultivos en línea como el algodón, coliflor, repollo y patata.

Los emisores de goteo generalmente trabajan a una presión entre 100 a 300 kPa aproximadamente y suministran caudales entre 2 y 16 L/h, la figura I.2 muestra el funcionamiento de dos tipos de emisores de goteo, lo más frecuente es que las tuberías laterales y los goteros estén situados sobre la superficie del suelo, y el agua se infiltre y distribuya en el subsuelo, (riego por goteo superficial). En otras ocasiones las tuberías laterales se entierran entre 20 y 70 cm. y los goteros aportan el agua a esa profundidad, (riego por goteo subterráneo).

La profundidad de enterrado del porta goteros dependerá del tipo de cultivo y del tipo de suelo, este sistema está basado en la utilización de franjas de humedad que garantizan una buena uniformidad de riego. Tiene como principal inconveniente el riesgo de obstrucción de los goteros y la dificultad de detectar fallos en el funcionamiento de estos así como de su reparación.



**Figura I.2.-** Ejemplos de goteros. El riego y sus tecnologías, capítulo 7, colectivo de autores .crea,uclm,es (2010).

Las cintas de exudación son tuberías o cintas prefabricadas a partir de una membrana compuesta de microfibras de polietileno entrecruzadas, formando una malla en la que los poros tienen un tamaño medio de 4 a 5 micras y ocupan el 50% de la superficie de la membrana, al aplicar una presión que normalmente está comprendida entre 19 y 35 kPa, la tubería se hincha y el agua sale a los poros homogéneamente en toda su longitud, lo que da lugar a la formación de una franja continua de humedad y no en puntos localizados como en el riego por goteo, esta característica las hace muy indicadas para el riego de cultivos en línea, especialmente interesante en suelo arenoso.

Las presiones de trabajo son menores que las de los goteros, esto hace necesario el empleo de reguladores de presión especiales o microlimitadores de caudal. Las cintas de exudación se pueden atascar debido a las algas y a los depósitos de cal. Por tanto requieren de mantenimiento en base a tratamientos químicos.



**Figura I.3.-** Ejemplos de cintas de exudación. Celia Gonzálbes (2001).

En el riego por microaspersión, el agua se aplica sobre la superficie del suelo en forma de lluvia muy fina, mojando una zona determinada que depende del alcance de cada emisor. Está indicado tanto para cultivos leñosos como para cultivos herbáceos de distinto marco de plantación. Se distinguen los emisores denominados microaspersores y los denominados microdifusores, la figura I.4 muestra un ejemplo, en, ambos casos suelen trabajar a presiones entre 100 y 200 kPa y suministran caudales de hasta 200 L/h.



**Figura I.4.-** Ejemplos de microaspersores y microdifusores. El riego y sus tecnologías, capítulo 7, Colectivo de autores .crea,uclm,es (marzo 2010)

El riego por goteo ha sido utilizado desde la antigüedad cuando se enterraban vasijas de Arcilla llenas de agua con el fin de que el agua se infiltrara gradualmente en el suelo. El riego por gota a gota moderno se desarrolló en Alemania hacia 1860 cuando los investigadores comenzaron a experimentar la subirrigación con ayuda de tuberías de arcilla para crear una combinación de irrigación y de sistema de drenaje. En los años 1920, tuberías perforadas fueron utilizadas en Alemania, después O.E. Robey experimentó el riego por tubería porosa de tela en la universidad de Míchigan.

Con la llegada de los plásticos modernos después de la Segunda Guerra Mundial, fueron posibles numerosas mejoras. Micro-tubos de plástico y diversos tipos de goteros han sido empleados en invernadero en Europa y en Estados Unidos.

La moderna tecnología de riego por goteo fue inventada en Israel por Simcha Blass y su hijo Yeshayahu. En lugar de liberar el agua por agujeros minúsculos, que fácilmente se podían obstruir por acumulación de partículas minúsculas, el agua se libera por tuberías más grandes y más largas empleando el frotamiento para ralentizar la velocidad del agua en el interior de un emisor (gotero) de plástico. El primer sistema experimental de este tipo fue establecido en 1959 cuando la familia de Blass en el Kibboutz Hatzetim creó una compañía de riegos llamada Netafim. A continuación, desarrollaron y patentaron el primer emisor exterior de riego por gota a gota. Este método muy perfeccionado se ha desarrollado en Australia, en América del Norte y en América del Sur hacia el fin de los años 60.

En 1995, la superficie regada en el mundo superaba los 271 millones de hectáreas, dos tercios de las cuales están localizadas en sólo cinco países: China, India, Paquistán, la ex Unión Soviética y Estados Unidos. Esta superficie representa aproximadamente el

17% de la tierra agrícola del planeta, a pesar de ello, contribuye con más de un tercio de las cosechas agrícolas mundiales, siendo por lo tanto cerca de dos veces y media más productivas que las tierras de secano.

Por otro lado, en las tierras irrigadas de países como China, Egipto, Israel, India, Indonesia, Japón, Paquistán y Perú, se cosecha más del 50% de sus producciones nacionales de alimentos. En este sentido, se estima que la agricultura de regadíos utiliza entre 70% y 73% del agua consumida mundialmente, es decir aproximadamente unos 3 300 km<sup>3</sup>; estos porcentajes se elevan en algunos países, en especial en aquellos que se caracterizan por tener extensas zonas áridas o semiáridas. En India el riego absorbe 97% del total de agua consumida en el país. Sin embargo, el volumen efectivamente utilizado es muchísimo menor ya que la eficiencia mundial promedio de los sistemas de riego, que canalizan y distribuyen ese 70-73% de agua para uso agrícola, es apenas de 37% a 45%; en Asia la cifra es aún menor: sólo 30%. Es decir, 60% del agua en principio destinada a la agricultura mundial se pierde o su calidad se deteriora, ya que a su paso por tierras cultivadas absorbe sales, fertilizantes, pesticidas u otros elementos tóxicos, de manera que aun cuando una parte importante regresa a sus flujos, aguas abajo o percola a los acuíferos, incorpora en ellos elementos contaminantes que reducen su calidad.

**Tabla # I.1.-** Países con un área regada de entre 2 y 5 millones de ha., utilizando el método de riego localizado. Abvarzan Co. (2004).

<b>PAÍSES</b>	<b>ÁREAS (ha)</b>	<b>PAÍSES</b>	<b>ÁREAS (ha)</b>
Bangladesh	4.7	Rumanía	3.0
Indonesia	4.5	Vietnam	3.0
Rusia	4.5	Italia	2.8
Uzbekistán	4.3	Francia	2.6
España	3.8	Japón	2.6
Brasil	3.5	Australia	2.6
Irak	3.5	Ucrania	2.3
Egipto	3.4	Kazajistán	2.1

La superficie regable de Cuba, considerando los factores del clima, suelo y los recursos hídricos disponibles, incluyendo las necesidades de los cultivos y las eficiencias de las

diferentes técnicas de riego utilizadas, se estima en 2.7 millones de ha. Un incremento en la superficie regable de Cuba sería sólo posible con un aumento en la eficiencia en los sistemas existentes.

A pesar de las características climáticas de Cuba, hasta 1958 sólo se habían construido trece obras hidráulicas (incluidas pequeñas presas y micropresas) para un total de 0,48 km<sup>3</sup> de agua embalsada, destinadas fundamentalmente al abastecimiento de la población y al riego de la caña de azúcar. Debido al desarrollo de las infraestructuras hidráulicas, se pasó de 162 000 ha bajo riego en 1958 a 1 062 191 ha en 1991. Se realizó un especial esfuerzo en el período 1986-1991, en el cual se construyeron 106 micropresas, 277 kilómetros de canales magistrales, se perforaron 19900 pozos y se beneficiaron 158 356 ha con drenaje parcelario o de red general, fundamentalmente en el cultivo de la caña de azúcar.

El riego por goteo fue instalado primero en parcelas experimentales y luego en los campos de los agricultores. El nuevo sistema incrementó la producción y ahorró agua, permitiendo la expansión de la superficie bajo riego y de la intensidad de cultivo. Convencidos por el experimento, muchos agricultores espontáneamente instalaron riego por goteo en sus fincas. Seis años después del primer experimento, en 1999, el 22 por ciento de las tierras bajo riego en el país han adoptado el riego por goteo, y muchos agricultores han cambiado sus cultivos de alto consumo de agua, como las plantaciones de caña de azúcar, a cultivos hortícolas de altos ingresos, tales como papas, cebollas, pimiento y tomates. La producción hortícola total subió de 5 700 toneladas en 1991 a 17000 toneladas en 1999.

#### **I.1.4.- Componentes de un sistema Riego Localizado convencional**

1. Instalación de bombeo.
2. Centro de control.
3. Tubería principal.
4. Tuberías conductoras.
5. Tuberías distribuidoras.
6. Tuberías laterales.
7. Emisores.

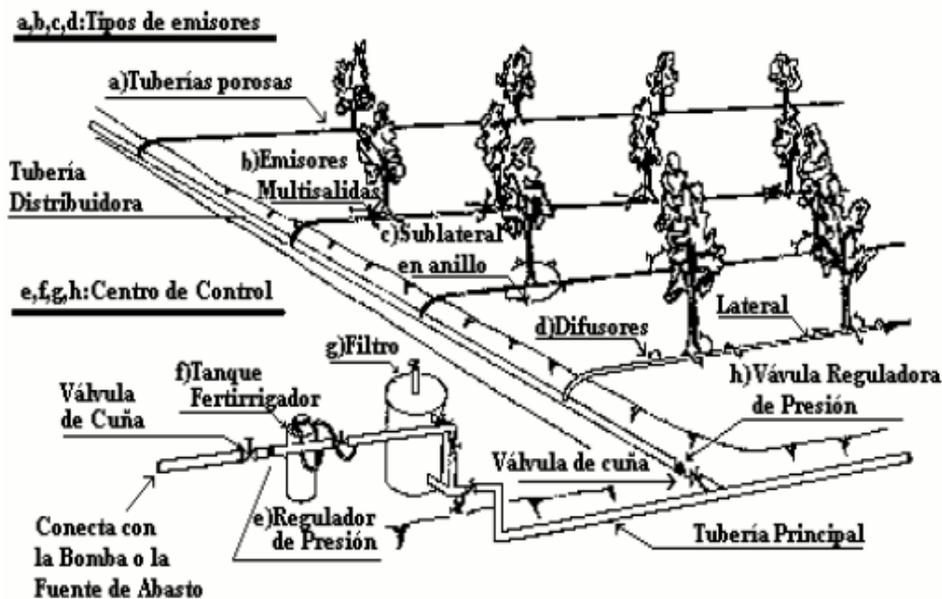


Figura I.5.- Esquema de un sistema RLA. Vargas (2003)

**Instalación de bombeo:** Es donde se toma el agua de la fuente de abasto y se le proporcionan la presión necesaria para que circule a través de todo el sistema de tuberías, garantizando a su vez que los emisores entreguen el caudal deseado. En algunos casos pueden ir acompañadas de un equipo de prefiltrado del agua.

**Centro de control:** Es característico de los sistemas de riego localizado, incluye entre sus elementos, equipos de filtrado y de fertirrigación, válvulas, manómetros, ventosas y metros contadores, entre otros. En general, se podría definir, como el conjunto de elementos que permiten controlar el manejo del agua de riego de toda la unidad rotacional inherente a él. En la estación de control se filtra el agua, se puede tratar en los casos indicados, incorporarles fertilizantes, controlar la presión del sistema, medir la dosis de riego, etcétera. En Cuba se fabrican dos modelos de estación de control o cabezales de riego (AFM y CFM) que se distinguen fundamentalmente por el tipo de filtro que utilizan, y cada uno de ellos se diseña para dos gastos diferentes, el diseñador puede concebir estaciones de control con gastos superiores a los nominales, aumentando el número de unidades de filtro. En la actualidad también se fabrican filtros de disco, de anillas y otras variantes compatibles con la fertirrigación y el retrolavado automático.

**Tubería principal:** Son las que conducen el agua desde la instalación de bombeo hasta las estaciones de control o cabezales de riego, son las que conectan todas las unidades operacionales del sistema de riego. Pueden ser de diferentes materiales y resistencia (hierro fundido, asbesto cemento, centro acero, etc.), aunque preferiblemente se utilizan tuberías plásticas debido a su menor costo y a su durabilidad. Su diámetro variará en función de la extensión del sistema, el caudal y la velocidad del fluido en el interior de la tubería.

**Tuberías conductoras:** Son las que dentro de una estación de control o cabezal de riego abastecen las diferentes parcelas que componen la unidad rotacional, se utilizan generalmente de PVC o PEAD y sus diámetros oscilan entre 50 y 110 mm. Su función en el diseño suelo ser entregar el caudal a las válvulas que abastecen las parcelas de riego.

**Tuberías distribuidoras:** Son las que alimentan a las tuberías laterales dentro de una parcela de riego, mayormente se conciben de PEAD, debido a las facilidades de conexión con las diferentes accesorios y singularidades, sus diámetros oscilan entre 50 y 110 mm.

**Tuberías laterales:** Son las tuberías de último orden, y en las que se instalan los emisores de riego. Se fabrican de polietileno de baja o media densidad (PEBD o PEMD) con diámetros de 32, 25, 20y 16 mm, con sus correspondientes accesorios que permiten conectarlos entre sí y reducir de un diámetro a otro y tapanlos en sus extremos.

**Emisores:** Son los dispositivos usados en el riego localizado con la finalidad de disipar la carga hidráulica y liberar un pequeño caudal de modo constante.

#### **I.1.5.- Características principales de los sistemas RLAF.**

De acuerdo con Rodrigo (1992), se reconocen las siguientes características principales de los sistemas de RLAF.

1. Las necesidades de agua de los cultivos con RLAF son prácticamente iguales que con otras técnicas de riego, sin embargo con la conducción del agua y su aplicación en la parcela se consiguen importantes ahorros de agua al disminuir las pérdidas por infiltración y escorrentía.
2. La evaporación directa desde el suelo en los RLAF es menor que en los riegos convencionales, en cambio la transpiración aumenta ligeramente, esto es una consecuencia del efecto de localización.

3. Los sistemas RLAF pueden aumentar espectacularmente las producciones en suelos arenosos o poco profundos con relación a los métodos convencionales de riego, esto es debido a que con éstos es posible mantener un régimen de humedad adecuado en el suelo sin elevar excesivamente el costo de las operaciones, sin más limitación práctica que cuando se da más de un riego diario es conveniente la automatización del inicio y final del riego.
4. La aplicación localizada y frecuente de agua evita en muchos casos el daño por salinidad en las plantas, ya que las sales se encuentran muy poco concentradas en la zona de actividad de las raíces. De hecho las sales se concentran en zonas no accesibles por las raíces de las plantas, mientras que se mantienen diluidas en las zonas de actividad radicular. Esta es la razón por la que el riego localizado es la única posibilidad de riego para cultivos sensibles a aguas de mala calidad.
5. Dado que solo se moja una parte del suelo, se consigue reducir la infestación por malas hierbas y se hace más simple su control. Sin embargo, es necesario realizar un seguimiento de la aparición de malas hierbas en la zona de suelo humedecida, principalmente cuando el cultivo está en fase de crecimiento o en fase juvenil. Por otro lado, puede haber un ahorro en las labores de cultivo, ya que en las zonas secas no crecerán malas hierbas.
6. En los RLAF el suelo solo se satura en un volumen muy reducido próximo al emisor, esto puede aliviar los problemas de falta de aireación y de la destrucción superficial de la estructura del suelo con la consiguiente formación de costra que se producen en los suelos muy pesados, cuando se aplican técnicas de riego convencionales, además, la alta frecuencia con que se operan estos sistemas provoca que se mantenga baja la salinidad del agua del suelo, logrando mantener en niveles adecuados la capacidad de absorción de las raíces.
7. Otra característica muy especial de los RLAF es la Fertirrigación, la cual si bien no es una exclusiva de este método de riego si constituye una necesidad, dado que al solo explorar las raíces una parte del suelo, los nutrientes situados fuera de su alcance no son muy efectivos, además, la gran actividad del bulbo húmedo podría agotar algunos nutrientes si no se repusieran con frecuencia. Las instalaciones de riego localizado ofrecen la posibilidad de aportar fertilizantes y otros productos fitosanitarios

(insecticidas, fungicidas, etc.). En este caso es el agua la que se encarga de hacer llegar los fertilizantes hasta las raíces de la planta, bien de forma continuada o intermitente. Para que esta técnica sea eficaz es indispensable disponer de un sistema de riego bien diseñado y con buenos materiales con objeto de aplicar el agua con alta uniformidad. Esto permitirá suministrar la misma dosis de abono en todos los puntos, cubriendo así sus necesidades, evitando pérdidas innecesarias y reduciendo los efectos medioambientales negativos.

8. La inversión inicial en este tipo de riego suele ser elevada, y su coste depende del cultivo, de la modalidad de riego elegida, de la cantidad del agua de riego y su exigencia en filtrado, del equipo de fertirrigación, del grado de automatización de la instalación, etc. La buena elección de equipos repercute en una disminución de costes de mano de obra y mantenimiento, ya que, por ejemplo, un buen equipo de filtrado reducirá la posibilidad de obturaciones en la red y la frecuencia de operaciones de mantenimiento y por tanto se reducirán los costes del sistema.

#### **I.1.6.- Ventajas e Inconvenientes de los sistemas RLAF**

##### VENTAJAS:

1. No favorece el crecimiento de malas hierbas, porque una parte de la superficie del suelo no se moja con el agua de riego, lo que reduce los costos de las operaciones de control de malas hierbas.
2. La aplicación de fertilizantes en el agua de riego (fertirriego) es aconsejable ya que permite un mayor control sobre la localización y el momento de actuación de los fertilizantes, lo que puede mejorar la eficiencia de los cultivos así como eliminar los riesgos de contaminación asociados al uso de fertilizantes. Además, se evitan los trabajos necesarios para su aplicación por medios tradicionales.
3. Es adecuado para el suministro de pequeñas dosis con alta frecuencia, lo que permite mantener la mayor parte del suelo en buenas condiciones de aireación y de humedad, evitando el estrés hídrico.
4. Cuando el riego es frecuente, se mantiene baja la concentración de sales de la solución del suelo, lo que hace posible la utilización de agua con un contenido en sales más elevado que con los otros métodos de riego.

5. Pueden diseñarse para trabajar, prácticamente, en cualquier tipo de topografía.
6. Este método de riego facilita un ahorro importante de agua. El mayor o menor ahorro se fundamenta en general en: La posibilidad de controlar fácilmente la lámina de agua aplicada; La reducción de la evaporación directa; y la ausencia de escorrentía.
7. El aumento de la uniformidad de aplicación, al reducir la filtración profunda o percolación.
8. Otra ventaja de tipo económico que alcanza valores importantes con este tipo de riego, es la reducción de la mano de obra en la aplicación de agua en la parcela. Además, la aplicación localizada del agua supone que prácticas como la eliminación de malas hierbas, tratamientos manuales, poda y entre otras recolección, no se vean dificultadas por el riego. De esta forma el calendario de labores no tiene por qué modificarse por el riego. En cultivos frutales u hortícolas, donde con frecuencia la recolección ha de adaptarse a la demanda de los mercados, puede resultar especialmente importante la no interferencia del riego en la recolección.
9. La uniformidad en el reparto del agua en el riego localizado depende principalmente del diseño hidráulico de la red y no de las características del suelo ni de las condiciones climáticas (especialmente el viento), dando en general buena uniformidad de aplicación para pequeñas diferencias de presión que puedan ocurrir en la red. La eficiencia de aplicación del agua puede ser elevada si el diseño y el manejo son correctos.

Para que estas ventajas sean efectivas, es preciso que los componentes tengan un diseño adecuado y los materiales con que están fabricados sean de buena calidad. De no ser así, la inversión realizada en la instalación no producirá ventajas sustanciales.

#### INCONVENIENTES:

1. Requiere que se filtre el agua para evitar tupiciones en los emisores.
2. Requiere la presencia de personal calificado para dirigir y controlar la explotación del sistema de forma directa.
3. Algunos de los elementos del sistema pueden ser susceptibles al ataque de roedores.
4. El incremento de los costos de inversión inicial en comparación con el riego por aspersión.

5. En las etapas de fomento de cultivos como cítricos y plátanos, la uniformidad del riego de estos sistemas (Difusores y Microaspersores) es afectada de forma apreciable por la influencia del viento. En los cultivos de porte bajo, debe tenerse presente la influencia de este factor climático durante todo su desarrollo.

### **I.2.- Relación suelo -agua**

El suelo es la base sobre la que crecen las plantas, en él debe edificarse cualquier sistema de Riego. Debe ser regable, es decir, capaz de sostener rendimientos suficientemente altos para pagar los costos de establecimiento, más los costos de operación y conservación del área.

(Aguilera, 1996)

#### **I.2.1.- Contenido de humedad en el suelo**

En los métodos tradicionales o convencionales de riego el contenido de humedad en el suelo constituye un parámetro importante para el diseño, en la mayoría de los casos su magnitud justifica la baja frecuencia de aplicación que caracteriza estos métodos de riego y por consiguiente los grandes volúmenes de agua que se aplican con las técnicas de riego por aspersión y superficiales que lo constituyen.

Su valor depende mayormente de las propiedades hidrofísicas de los suelos como son: *la capacidad de campo* (CC [%Pss]), la profundidad a humedecer (h [m]) y la densidad aparente del suelo (Da [g/cm<sup>3</sup>]) El conocimiento del contenido de agua es fundamental para determinar los momentos óptimos de riego y su magnitud. La cantidad de agua se expresa como porcentaje en base al peso seco del suelo, en base al volumen del suelo o como lámina en milímetros cada 10 cm en profundidad, de acuerdo con Duran, A. et al (2000) se puede utilizar la siguiente relación:

$$H \%V = H \%Pss \times Da \quad (1)$$

#### **I.2.2.- Potencial hídrico en el suelo**

El agua en estado líquido es un fluido cuyas moléculas se hallan en constante movimiento. La capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema particular depende de su energía libre. La magnitud más empleada para expresar y medir el estado de energía libre del agua es el potencial hídrico (P<sub>H</sub>). El potencial hídrico puede expresarse en unidades de energía por unidades de masa o volumen, la unidad de uso

más corriente el megapascal (MPa = 10 bares) aunque en el pasado reciente también se han utilizado la atmósfera y el bar (1 bar= 0.987 atm).

El movimiento del agua en el suelo y en las plantas ocurre de manera espontánea a lo largo de gradientes de energía libre, desde zonas donde el agua es abundante, y por lo tanto tiene alta energía libre por unidad de volumen (mayor  $P_H$ ), a zonas donde la energía libre del agua es baja (menor  $P_H$ ). El potencial hídrico está fundamentalmente determinado por el efecto osmótico, asociado con la presencia de solutos, por las fuerzas mátricas que adsorben o retienen agua en matrices sólidas o coloidales, por el efecto de la altura y por presiones positivas o negativas o tensiones presentes en los recipientes o conductos donde se encuentra.

Estos factores tienen un efecto aditivo que típicamente disminuye el potencial hídrico del suelo o la planta con respecto al potencial del agua pura. Así, en un sistema particular, el potencial hídrico total es la suma algebraica de cuatro componentes:

$$P_H = P_O + P_M + P_G + P_P \quad (2)$$

Donde:

$P_H$ .- Potencial hídrico.

$P_O$ .- Potencial osmótico.

$P_M$ .- Potencial mátrico.

$P_G$ .- Potencial gravitacional.

$P_P$ .- Potencial de presión.

El  $P_O$  representa el componente determinado por la presencia de sales disueltas en el suelo y que disminuye la energía libre del agua y puede ser cero o asumir valores negativos. A medida que la concentración de sales aumenta, el  $P_O$  se hace más negativo. Sin la presencia de otros factores que alteren el potencial hídrico, las moléculas de agua de las disoluciones se moverán desde lugares con poca concentración de sales a lugares con mayor concentración de sales. El  $P_O$  se considera 0 para el agua pura.

El  $P_M$  es el generado por los mecanismos de retención de agua en el suelo (adhesión y cohesión), su valor es siempre negativo ya que la presión que origina se opone a la extracción del agua de suelo. Cuanto más seco está el suelo más bajo es su potencial

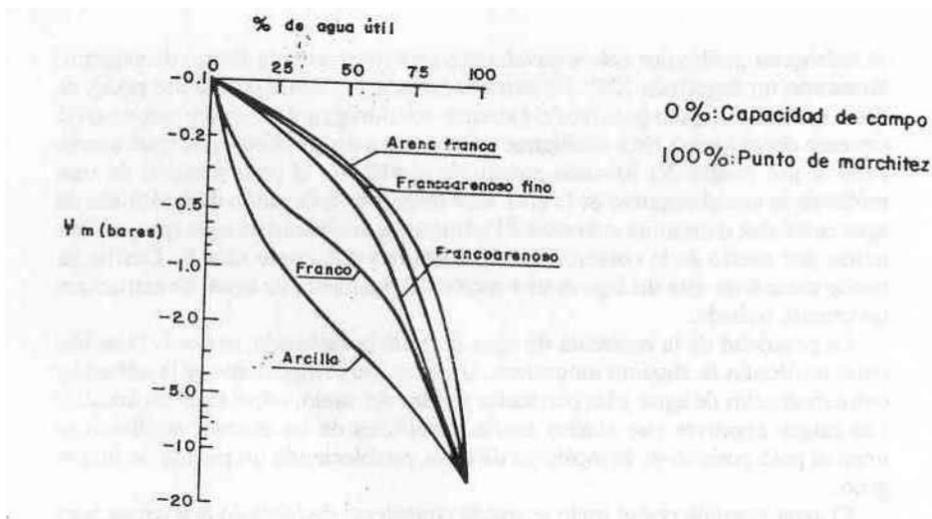
mátrico y mayor sería el trabajo metabólico de las plantas para extraer el agua y los nutrientes del suelo.

El  $P_G$  representa la influencia del campo gravitatorio y normalmente es positivo, si bien esto depende de la posición elegida para el estado de referencia.

El  $P_P$  solo se presenta en el caso de suelos saturados, representa la presión hidrostática y puede asumir valores positivos o negativos según el agua esté sometida a presión o tensión. Así por ejemplo, el  $P_P$  en el xilema es negativo debido a la tensión desarrollada por diferencias en el potencial hídrico originadas en la transpiración.

### **I.2.2.1.- Relación entre el potencial mátrico y el contenido de agua.**

Para un mismo contenido de humedad los distintos suelos retienen el agua con distinta energía, es decir, la relación humedad potencial mátrico varía para cada tipo de suelo. El parámetro que muestra esa relación se llama CURVA DE RETENCIÓN DE HUMEDAD, y constituye en la actualidad el parámetro que caracteriza de manera más rigurosa el momento óptimo del riego. En la figura No. I.7 que le sigue se muestran a modo de ejemplo las curvas de retención de varios tipos de suelos.

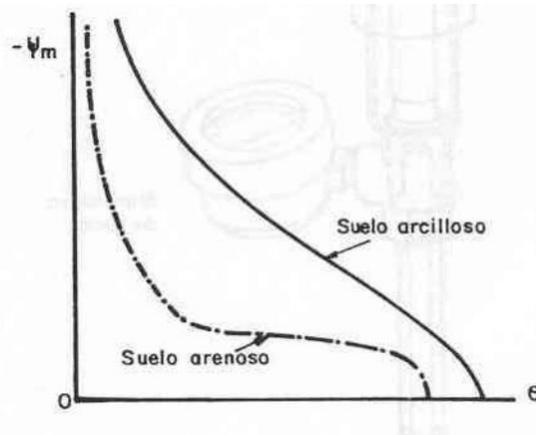


**Figura I.7.-** Curvas de retención de humedad para distintos suelos. Richard et al citado por Pizarro (2000).

En las ordenadas se representa el Potencial mátrico y en las abscisas el porcentaje de agua extraída entre capacidad de campo y punto de marchitez

### I.2.2.2.- Propiedades del suelo que afectan a la retención del agua.

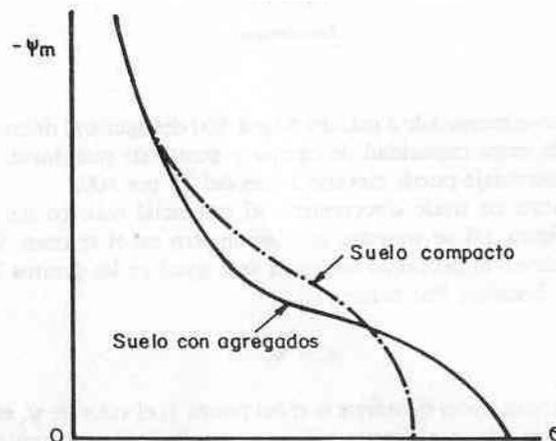
Para un mismo peso de suelo, las arcillas presentan una superficie mayor que las demás partículas minerales: 1g de arena gruesa puede tener una superficie de 1 cm<sup>2</sup> mientras que el mismo peso de arcilla puede alcanzar los 800 m<sup>2</sup>. Por lo tanto **la textura** influye de forma muy importante en la capacidad de retención de los suelos, la figura I.8 muestra el efecto de la textura en la relación *HUMEDAD – POTENCIAL MÁTRICO*.



**Figura I.8.-**Efecto de la textura en la retención de agua por el suelo. Pizarro (1987).

Nótese que en el suelo arcilloso la variación del potencial mátrico es paulatina, mientras que en el arenoso cuando la humedad baja de un cierto valor se produce un cambio brusco. El punto de cambio corresponde al paso de poros grandes a pequeños.

Por otro lado los suelos con buena estructura tienen una mayor porosidad y por tanto cuando están saturados ( $P_M = 0$ ) contiene más agua. En estos casos el efecto de la estructura domina sobre el efecto de la textura y lo contrario ocurre a valores altos del potencial mátrico, la figura I.9 muestra el efecto de la estructura en la retención de agua por el suelo.



**Figura I.9.-** Efecto de la estructura en la retención de agua por el suelo. Pizarro (1987).

### **I.2.3.- Estados de humedad del suelo**

**Saturación:** Cuando un suelo está saturado todos sus poros están llenos de agua por lo tanto en estado de saturación el potencial mátrico del suelo es cero, si en esta situación existiera un estrato impermeable el drenaje del suelo sería muy lento afectando el adecuado crecimiento y desarrollo de las plantas. Si por el contrario el suelo drenara libremente, el contenido de humedad del suelo comienza a disminuir y el agua así eliminada se denomina agua libre o gravitacional. Si el drenaje prosigue, llega un momento en que el suelo no pierde más agua, este estado se reconoce como **Capacidad de Campo:** Esta situación es muy favorable para las plantas. En la definición tradicional se admite que la capacidad de campo se alcanza dos o tres días después de drenada el agua libre o gravitacional; para evitar esta imprecisión se define el concepto de humedad equivalente que es el agua retenida por el suelo cuando a una muestra del mismo se aplica una presión de 1/3 atm (333 cm). Este término no se utiliza mucho en la actualidad debido a su variabilidad con la textura del suelo; en el caso de los riegos localizados en los que es inherente la alta frecuencia este parámetro es menos importante para el diseño.

**Punto de Marchitez:** en las prácticas agrícolas el contenido de humedad puede descender por debajo de la humedad equivalente como consecuencia de la Etc y va resultando cada vez más difícil la extracción de agua y nutrientes por las plantas, hasta que alcanzan un estado denominado punto de marchitez en el cual experimentan marchitez irreversible y que ocurre cuando el agua es retenida por el suelo cuando a una muestra del mismo se aplica una presión de 15 atm. Lo mismo que con la capacidad de campo, este término no se utiliza mucho en la actualidad debido a su variabilidad con la textura del suelo.

**Agua útil:** Independientemente de las imprecisiones de los conceptos anteriores estos parámetros tiene un gran significado agronómico ya que representan los límites de humedad en el suelo que puede ser utilizada por las plantas. La cantidad de agua comprendida entre estos dos valores se define como agua útil.

## I.2.4.- Movimiento del agua en el suelo



**Figura I.10.-** Movimiento del agua en el suelo. Intagri S.C Artículos técnicos <https://www.intagri.com/articulos>

Los contenidos que abordan el flujo de agua en suelos no saturados, permiten calcular en el caso de los riegos localizados las dimensiones del bulbo húmedo, es decir el volumen de suelo mojado por el emisor de riego y en función de esas dimensiones diseñar una serie de las partes componentes de la instalación relacionadas con las parcelas de riego (número de emisores por planta, separación entre emisores, caudal del emisor, dosis, frecuencia y duración de los riegos).

De acuerdo con Pizarro (1987) este objetivo no está totalmente resuelto. Una primera dificultad aparece en los modelos matemáticos, ya que las ecuaciones a que se llega no son de fácil integración y las condiciones límites son difíciles de establecer. Además los parámetros que describen las características del suelo son difíciles de medir, por ejemplo la conductividad eléctrica en el extracto de saturación del suelo. Otra dificultad reside en el uso de tablas empíricas cuyos datos de partida en muy pocas ocasiones coinciden con los propios de los escenarios de los diferentes diseños.

En la actualidad la mejor forma de estimar estos parámetros es por medio de las pruebas de campo, pero a pesar de su simplicidad para realizarlas a menudo se dificulta por razones prácticas. En este sentido, José Luis Fuentes Yagües, propone como paliativo a la realización de los experimentos de campo unas expresiones matemáticas que permiten estimar el diámetro humedecido por el emisor en función del caudal y de la textura del suelo, las mismas deberán utilizarse con precaución debido a que entre otras cosas no consideran la estructura del suelo y el grado de estratificación. Las formulas son las siguientes:

$$d = 1.2 + 0.1 \times Qe \text{ [Textura fina]} \quad (3)$$

$$d = 0.7 + 0.11 \times Qe \text{ [Textura media]} \quad (4)$$

$$d = 0.3 + 0.12 \times Qe \text{ [Textura gruesa]} \quad (5)$$

**Donde:**

*d.*- Diámetro mojado (m).

*Qe.*- Caudal que descarga el emisor (L/h).

**Tabla No. 2.** Aproximación del diámetro mojado y separación entre emisores de 4 L/h., para duración de riego de 3 horas. Rabiza, citado por Arapa (2002).

TEXTURA	Diámetro mojado (m)	Separación entre emisores (m)	
		Mínimo	Máximo
FINA	1.50	0.95	1.50
MEDIA	1.10	0.70	1.00
GRUESA	0.75	0.45	0.70

### **I.3.-Relaciones agua-planta**

De acuerdo con Pizarro (2000), el agua es el principal componente de las plantas en algunos de cuyos órganos representa más del 90% en peso. Actúa como disolvente y medio de transporte de gases, minerales y otras sustancias esenciales para la vida vegetal y es asimismo un reactivo de procesos fundamentales, como la fotosíntesis. Pero desde el punto de vista de la tecnología del riego lo que interesa es conocer el movimiento del agua en el sistema suelo – planta – atmósfera y sobre todo dos cuestiones prácticas: *el momento óptimo del riego y las necesidades hídricas de los cultivos.*

#### **I.3.1.- Potencial hídrico en las plantas**

Al igual que ocurre con los suelos, la teoría del potencial hídrico se puede aplicar al agua que contienen las plantas en sus diferentes órganos, de acuerdo con (2) el agua de las plantas es sometida a un potencial que es la suma de cuatro componentes. Los potenciales gravimétrico, mátrico y osmótico tiene el mismo significado que en el caso del suelo, el potencial de presión solo se manifiesta en la presencia de una membrana

semipermeable, lo cual se presenta en la absorción del agua del suelo por parte de las raíces; en el estado de marchitez total el potencial de presión es nulo.

Los componentes del potencial presentan magnitudes diferentes en los distintos órganos de la planta. El potencial gravimétrico es despreciable salvo en el caso de árboles muy altos. El potencial mátrico siempre es negativo y de magnitud reducida en la mayoría de las plantas cultivadas, solamente. El potencial osmótico es igualmente negativo y cuando se manifiesta obliga a aplicar una energía extra para la extracción del agua. El potencial de presión puede ser positivo (turgencia o nulo (marchitez)).

### **I.3.2.- Movimiento del agua en las plantas**

Según Pizarro (2000), en su recorrido a través de la planta, el agua se dirige desde el suelo hasta la atmósfera. La última fase del movimiento se produce en los estomas de las hojas, donde el agua en estado líquido pasa al estado gaseoso saliendo a la atmósfera exterior. En los estomas, por tanto, se produce una especie de bombeo que eleva el agua desde el suelo a través de las raíces, el xilema y las hojas. Ninguna bomba mecánica es capaz de aspirar agua a más de 10 m de altura. Como las plantas son capaces de hacerlo a alturas que en algunos casos superan los 100 m con caudales diarios de centenares de litros.

Aunque el movimiento del agua en el suelo es un proceso único y lo que afecta a una de sus fases ejerce una acción indirecta sobre las demás, de forma directa el riego solo interviene en la absorción de agua, modificando el potencial hídrico en el suelo y lo que más interesa es su relación con el momento óptimo para aplicar el riego.

### **I.3.3.- Déficit hídrico en las plantas**

Algunos autores afirman que el déficit hídrico en la planta se produce cuando la transpiración de agua supera a la absorción, pero en realidad el déficit se produce siempre que hay movimiento ascendente del agua, aunque los caudales transpirados sean iguales que los absorbidos; ya que el agua en su movimiento debe vencer resistencias y por lo tanto a lo largo de su recorrido se presentan diferencias de potencial. Cuando el potencial en un punto cualquiera del xilema es menor que el de los órganos vecinos se produce una transferencia de agua hacia el xilema desde esos órganos, en

los cuales se puede provocar déficit hídrico y como el potencial es menor en las zonas más altas de las plantas, el déficit hídrico se produce más fácil en esas zonas.

El déficit hídrico es un mal inevitable consecuencia en último término de la transpiración, su efecto es el de retrasar y alterar el crecimiento y desarrollo de las plantas y por ende disminuir su rendimiento. Todos los cultivos tiene un período crítico en el que los efectos del déficit hídrico son más pronunciados, en general: *en la floración, el cuajado y los primeros estados del crecimiento.*

#### **I.3.4.- Momento óptimo de riego**

La determinación del momento óptimo del riego es un asunto importante a tener en cuenta durante el diseño y manejo de los sistemas de riego, desde el punto de vista del diseño el momento óptimo del riego determina la dosis, la duración y la frecuencia entre riegos, los cuales a su vez condicionan el diámetros de las redes de tuberías y las prestaciones de la instalación de bombeo y la fuente de abasto. Tradicionalmente este momento se definía como aquel en que la humedad en el suelo representa  $1/3$  del agua útil, es decir que el riego se debe aplicar cuando se ha consumido la tercera parte del agua almacenada y quedan en el suelo  $2/3$  de la misma. Este criterio adolece de varios defectos, de forma resumida se puede afirmar que:

1. No tiene en cuenta el tipo de cultivo y éstos no responden de igual a forma a los mismos contenidos de humedad, de hecho no todos tienen la misma resistencia a la sequía.
2. Tampoco considera que a igualdad de contenido de humedad en el suelo, éstos retienen el agua con distinta energía, esto infiere que la relación entre el Contenido de Humedad vs el Potencial Mátrico también es diferente para cada tipo de suelo, tanto como es diferente la facilidad con que las raíces pueden extraer el agua del suelo y lo que importa no es el volumen ocupado por esa agua sino la energía con que es retenida por el suelo.
3. Por último, este criterio tampoco tiene en cuenta la salinidad presente en el suelo y por tanto el trabajo metabólico extra que deben realizar las plantas para vencer el efecto osmótico que limita el poder de absorción de las raíces.

Por estas razones el momento óptimo del riego debe definirse en términos de potencial hídrico y no de contenidos de humedad, aunque la relación entre el potencial y el contenido de humedad sea necesaria posteriormente para el cálculo de la dosis, frecuencia y duración de los riegos.

La tabla No.3 muestra los valores de potencial hídrico para varios cultivos, es decir los valores del potencial hídrico del suelo que no se deben superar para que no se produzca una disminución inaceptable de los rendimientos, estos valores se pueden considerar por lo tanto como los potenciales hídricos óptimos de riego para los distintos cultivos.

**Tabla No. 3.-** Potencial hídrico óptimo de riego (valores negativos en bares). Taylor et al (1972).

Aguacate	0.50	Flores	0.1 – 0.5	Pepino	1 – 3
Alfalfa	0.8 – 1.5*	Fresas	0.2 – 0.3	Remolacha azucarera	0.6 – 0.8
Algodón	1 – 3	Frutas caedizas	0.5 – 0.8	Soja	0.5 – 1.5
Apio	0.2 – 0.3	Gramíneas	0.4 – 1	Sorgo	0.6 – 1.3*
Arroz	Saturación	Guisantes	0.3 – 0.8	Tabaco temprano	0.3 – 0.8
Banana	0.3 – 1.5*	Judías	0.6 – 1	Tabaco tardío	0.8 – 2.5
Caña de azúcar	0.8 – 1.5*	Lechuga	0.4 – 0.6	Trébol	0.3 – 0.6
Cártamo	1 – 2*	Limón	0.4	Trigo	0.8 – 1.5
Cebolla verde	0.45 – 0.65	Maíz	0.5 – 1.5*	Trigo (maduración)	3 – 4
Cebolla seca	0.55 – 0.65	Melón	0.35 – 0.4	Vid	0.4 – 1
Cereales secundarios	0.4 – 1*	Naranjos	0.2 – 1	Zanahoria	0.55 – 0.65
Col	0.6 – 0.7	Patatas	0.3 – 0.5		

#### **I-4.- Necesidades de agua para cultivos bajo riego localizado de alta frecuencia.**

Una de las ventajas que se les reconoce a los sistemas de RLAF es el ahorro de agua, los mayores ahorros se consiguen con plantaciones de árboles jóvenes; que es cuando la relación entre el área de la sombra que cubre la proyección vertical de la copa a

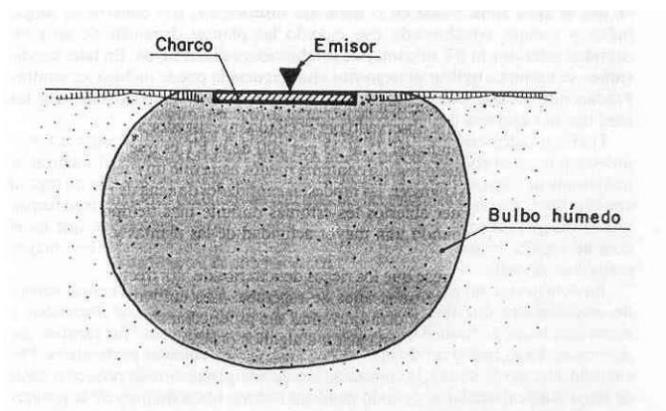
mediodía en el solsticio de verano y el área del marco de siembra alcanza valores reducidos, a medida que los árboles crecen el consumo se va aproximando al de los riego convencionales; En cultivos sembrados en hileras como las hortalizas la disminución de la ETc con riego localizado es prácticamente despreciable en comparación con los métodos convencionales o tradicionales de riego.

Se puede afirmar que con los sistemas de RLAF hay importantes ahorros de agua por concepto de pérdidas por percolación, escorrentía superficial y evaporación, ciertos ahorros en el caso de plantaciones jóvenes de árboles y que prácticamente no se ahorra agua en debido a la siembra de cultivos en hilera.

#### **I.4.1.- Efectos de la localización y de la alta frecuencia**

La localización consiste en que solo se humedece una parte del volumen de suelo y se pretende que las raíces obtengan de ese volumen el agua y los nutrientes que necesitan, el resto del suelo prácticamente no se aprovecha. El efecto de la localización se manifiesta en modificar la evaporación y la transpiración, y en la distribución de las raíces en un régimen especial de sales. Este efecto casi obliga a que el riego se aplique con alta frecuencia, debido a que el volumen de suelo humedecido es reducido y por tanto la capacidad de almacenamiento considerada es baja por lo que se deben aplicar dosis de riego reducidas y para satisfacer las necesidades de los cultivos con estas pequeñas dosis, se deben aplicar con alta frecuencia. A su vez la alta frecuencia del riego tiene unas consecuencias importantes en el régimen de humedad: *el suelo se mantiene constantemente a una humedad elevada lo que afecta la concentración de sales y la aireación.*

#### **I.4.2.- Bulbo húmedo en riego localizado**



**Figura I.10** Bulbo húmedo en riego localizado, Pizarro (2000).

Se denomina bulbo húmedo a la parte del suelo humedecida por un emisor de riego localizado, a pesar de estos emisores entregan caudales pequeños, cuando el agua comienza a fluir sobre una superficie muy reducida del suelo provoca un pequeño charco como el de la figura I.10 que se muestra, y cuyo radio se va extendiendo a medida que el riego continua.

Cuanto más húmedo va estando el suelo, la velocidad de infiltración disminuye, ya que aunque la conductividad hidráulica aumenta al aproximarse a la saturación, el gradiente de potencial disminuye en una proporción mayor. Esta disminución de la velocidad de infiltración favorece el incremento del radio del bulbo y cuando la pluviometría del emisor se iguala a la velocidad de infiltración el bulbo de humedecimiento se estabiliza.

A partir de ese bulbo húmedo el agua se distribuye por los poros vecinos cuya humedad es menor. El potencial de esta zona no saturada está compuesto por el ( $P_G$ ) y el ( $P_M$ ) y ya se ha visto que cuando el contenido de humedad es bajo el ( $P_M$ ) tiene una magnitud mayor en valor absoluto al ( $P_G$ ), el cual solo tiene lugar cuando se supera cierta humedad en la solución del suelo. La acción combinada de las fuerzas mátricas y gravimétricas origina la forma característica del bulbo húmedo.

#### **I.4.3.- Factores que afectan la forma del bulbo húmedo**

1. Textura del suelo: En los suelos pesados la velocidad de infiltración es menor que en los ligeros, lo que hace que el radio del charco sea mayor. Esta es una primera razón para que el bulbo se extienda más horizontalmente. Pero sobre todo, el mayor porcentaje de microporos de los suelos pesados hace que las fuerzas mátricas dominen sobre las gravitacionales en una mayor gama de humedad que en el caso de los suelos ligeros, y en consecuencia la redistribución horizontal es más intensa en aquellos.
2. Estratificación: Los suelos uniformes solo se encuentran en los ejemplos de los libros. En la naturaleza lo normal es que se presenten estratos de distinta porosidad, lo que afecta al flujo y a la retención de agua, y en consecuencia al bulbo húmedo. Cuando el frente húmedo alcanza un estrato diferente, este se comporta inicialmente como una barrera al avance de agua, aunque el estrato sea más permeable que el suelo situado encima de él.

3. Caudal del emisor: Si el caudal del emisor se mantiene constante, la extensión superficial del bulbo no varía mucho con el tiempo, o lo que es lo mismo con el volumen de agua aplicado, y algo parecido ocurre con la extensión horizontal subterránea del bulbo. Para un mismo tiempo de riego, o para un mismo volumen de agua cuando mayor es el caudal del emisor, mayor es la extensión horizontal del bulbo.
4. Tiempo de riego: A medida que pasa el tiempo, el bulbo se va desarrollando en profundidad un tiempo. Un tiempo excesivo de riego hace que el agua se pierda por percolación.

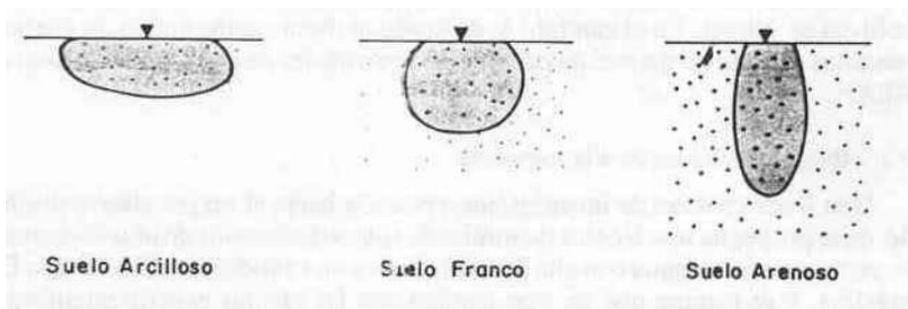
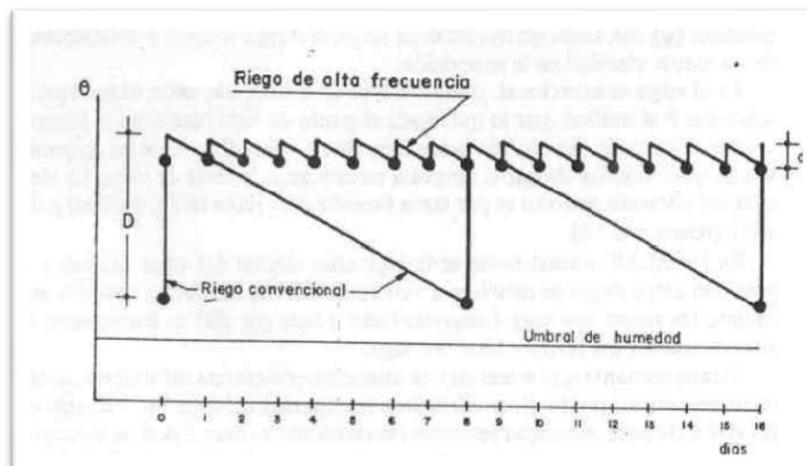


Figura I.10 Efecto de la textura en la forma del bulbo húmedo, Pizarro (2000).

#### I.4.4.- Rendimiento de los cultivos contra el régimen de humedad

En una metáfora muy divulgada, se denomina bulbo húmedo a la parte del suelo humedecida por un emisor de riego localizado. Veamos cómo se crea el bulbo húmedo y los factores que afectan su forma. La explicación se hace para el caso de un emisor puntual, cuando el emisor es del tipo de una larga cinta porosa, el suelo humedecido es un cilindro cuya sección toma la forma del bulbo húmedo.



**Figura I.11** Aplicación de un riego, Pizarro (2000)

### **I-5.- Conclusiones parciales**

1. En los sistemas de riego por goteo, el agua circula a presión por la instalación hasta llegar a los goteros, en los que se pierde presión y velocidad, saliendo gota a gota. Tienen como principal inconveniente el riesgo de obstrucción de los goteros, la dificultad de detectar fallos en el funcionamiento de estos, así como su reparación.
2. En Cuba el riego por goteo fue instalado primero en parcelas experimentales y luego en áreas de empresas agrícolas estatales, en las cuales contribuyó al incremento de la producción y al ahorro del agua.
3. Se consideran entre una de sus características fundamentales, la localización y la alta frecuencia. Debido a esto los sistemas RLAF pueden aumentar las producciones en suelos arenosos o poco profundos con relación a los métodos convencionales de riego, esto se justifica en el hecho de que es posible mantener un régimen de humedad adecuado en el suelo sin elevar excesivamente el costo de las operaciones.
4. Los contenidos que abordan el flujo de agua en suelos no saturados, permiten calcular en el caso de los riegos localizados las dimensiones del bulbo húmedo, es decir el volumen de suelo mojado por el emisor de riego y en función de esas dimensiones diseñar partes componentes de la instalación (número de emisores por planta, la separación entre estos, la duración y la dosis de riego).
5. La utilización de modelos matemáticos con propósitos de diseño enfrenta la dificultad de que las ecuaciones a que se llega no son de fácil integración y las condiciones límites son difíciles de establecer. Además los parámetros que describen las características del suelo son difíciles de medir.
6. La utilización de tablas empíricas con propósitos de diseño enfrenta la dificultad de que los datos de partida en muy pocas ocasiones coinciden con los propios de los escenarios de los diferentes diseños.
7. En la actualidad la mejor forma de estimar estos parámetros lo parámetros de diseño de sistemas de riego por goteo, es por medio de las pruebas de campo. Sin embargo, a pesar de su simplicidad, su realización se dificulta por razones prácticas.

## **II.-MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **II.1.Descripción de los componentes de la relación AGUA – SUELO – PLANTA – CLIMA y los agregados de riego.**

#### **FUENTE DE ABASTO:**

La fuente de abasto se considera apta para el riego del cultivo propuesto. Como medida de la salinidad del agua de riego se conoce que la conductividad eléctrica es 0.8 dS/m.

#### **DATOS DEL SUELO:**

Textura: entre media y pesada.

Grado de estratificación: entre homogéneo y estratificado

Profundidad: 0.75 – 1.5 m

Capacidad de campo: 43 %

Punto de marchitamiento: 8.6 %

CEes: 1.7 dS/m

Pendiente:

Superficie a regar: 11 Ha

Porosidad del suelo: 48 %

Humedad volumétrica: 20 %

Potencial mátrico del suelo: - 0.53 bar

#### **DATOS DEL CULTIVO:**

Variedad: Naranja valencia

Marco de siembra: 6 x 4

Profundidad radicular: 1.10 m

Altura del cultivo: 3 m

Diámetro de la copa: 4 m

Coefficiente de cultivo: 0.7

Coefficiente de localización del riego: 0.67

#### **DATOS CLIMÁTICOS:**

Evapotranspiración del cultivo de referencia: 6.51 mm/d

Coefficiente de advección: 0.9

Coefficiente de variabilidad climática: 1.2

## **CARACTERÍSTICAS DEL EMISOR**

Tipo o marca del emisor: Autocompensante.

Caudal del emisor, de presión trabajo: = 4 L/h.

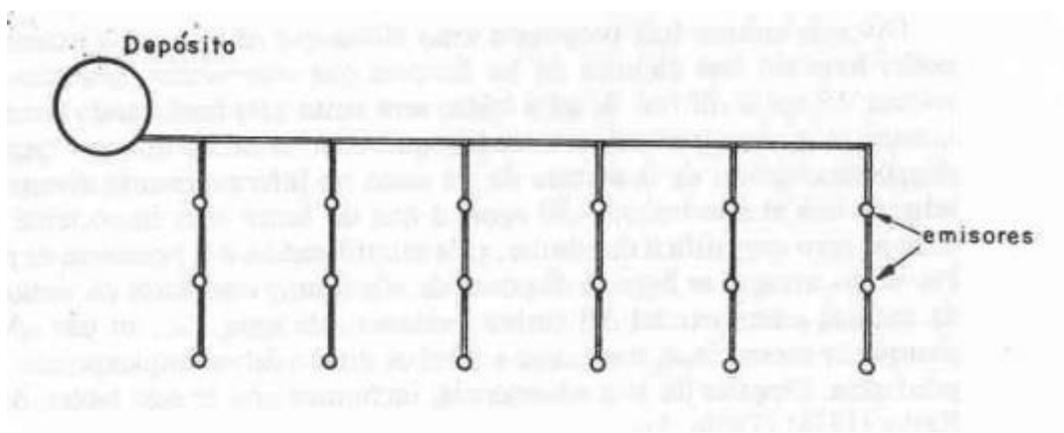
Rango de compensación: 5-30

Porcentaje de humedecimiento mínimo: 33%

## **II.2.Procedimientos para el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo**

### **II.2.1.- Dosis, frecuencia y duración de los riego utilizando los datos de la prueba de campo**

Para realizar las pruebas de campo es necesario tener una idea aproximada de la dosis de riego y del caudal de los emisores a utilizar. Los emisores todos iguales, se instalan en grupos de tres y se hace que cada grupo emita un distinto volumen de agua por emisor ( $V_e$ ), variando el tiempo de riego. El hecho de que haya tres emisores de riego para cada grupo de  $V_e$  es para hallar valores medios. Hay que tomar la precaución de espaciar suficientemente los emisores, para que no se produzcan solapes en los bulbos húmedos. Una vez aplicados los volúmenes, o preferiblemente después de varios ciclos de humedecimiento y secado, se excava el terreno anotando para cada caso el radio ( $r$ ) y la profundidad ( $p$ ) del bulbo húmedo, lo que permitirá confeccionar una tabla realizar los siguientes cálculos



**Figura II.12** esquema de la prueba de campo, Pizarro (2000).

### **Significado de los parámetros que intervienen en el procedimiento.**

Nt.- Necesidades totales (L/planta/día).

D.- Dosis de riego (l/planta).

- I.- Intervalo entre riego (días).
- Sp.- Área del marco de plantación (m<sup>2</sup>).
- PHmín.- Porcentaje mínimo de superficie mojada (%).
- Ae.- Área mojada por emisor (m<sup>2</sup>)
- e.- Número de emisores por planta (u).
- Ve.- Volumen que entrega el emisor (L).
- Qa.- Caudal medio que entrega el emisor (L/h).
- Tr.- Duración del riego en la parcela (h).
- p.- Profundidad del bulbo húmedo (m).
- Re.- Radio del bulbo húmedo (m).
- Pr.- Profundidad de ramificación densa (m).

1. Determinación de las necesidades netas puntas [Nn (mm/d)].

$$Nn = ETo \times Kc \times Kl \times Kvc \times Ka \quad (7)$$

La estimación del valor del coeficiente bioclimático del cultivo (Kc) se realiza de acuerdo a lo propuesto por Allen et al (1998), en el mismo se establece que se debe estimar el coeficiente de cultivo para cada fase del ciclo vegetativo y utilizar para el diseño el valor mayor, en ese sentido para la fase inicial (Kc<sub>ini</sub>) la estimación parte de asumir la dosis de riego a aplicar; para  $Dr \leq 10$  (mm) el valor de Kc<sub>ini</sub> se obtiene gráficamente en función de la ETo (mm) y la frecuencia de humedecimiento (días); no depende de la textura del suelo, pero para el diseño de sistemas de riego donde se humedece una fracción del área vital del cultivo, se debe tener en cuenta el porcentaje de humedecimiento ( $f_w$ ) con relación al área del marco de plantación; en estos casos la solución se realiza de forma analítica en función del cociente de la dosis de riego y el  $f_w$ , la velocidad del viento y del valor de los coeficientes iniciales de las otras fases del ciclo vegetativo obtenido gráficamente según Allen et al (1998), y en función de la textura del suelo.

Para la fase media y final la estimación de los coeficientes de cultivo correspondientes está en función de la altura del cultivo (m) la humedad relativa mínima (%) y la velocidad del viento (m/s). Luego de ser calculadas las etapas del coeficiente de cultivo, se escoge el mayor valor entre ellas. En este Trabajo de Diploma se asumió como el valor definitivo de  $Kc = 0.7$ , correspondiente a la fase media.

En el caso de los sistemas de riego localizado de alta frecuencia, el valor de la evapotranspiración del cultivo se debe afectar por diferentes coeficientes que inciden en el consumo de la planta y por tanto en el crecimiento y desarrollo del cultivo. El coeficiente de variabilidad climática se puede estimar entre 1.15 y 1.2 de acuerdo con (Hernández Abreu, 1987), se asumió como valor definitivo  $K_{vc} = 1.20$ . El otro coeficiente depende de la localización del riego, se siguió el criterio de la fracción del área sombreada por el cultivo, la cual se define de acuerdo con Pizarro (2000) como la fracción de la superficie del suelo sombreada por la cubierta vegetal a mediodía en el solsticio de verano, respecto a la superficie total. De acuerdo con esto, se estimó un  $K_I = 0.67$ . Las necesidades netas de agua se consideran por tanto las debidas a la evapotranspiración del cultivo (ETc).

2. Necesidades totales [Nt (L/p)].

Las necesidades totales tienen en cuenta las necesidades de lavado y la eficiencia de riego, de estos dos parámetros se asume como el más exigente el riesgo de salinidad debido a que por las características del manejo de riego con esta alternativa son más proclives los riesgos de salinidad que los riesgos de pérdidas de agua útil para el cultivo por infiltración o por evaporación. Este parámetro puede estimar por:

$$N_t = N_n / (1 - K) C_u x S_p \quad (8)$$

$C_u$ - es el coeficiente de uniformidad de distribución de los caudales (%), se impone el valor de 90% para el diseño de sistemas de riego por goteo por sugerencia de la FAO para las condiciones de Cuba y  $K$  don en este caso las necesidades de lavado. En el ejemplo:

$$K = \frac{C_{Ear}}{2 \times C_{Ees}} \quad (9)$$

Donde:

$C_{Ear}$  – conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m)

$C_{Ees}$  – conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (dS/m), valor que se impone como objetivo a conseguir con el lavado y que depende de los cultivos a implantar.

3.  $0.9pr < p > 1.2pr \quad (10)$

Esta fórmula establece unos límites a la profundidad del bulbo húmedo, de forma que para determinados valores de (p) corresponden un número de emisores por planta y el

porcentaje adecuado de superficie humedecida y garantiza que el área mojada por todos los emisores que riegan una misma planta sea mayor que las necesidades mínimas definidas por P, para el ejemplo se asumió una profundidad radicular = 1.10 m

4. Área mojada por el emisor (Ae).

$$Ae = \pi Re^2. \quad (11)$$

Donde:

Re- es el radio que humedece el gotero y que se obtiene a través de las pruebas de campo o por medio de las tablas propuestas por (Keller, 1987), citado por (Pizarro F. , 1987).

5. El número mínimo de emisores por planta se puede estimar a partir de:

$$e \geq \frac{Sp \times PHm}{100 \times Ae} \quad (12)$$

Donde:

Sp. – Área del marco de plantación (m<sup>2</sup>), se tomó para el ejemplo 24 m<sup>2</sup>.

PH mín.- Porcentaje de humedecimiento mínimo, (Keller, 1987) citado por (Pizarro, 2000) propone un rango de estimación entre el 20 - 35%, por sugerencias del IIRD (Torralba, 1990) propone para las condiciones de Cuba un rango entre 25 y 30 %. Para el ejemplo = 33 %.

6. Tiempo de riego (h). Como el volumen aplicado por el gotero (Ve) debe ser ≥ que las necesidades totales (Nt), la duración del riego se puede determinar por:

$$Tr = \frac{Nt}{e \times qa} \quad (13)$$

Donde:

qa- caudal que emite un emisor (L/h).

7. Dosis de riego (L)

$$Dr = Tr \times e \times qa. \quad (14)$$

10- Comprobaciones

$$Dr \geq Nt \quad PHr \geq PHm$$

## II.2.2.- Dosis, frecuencia y duración de los riego por medio de tablas

Diversos autores han propuesto unas tablas que relacionan la extensión del bulbo húmedo con algunos de los factores que intervienen en su estimación. Aplicando una de estas tablas; en este caso la propuesta por Keller (1978) por ser a diferencia de la tabla

No. 2 propuesta por Arapa (2000); de las que más parámetros tiene en cuenta. El procedimiento para el diseño es esencialmente el mismo, la diferencia es que el valor de (Re) se asume en función de la Textura del suelo, del grado de estratificación del mismo y de la profundidad de las raíces del cultivo a beneficiar. Se utiliza esta tabla ya que fue obtenida para un emisor de goteo de 4 L/h, esto permite mayor coherencia en la comparación entre variantes. En el ejemplo el valor del radio que humedece el emisor se obtiene por interpolación.  $Re = 0.625 \text{ m}$ .

**Tabla No.4.-** Diámetro mojado por un emisor de 4 L/h, Keller (1978).

Profundidad de raíces y textura del suelo.	Grado de estratificación del suelo		
	Homogéneo	Estratificado	En capas
	Diámetro mojado (m)		
<u>PROFUNDIDAD = 0.80m</u>			
Ligera	0.50	0.80	1.10
Media	1.00	1.25	1.70
Pesada	1.10	1.70	2.00
<u>PROFUNDIDAD = 1.70m</u>			
Ligera	0.80	1.50	2.00
Media	1.25	2.25	3.00
Pesada	1.70	2.00	2.50

### **II.2.3.- Dosis, frecuencia y duración de los riego a través de la variante alternativa**

En esta variante para el diseño, no se tiene en cuenta el análisis de los parámetros que consideran la forma y dimensiones de los bulbos de humedecimiento que se generan con la aplicación del riego, así como su compatibilidad con las características del cultivo a beneficiar. El procedimiento de diseño tiene en cuenta los dos primeros pasos, pero la dosis de riego se obtiene a partir del número de plantas por hilera y de las necesidades totales de agua de la planta. Luego a partir de la longitud del lateral y de la separación entre goteros a lo largo del mismo es posible conocer el caudal que se entrega a toda la hilera de plantas. Con este parámetro y su volumen equivalente se encuentra la duración del riego que implique que este volumen sea al menos igual que las necesidades totales

de la planta ( $V_e \geq N_t$ ). En consecuencia el número de emisores necesarios para satisfacer las necesidades totales de agua de la planta, se deduce directamente de las necesidades de agua a lo largo de la hilera de plantas, a partir del caudal nominal o de diseño del mismo y el número de plantas en la hilera. Previendo entregar el volumen de agua necesario para cada planta en función de asumir la duración del riego conveniente para este propósito; contrario a como se ha establecido en la práctica del diseño, en la que la duración del riego se obtiene en función de las necesidades totales de agua, la relación suelo – planta y en consecuencia el caudal instalado por planta. En esta variante, la duración y la frecuencia de riego se asumen a conveniencia de la explotación del riego, previendo entregar la dosis necesaria en cada lateral de riego.

#### **II.2.4.- Dosis, frecuencia y duración de los riego a través del punto óptimo del riego**

La determinación del punto óptimo de riego es una cuestión muy importante en el manejo del riego y en el proyecto de las instalaciones. Desde el punto de vista de la ingeniería, este determina la dosis de agua y el intervalo de riego, los cuales condicionan la capacidad de las redes de conducción del agua, instalaciones de bombeo y almacenamiento, etc.

Tradicionalmente el punto óptimo de riego se definía como aquel en que la humedad del suelo representa una determinada fracción del agua útil de la zona radicular, pero la práctica ha demostrado que el punto óptimo debe definirse en términos de potencial hídrico y no de contenido de humedad, aunque esta relación sea necesaria para determinar la frecuencia y la dosis de riego.

El procedimiento parte de conocer el potencial óptimo ( $\psi_o$ ) del cultivo a beneficiar; para la comparación se utilizará la misma variedad de cultivo y los datos básicos previstos en el epígrafe **II.1.1**, en este caso se asume  $\psi_o = -1$  Bar, tomado de la tabla No.3. A los efectos del diseño también es necesario calcular la dosis y el intervalo entre riegos para lo cual es necesario además conocer la relación potencial osmótico y potencial mátrico – humedad ( $\psi_o$  vs  $\theta$ ;  $\psi_m$  vs  $\theta$ ), esta última constituye un dato a aportar por la tarea de proyección y el potencial osmótico se puede estimar por medio de:

$$\psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEes \quad (15)$$

Donde:

$\varepsilon$ .- Porosidad del suelo (%).

$\theta v$ .- Humedad volumétrica (%).

Para el ejemplo la relación ( $\psi m$  vs  $\theta$ ), se puede estimar por la siguiente tabla

$\theta v$ (%V)	$\psi m$ (bar)	$\psi o$ (bar)	$\psi$ (bar)
23	-0.58	-0.48	1.06
24	- 0.53	-0.46	0.99
25	-0.48	-0.44	0.92

En la cual  $\psi = \psi m + \psi o$ , este valor se corresponde con el contenido de humedad en el suelo ( $\theta v$ ), que es el parámetro que permite estimar la dosis de riego por medio de:

$$Dr = Prad \times \frac{CC - \theta v}{100} \quad (16)$$

Y la frecuencia de riego por medio de:

$$IR = \frac{Dr}{ETc} \quad (17)$$

### **II.2.5.- Dosis, frecuencia y duración de los riego a través del software de riego localizado**

Para el diseño agronómico a través del software de riego localizado el procedimiento se realiza de dos formas diferentes. Una de ellas utiliza los resultados obtenidos en la prueba de campo por lo tanto tiene en cuenta los pasos seguidos en el epígrafe **II.2.1**. La otra variante de diseño que tiene implementada el programa es a partir de ecuaciones empíricas propuestas por Arapa (2002) publicadas en el Manual de usuario del programa RIEGOLOC, las cuales fueron relacionadas en el epígrafe **I.2.4** de este informe de tesis, las mismas permiten estimar el radio de alcance del emisor de goteo de acuerdo a la textura del suelo y a la descarga del emisor (L/h). Interpolando entre las ecuaciones **(3)** y **(4)** se tomó para el ejemplo un radio de humedecimientos del emisor ( $Re = 0.75$ ). Los resultados del diseño siguiendo este procedimiento se comparan con los resultados de las variantes analizadas anteriormente y se comentan en el capítulo tercero del informe.

### III. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

#### III.1.1- Dosis, frecuencia y duración del riego utilizando los resultados de la prueba de campo

De acuerdo con el procedimiento propuesto por Hernández Abreu, citado por Pizarro (2000). Una vez estimadas las necesidades totales puntas del cultivo a beneficiar, los resultados de la prueba de campo se acomodan en la siguiente tabla para encontrar los parámetros más apropiados para determinar el número de emisores por planta que garantice el porcentaje mínimo de la superficie humedecida. De acuerdo con **(7)**. Las necesidades netas puntas. Resultaron:  $Nn = 3.29 \text{ mm/d}$

Para prever los posibles efectos perjudiciales del incremento de la salinidad se deberá programar un lavado de mantenimiento a través del riego, esto implica incrementar la dosis de riego con cierto valor que se conoce como dosis de lavado, la cual se determinó según **(8)**:  $Nt = 4.81 \text{ mm/d}$ , equivalentes a 115.44 L/p/d

A partir de la profundidad de ramificación densa del cultivo = 1.10 m se comprueba por medio **(10)**, la profundidad que alcanza el bulbo de humedecimiento durante la prueba de campo, ya que a partir de esto valores se asume el radio húmedo que alcanza el gotero, así como el volumen de agua que entrega en esas condiciones. En la tabla que se muestra seguidamente se resaltan los valores próximos a estas condiciones.

Ve(L)	r(m)	p(m)
4	0.25	0.30
8	0.33	0.39
12	0.40	0.50
16	0.59	0.63
20	0.76	0.69
24	0.80	0.90
28	0.83	1.05
<b>32</b>	<b>0.86</b>	<b>1.22</b>
36	0.90	1.40
40	0.91	1.60

Asumiendo una profundidad = 1.22 m, el radio del emisor = 0.86 m y volumen que entrega el emisor = 32 L; la superficie humedecida por emisor se estima por **(11)**

$A_e = 2.32 \text{ m}^2$ . Este parámetro permite determinar el número de emisores por planta necesarios para garantizar el porcentaje de humedecimiento mínimo (para el ejemplo PHmín = 33 %).

$e \geq 3.41 = 4$  goteros/planta.

Como a los efectos de la comparación, la frecuencia de riego se asumió diaria para todas las variantes, el volumen que humedece un gotero se puede comprobar por:

$V_e = \frac{I \times Nt}{e} = \frac{115.44}{4} = 28.86 \text{ litros}$ . En la tabla de resultados de la prueba, hay un valor muy parecido  $V_e = 28.1 \text{ L}$ , el cual se corresponde con un radio de humedecimiento = 0.83 m y una profundidad de =1.05 m, para estos parámetros el área que humedece el emisor resultó:  $A_e = \pi r^2 = 2.16 \text{ m}^2$ . Por lo tanto el porcentaje real de humedecimiento se comprueba por:  $P = \frac{100 \times e \times A_e}{S_p} = \frac{100 \times 4 \times 2.16}{24} = 36\%$  que no es mucho mayor que el 33 %

asumido inicialmente, el exceso de agua se debe al aproximar por exceso el número de emisores, pero esta situación es viable de solucionar pronosticando el riego en función de su duración, los resultados permiten asegurar que esta solución es aceptable. La duración del riego sería:  $Tr = 7.22 \text{ horas}$ , la duración del riego se redondea por exceso en fracción de 0.25 horas, por ello se toma  $Tr = 7 \text{ horas y } 15 \text{ minutos}$ . Siendo así la dosis de riego definitiva se obtiene por **(14)**  $Dr = Tr \times e \times qa = 116 \text{ L/planta}$  la cual es mayor que las necesidades totales por lo tanto se cumple la principal restricción del diseño agronómico.

### III.1.2- Dosis, frecuencia y duración del riego por medio de tablas

En este caso, al igual que en todas las variantes, las necesidades de agua de la planta se obtienen por medio de **(7)** y **(8)** respectivamente:

$$Nn = 3.29 \text{ mm/d}$$

$$Nt = 4.81 \text{ mm/d} \equiv 115.44 \text{ L/p/d}$$

Como no se realiza la prueba de campo, el valor del radio que humedece el emisor se obtuvo por interpolación de la tabla No.4.  $Re = 0.625 \text{ m}$ . así el área que humedece el emisor sería:  $A_e = \pi r^2 = 1.23 \text{ m}^2$  y el número de emisores por planta se obtiene igual

que en el caso anterior:  $e = \frac{Sp \times P}{100 \times Ae} = \frac{24 \times 33}{100 \times 1.23} = 6.4$ , asumiendo 7 emisores por planta, cada una de ellas recibiría 28 L/hora. Para una frecuencia de riego diaria, la duración del riego se estima igualmente por **(13)**  $Tr = 4.13h$ , al aproximarlos igualmente en cuartos de hora resultarían 4 horas y 15 minutos. Siendo así la dosis de riego definitiva obtenida por **(14)** sería = 119 L/p diarios.

### III.1.3 - Dosis, frecuencia y duración del riego utilizando la variante alternativa

Las necesidades de agua de la planta se obtienen igualmente por medio de **(7)** y **(8)** respectivamente:

$$Nn = 3.29 \text{ mm/d}$$

$$Nt = 4.81 \text{ mm/d} \equiv 115.44 \text{ L/p/d}$$

Como la dosis definitiva y la duración del riego se obtienen a partir del número de plantas a lo largo de la hilera y de las necesidades totales de agua de cada una, la longitud que alcanzará el lateral y la separación entre goteros a lo largo del mismo son parámetros importantes a considerar en el diseño. A partir de ellos es posible conocer el caudal que se entrega a toda la hilera de plantas. Esta variante se ha generalizado en las Empresas de Consultoría y Diseño de la ENPA ante la imposibilidad práctica de realizar las pruebas de campo de forma oportuna. Para hacer más real la comparación entre las variantes, se mantuvieron los datos de partida iniciales y se asumió como longitud de la parcela 150 m y la separación entre emisores a lo largo del lateral = 0.6 m; que son valores usualmente utilizados en los diseños de estos sistemas de riego. De esta forma se obtuvieron 38 plantas a lo largo de la hilera, lo cual conlleva a aplicar en el lateral 4386.72 litros, para ello se utilizarán 247 emisores espaciados cada 0.6 m. la duración del riego resultó 4.45 horas para entregar una dosis de riego definitiva = 115.7 L/p  $\approx$  115.44 L/p.

### III.1.4- Dosis, frecuencia y duración del riego considerando el punto óptimo de riego

El potencial osmótico se determinó por medio de:

$\psi_o = \frac{\varepsilon}{\theta_v} \times 0.36 \times CEes = \frac{48}{20} \times 0.36 \times 1.7 = -1.469 \text{ bar}$ , al añadir este valor al potencial mátrico del suelo, el potencial hídrico óptimo o potencial óptimo de la Naranja resultó ( $\psi = -2 \text{ bar}$ ). Al comparar este valor con el rango que establecen los autores como el umbral mínimo permisible, por encima del cual la producción de los cultivos se resiente tabla No.3; Se comprueba que está fuera de los límites permisibles, por lo tanto habría que

aplicar una dosis de riego extra, tal que aumente significativamente la humedad o disminuyera la salinidad en la solución del suelo hasta valores aceptables. La solución podría estar en aumentar el contenido de humedad un valor mucho mayor que el 30 % V el cual se corresponde con un potencial hídrico de -1.5 bar; valor que aún resulta insuficiente.

Para un contenido de humedad en el suelo ( $\theta v = 30\%$ ), la dosis de riego se puede estimar por medio de:

$$Dr = Prad \times \frac{CC - \theta v}{100} = 110 \times \frac{43 - 30}{100} = 14.3 \text{ mm}$$

y la frecuencia de riego por medio de:

$$IR = \frac{Dr}{ETc} = \frac{14.3}{6.51} = 2.2 \approx 2 \text{ días}$$

### III.1.5.- Dosis, frecuencia y duración del riego utilizando los procedimientos del software RIEGOLOC.

Para el diseño agronómico a través del software de riego localizado el procedimiento que utiliza los resultados obtenidos en la prueba de campo no presentan diferencias significativas con los obtenidos en III.1.1. En este sentido, interesa para la comparación, la variante de diseño que tiene implementada el programa a partir de las ecuaciones empíricas propuestas por Arapa (2002), como ya se ha explicado, las mismas permiten estimar el radio de alcance del emisor de goteo de acuerdo a la textura del suelo y a la descarga del emisor (L/h). Interpolando entre las ecuaciones (3) y (4) se tomó para el ejemplo un radio de humedecimiento del emisor ( $Re = 0.75$ ). Los resultados del diseño muestran que:

De acuerdo con (7). Las necesidades netas puntas. Resultaron:  $Nn = 3.29 \text{ mm/d}$ , según (8):  $Nt = 4.81 \text{ mm/d}$ , equivalentes a 115.44 L/p/d, el radio de humedecimiento calculado para el gotero conlleva a que el área de humedecimiento sea = 1.78 m<sup>2</sup>, luego el número de emisores por planta  $e = 4.45 \approx 5$  emisores. Esto conlleva a que el volumen de agua que entrega el emisor se obtenga por:  $Ve = \frac{I \times Nt}{e} = 23.09 \text{ Litros}$ . Por lo tanto el porcentaje real de humedecimiento se comprueba por:  $P = \frac{100 \times e \times Ao}{Sp} = 37.09\%$ . Los resultados permiten determinar la duración del riego:  $Tr = 5.772 \approx 6 \text{ horas}$ , siendo así la dosis de riego definitiva se obtiene por (14)  $Dr = Tr \times e \times qa = 120 \text{ L/planta}$  la cual es mayor que las necesidades totales.

### III.2.- Análisis de las variantes.

Parámetros	VARIANTES				
	PRUEBA DE CAMPO (1)	VARIANTE ALTERNATIVA (2)	USO DE TABLAS (3)	PUNTO ÓPTIMO (4)	SOFTWARE (5)
Nn (mm/d)	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29
Nt (L)	115.44	115.44	115.44		115.44
Pb (m)	1.05				
Rb (m)	0.83				0.75
Ae (m <sup>2</sup> )	2.16				1.78
e (u)	4	6.5	7		5
IR (d)	1	1	1	2	1
Ve/P (L/p)	28.86		28		23.09
PHreal (%)	36				37.09
Tr (h)	7.15	4.45	4.13		6
Dr (L)	116	115.7	119	343.2	120

Como se puede observar las necesidades netas de agua va a ser la misma en todos los casos debido a la evapotranspiración del cultivo (ETc). En el caso del segundo parámetro, solo la variante del punto óptimo no tiene en cuenta la salinidad del agua de riego y tampoco el coeficiente de uniformidad de entrega de los goteros, con relación a esto es correcto asegurar que no incide en los rendimientos del cultivo porque se trata de emisores autocompensantes que emplean el mismo caudal en un rango amplio de presiones.

El parámetro que distingue a las pruebas de campo del resto de las variantes, es la profundidad del bulbo (Pb), ya que constituye la facilidad de estimar la colocación de los bulbos de humedecimiento con relación a la zona de ramificación densa del cultivo. Esto

no es solo importante para la asimilación de nutrientes por parte de la planta y la eficacia del fertirriego, sino también porque propicia un mejor anclaje de las plantas.

El radio del bulbo ( $R_b$ ) y la superficie humedecida por el emisor son los parámetros que permiten estimar el número de emisores por planta, en las variantes 2,3 y 4 estos no se tienen en cuenta por lo tanto el volumen de agua y de nutrientes destinados a cada planta está sujeto a otros aspectos, por ejemplo en la variante 2 a la longitud del lateral y a la separación entre emisores, en la variante 3, a la información que ofrezcan las tablas las cuales, aunque se llegue a disponer de mucha información en ciertos datos de entrada, su uso adolecerá siempre de inexactitud.

En el punto óptimo, la relación entre el contenido de humedad y potencial óptimo de cultivo, además de algunas propiedades hidrofísicas del suelo, en este sentido la mejor opción la proporciona la prueba de campo.

La frecuencia de riego se asumió diaria para todas las variantes, a excepción del punto óptimo que resulto ser dos días, este resultado también es válido para las técnicas de riego por goteo y resulta lógico en proporción las dosis que se está aplicando es mucho más alta que en el resto de las variantes. Por lo tanto, además de la incertidumbre que surge al no tener precisado la colocación del bulbo con relación a la profundidad radicular del cultivo, existe el riesgo de aplicar un volumen de agua inadecuado, ya que el momento y duración del riego se determina por medio de instrumentos de medición colocados convenientemente dentro de la parcela (esto encarece la solución del riego).

Con relación al número de emisores por planta las variantes 1 y 5 son las que más parámetros agronómicos consideran, este valor es muy importante porque incide significativamente en costo de inversión inicial del sistema. En el caso de la variante alternativa a efectos prácticos, este valor se aproxima números enteros, pero no es estimado de acuerdo a las exigencias agronómicas de la planta.

No existen diferencias significativas entre las variantes 1, 3 y 5, referente al volumen del emisor por planta ( $V_e/P$ ), sin embargo estos son parámetros que no se toman en cuenta en las variantes 3 y 4, esta situación puede afectar la uniformidad en los rendimientos de cada una de las plantas, ya que como se muestra en la tabla estas variantes, incluyendo la número 3, no consideran el porcentaje de superficie humedecida por planta ( $PH_{real}$  (%)).

En el caso del tiempo de riego ( $T_r$ ) y la dosis de riego ( $D_r$ ), son parámetros que están sumamente relacionados con el número de emisores, ya que a mayor número de estos menores van a ser los tiempos de riego, y la dosis debe de corresponder a las necesidades totales.

## CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos del diseño agronómico de sistemas de riego por goteo a partir de diferentes procedimientos utilizados en la práctica del diseño, reflejan que en algunos, no se toma en cuenta el bulbo húmedo, ya que en su forma y dimensiones intervienen factores como la textura, estratificación del suelo, caudal del emisor y tiempo o volumen de riego.
2. El parámetro que distingue a las pruebas de campo del resto de las variantes, es la profundidad del bulbo ( $P_b$ ), ya que constituye la facilidad de estimar la colocación de los bulbos de humedecimiento con relación a la zona de ramificación densa del cultivo. Esto no es solo importante para la asimilación de nutrientes por parte de la planta y la eficacia del fertirriego, sino también porque propicia un mejor anclaje de las plantas. No considerar estos resultados de las pruebas de campo puede conllevar a sobredimensionar los sistemas de riego así como afectar los rendimientos de los cultivos y disminuir la productividad del agua en los sistemas de riego por goteo.
3. En el caso del uso del software RIEGOLOC tiene en cuenta los datos de la prueba para dar los resultados, pero cuando se usa la variante de diseño que tiene implementada el programa a partir de las ecuaciones empíricas propuestas por Arapa (2002), los resultados son muy parecidos a los de la prueba de campo.
4. El uso de tablas será tanto más inadecuado cuando más factores se ignoren y en este sentido hay que tener en cuenta que, por ejemplo, la simple descripción de la textura de un suelo no informa cuantitativamente en relación con el movimiento de agua, o que un factor muy importante a estos efectos, pero muy difícil de tabular, es la estratificación o la presencia de piedras. Por tanto, aunque se llegue a disponer de tablas muy completas en ciertos datos de entrada como caudal del emisor, volumen del agua, etc., su uso adolecerá siempre la inexactitud, por lo que a nivel de diseño se deben emplear con mucha prudencia.
5. Luego de un análisis de las variantes se puede afirmar que el procedimiento de pruebas de campo es más adecuado para el diseño agronómico del riego por goteo en cítricos, ya que considera de manera apropiada elementos de la relación agua-suelo-planta-clima en el escenario del proyecto, además de que son fáciles de realizar y no necesitan de un equipo muy costoso.



## **RECOMENDACIONES**

1. Los resultados de este trabajo de diploma aportan elementos de rigor a la dirección técnica de la ENPA para establecer las pruebas de campo como premisa en el diseño agronómico de sistemas de riego por goteo en cítricos.
2. Continuar el trabajo, abordando los contenidos de otras técnicas de riego y saneamiento agrícola que se utilizan en el país, aplicando rigurosamente los software de diseño utilizados por las Empresas de Proyectos Agropecuarios en la actualidad, de forma de propiciar una mayor automatización del diseño y una mejor preparación de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Hidráulica para resolver los Problemas Profesionales de su competencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Abreu, J.M. Hernández et al (1987): "El Riego Localizado". Curso Internacional de Riego Localizado. TENERIFE (España). MADRID.
- 2 Arapa, José: aplicación y uso del software RIEGOLOC,2002
- 3 Allen, G. Richard, Pereira, S. Luis, Raes, Dirk y Smith Martin. "Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements". Estudio FAO Riego y Drenaje. No. 56, ROMA, 1998, 302 p.
- 4 Boswel, M. J. (1990). Micro Irrigation Design Manual. España: Sevilla.
- 5 Bustamante, Heliedoro: potencial del agua del suelo. Revista facultad de agronomía vol. XXXIX No.2(1986)
- 6 Castillo, Araujo Isnel: Aplicación de las técnicas de riego por goteo al Organopónico La República, Santiago de Cuba(2013)
- 7 Colectivo de autores: la relación agua-suelo en la agricultura, edición 1era, México,(2011)
- 8 EL AGUA EN EL SUELO. Unidad de Hidrología, Departamento de Suelos y Aguas. Facultad de Agronomía, Universidad La República
- 9 FAO 56. (2015). Evapotranspiración del cultivo. Roma.
- 10 FAO56. (1998). Evapotranspiración del cultivo. Roma: Italia.
- 11 Ferreres, E. (1996). An irrigation scheduling and its impact on the 21st century. Proceedings of the International and irrigation scheduling conference. San Antonio: Texas: ASAE: 547-553.
- 12 Hernández Abreu. (1987). Riego Localizado. Curso Internacional de Riego Localizado en Tenerife, España. Publicaciones del Ministerio de la Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Madrid: España.
- 13 Keller, J. B. (1987). Sprinkler and Trickle irrigation. New York: EEUU.
- 14 Levi, Enzo: el agua según la ciencia,1985
- 15 Pennunzio, A. (2010). Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, microjet y pulsadores. Argentina: Buenos Aires.

- 16 Pizarro. (1990). Drenaje y recuperación de suelos salinos. Madrid: España: Ediciones Agrícola 2da.
  - 17 Pizarro, F. (1987). Riego localizado de alta frecuencia: goteo, microaspersión y exudación. Madrid: Edición Mundi-Prensa.
  - 18 Quesada, Cabrera Arnolvis : Sistemas de riego y saneamiento agrícola I, una revisión bibliográfica ,Santiago de Cuba, (2009)
  - 19 Revista Agricultura y Jardinería Riego por exudación: una solución alternativa. Por Celia Gosálbez 11/06/201
  - 20 Torralba, V. (1990). Riego localizado, conceptos, peculiaridades agronómicas y datos básicos. Diseño agronómico e hidráulico. Cuba: Ciudad Habana.
  - 21 Vargas Rodríguez, Pável. Sistemas de riego localizado de alta frecuencia, Aspectos generales y elementos para el diseño 1ra. Parte. (Goteo y Microaspersión) 1ra. Parte. Octubre /1995.
  - 22 Vargas, R. Pável, 1998. "Irrigation and Drainage Discipline Program, Land Reclamation And Improving I. & D. Technic" (Individual Study Report). Hydraulic Engineering (Branch C). IHE, The Netherlands
  - 23 Vargas Rodríguez, Pável. Aspectos básicos y elementos para el diseño de Sistemas de riego localizado (Goteo y Microaspersión). . Diciembre / 2003.
- Veliz, R. (2007). Revisión bibliográfica sobre la microaspersión. Universidad de Ciego de Ávila: Cuba: Trabajo de Investigación en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas.