

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y  
SUBTERRÁNEO**

**CONSTANZA PAZ VENEGAS RIVEROS**

PROYECTO DE TÍTULO  
PRESENTADO A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL AGRÍCOLA.

**CHILLÁN-CHILE**

**2023**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y  
SUBTERRÁNEO**

Aprobado por:

Eduardo Holzapfel Hoces  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Profesor Guía

Camilo Souto Escalona  
Ingeniero Civil Agrícola, Dr.  
Profesor Asistente

---

Profesor Co-Guía

Nicole Uslar Valle  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.  
Profesor Asistente

---

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Director Departamento

María Eugenia González Rodríguez  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## DEDICATORIA

A mis padres, por siempre creer en mí, brindarme su apoyo, su paciencia y amor incondicional, esto es por ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos por su compañía, comprensión y apoyo emocional en momentos de incertidumbres.

A mi pareja, por siempre darme fortaleza y ánimos, motivándome a seguir adelante en este proceso.

A la institución que me ha acogido todos estos años con sus maestros y su entrega de conocimientos y comprensión por la ciencia.

A mi profesor guía, por alentar constantemente la confianza en mí misma e impulsarme siempre a la búsqueda del conocimiento, a la investigación y el pensamiento crítico.

A mi profesor co-guía, que, a pesar de estar lejos, dedicó su tiempo a corregirme y proporcionarme apoyo en todo momento.

A todos los que me acompañaron en este camino de ser una profesional mis más sentidos agradecimientos por siempre.

Agradecer además a la empresa Riego Chile y Terram Neo, específicamente a Félix Valdés y Roxana Saavedra por su apoyo con sus antecedentes para terminar este proceso.

Agradecer también en calidad de becaria al proyecto ANID/FONDAP/15130015 y ANID/FONDAP/1523A0001.

## ÍNDICE DE MATERIAS

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY .....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	7
2.1. Objetivo General:.....	7
2.2. Objetivos Específicos: .....	7
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	8
3.1. Riego por goteo superficial .....	8
3.2. Riego por goteo subsuperficial .....	8
4. ANÁLISIS DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO EN RELACIÓN CON EL FRENTE DE HUMEDAD DEL SUELO, EL USO DEL AGUA Y PRODUCCIÓN. ....	8
4.1. Frente de humedad .....	8
4.2. Uso de Agua y producción.....	36
5. IMPLEMENTACIÓN DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.....	37
5.1. Componentes principales del riego por goteo superficial y subterráneo: .....	40
6. MANEJO Y MANTENIMIENTO DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.....	53
6.1. Problemas potenciales que pueden afectar negativamente al sistema de riego por goteo:.....	57
6.2. Procedimientos de mantenimiento .....	60
7. COSTO DEL RIEGO POR GOTEO.....	62
7.1. Costos Fijos.....	62
7.2. Costos Variables .....	63
7.3. Comparación de costos de inversión inicial del riego por goteo superficial y subterráneo. ....	63
8. CONCLUSIONES .....	67
9. BIBLIOGRAFÍA.....	69

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Tratamientos y combinaciones de riego empleados en el ensayo. ....	11
Tabla 2. Valores del área mojada observada (Ob), simulada (Pre) y error relativo porcentual (RE). ....	13
Tabla 3. Valores de velocidad horizontal y vertical observada (Ob) y simulada (Pre) del frente de humedad.....	13
Tabla 4. Valores de R <sup>2</sup> , RMSE y CRM de la predicción del movimiento horizontal (H) y vertical (V) del frente de humedad para el riego por goteo superficial y subsuperficial.....	14
Tabla 5. Distribución de los tratamientos realizados correspondiente a los tiempos de aplicación de 1, 2, 3, 4 ,5 y 6 h para cada bloque y sus caudales correspondientes. ....	27
Tabla 6. Componentes principales en sistemas de riego por goteo superficial y subterráneo. "X" representa que el sistema de riego por goteo contiene el componente.....	38
Tabla 7. Profundidad de instalación de emisores en riego por goteo subsuperficial.....	42
Tabla 8. Tipos de goteros. ....	45
Tabla 9. Problemas diagnosticados a través del caudal y la presión del sistema. ....	56
Tabla 10. Problemas comunes de la calidad del agua en el riego por goteo .....	58
Tabla 11. Materiales y equipos valorados dentro de la cotización para riego por goteo superficial y subterráneo.....	65
Tabla 12. Costo de inversión inicial por hectárea de los diferentes sistemas de riego.....	65
Tabla 13. Diferencias de costos de inversión inicial por hectárea entre las diferentes alternativas de riego por goteo.....	66

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Montaje experimental para el riego por goteo subsuperficial.....	10
Figura 2. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo superficial (DI) con una descarga de 4,46 L h <sup>-1</sup> . .....	15
Figura 3. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo superficial (DI) con una descarga de 6,26 L h <sup>-1</sup> . .....	16
Figura 4. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo subsuperficial (SDI-1P) con una descarga de 4,46 L h <sup>-1</sup> . .....	17
Figura 5. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo subsuperficial (SDI-1P) con una descarga de 6,26 L h <sup>-1</sup> . .....	18
Figura 6. Disposición del sistema de riego por goteo superficial. ....	20
Figura 7. Forma del bulbo húmedo obtenida, suelo franco-arcilloso (izquierda) y suelo areno-francoso (derecha).. .....	21
Figura 8. Radio de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en suelo areno-francoso (Areo).. .....	23
Figura 9. Radio de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en suelo franco-arcilloso (Ceiba). .....	23
Figura 10. Profundidad de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en suelo areno-francoso (Areo). .....	24
Figura 11. Profundidad de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en el suelo franco-arcilloso (Ceiba).. .....	25
Figura 12. Ejemplo del bloque 1 de riego para aplicación de un caudal de 1 L h <sup>-1</sup> . .....	27
Figura 13. Tamaño del bulbo húmedo en función del caudal del emisor Q (L h <sup>-1</sup> ), textura del suelo y tiempo de riego. ....	29
Figura 14. Forma y dimensiones del bulbo húmedo en texturas franca y arenosa, con una hora de riego, aplicando caudales de 1,1 L h <sup>-1</sup> , 1,6 L h <sup>-1</sup> y 2,2 L h <sup>-1</sup> . .....	30
Figura 15. Forma y dimensiones del bulbo húmedo en texturas franca y arenosa, con tres horas de riego, aplicando caudales de 1,1 L h <sup>-1</sup> , 1,6 L h <sup>-1</sup> y 2,2 L h <sup>-1</sup> . .....	31
Figura 16. Forma y dimensiones del bulbo húmedo en texturas franca y arenosa, con seis horas de riego, aplicando caudales de 1,1 L h <sup>-1</sup> , 1,6 L h <sup>-1</sup> y 2,2 L h <sup>-1</sup> . .....	32
Figura 17. Dimensiones del bulbo húmedo en textura franca y arenosa. ..	33
Figura 18. Bulbo de humedecimiento bajo un emisor en riego por goteo tradicional y subterráneo. ....	35

## CONTINUACIÓN ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 19. Bulbo húmedo bajo un emisor, para goteo enterrado en un cultivo de maíz.....	36
Figura 20. Ejemplo de un sistema básico de riego por goteo superficial. ..	39
Figura 21. Esquema de un sistema SDI. ....	40
Figura 22. Instalación de laterales de riego por goteo subterráneo por tractor.....	43
Figura 23. Instalación mecanizada de un sistema de riego por goteo subterráneo con arado topo. ....	43
Figura 24. Gotero antisucción y repelente de raíz.. ....	46
Figura 25. Sistema anti-raíz ICR (inhibidor del crecimiento radicular).. ....	46
Figura 26. Disposición típica de colector, tubo de suministro, conectores y líneas de goteo para un sistema SDI.. ....	49
Figura 27. Ejemplo de un sistema de riego por goteo subterráneo. a) Cultivo de Cannabis, b) planta de Cannabis, c) superficie mojada por el gotero, d) ubicación de la tubería del sistema de riego, e) tubería enterrada. ....	50
Figura 28. Sistema de riego por goteo subterráneo, disposición en terreno antes de ser cubierto. ....	51

## **ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO**

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF SURFACE AND SUBSURFACE DRIP IRRIGATION**

**Palabras claves:** Frente de humedad, área humedecida, frutales.

#### **RESUMEN**

El objetivo del presente trabajo fue analizar comparativamente el sistema de riego por goteo superficial y subterráneo. Para lograr este objetivo, la metodología utilizada consistió en una revisión bibliográfica de artículos científicos, tesis, libros, entre otros. En base a la información recopilada se determinó que, establecer la forma del frente de humedad aumenta la eficiencia y uniformidad de aplicación del agua. En riego por goteo superficial el frente de humedad adopta una forma elipsoidal truncada, mientras que en riego por goteo subterráneo es esférica. Con respecto a la eficiencia en el uso del agua, tiende a ser mayor en riego por goteo subterráneo, ya que las pérdidas por evaporación se ven reducidas al aplicarse el agua directamente en la zona de las raíces. La implementación en riego por goteo superficial y subterráneo tiene como principales diferencias que, en riego por goteo subterráneo, los laterales van enterrados, se implementan colectores de descarga para el lavado de las tuberías y los emisores poseen tecnología antiraíz y antisucción. Con respecto al manejo, las principales diferencias son la cantidad de agua a aplicar y la inspección del funcionamiento de los emisores. A partir de esta información se concluyó que el riego por goteo

subterráneo posee ventajas principalmente asociadas a la eficiencia en el uso del agua, a pesar de tener un mayor costo inicial de inversión, a largo plazo los beneficios podrían justificarla, considerando la alta eficiencia que posee para regar los cultivos agrícolas y paisajes si el sistema de riego se maneja de forma adecuada. Sin embargo, el superficial presenta ventajas en la facilidad de operación y control de los emisores.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF SURFACE AND SUBSURFACE DRIP IRRIGATION**

**Keywords:** Moisture front, wetted area, fruit trees.

### **SUMMARY**

The objective of this work was to comparatively analyze the surface and subsurface drip irrigation systems. To achieve this objective, the methodology used consisted of a bibliographic review of scientific articles, theses, books, among others. Based on the information gathered, it was determined that establishing the shape of the moisture front increases the efficiency and uniformity of water application. In surface drip irrigation the moisture front adopts a truncated ellipsoidal shape, while in subsurface drip irrigation it is spherical. With respect to water use efficiency, it tends to be higher in subsurface drip irrigation, since evaporation losses are reduced by applying water directly to the root zone. The main differences between surface and subsurface drip irrigation are that, in subsurface drip irrigation, the laterals are buried, discharge manifolds are used to wash the pipes, and the emitters have anti-root and anti-suction technology. With respect to management, the main differences are the amount of water to be applied and the inspection of the operation of the emitters.

From this information, it was concluded that subsurface drip irrigation has mostly in water use efficiency advantages, despite having a higher initial

investment cost, in the long term the benefits could justify it, considering the high efficiency it has to irrigate agricultural crops and landscapes if the irrigation system is properly managed. However, the surface presents advantages in the ease of operation and control of the emitters.

## 1. INTRODUCCIÓN

El riego tiene como objetivo principal suministrar la cantidad de agua requerida por el cultivo, para reponer la pérdida de humedad generada debido a la evapotranspiración y la carencia de precipitaciones, considerando entonces la principal función del riego y situándonos en el escenario ambiental actual, en donde estamos frente a una crisis hídrica generando una presión cada vez mayor. Es importante hacer uso eficaz del agua, incorporando sistemas de riego que nos permitan un óptimo uso de este recurso.

Implementar a nivel predial sistemas de riego con alto nivel de tecnificación, permite un uso eficaz de los recursos hídricos disponibles, aumentando el área a ser regada, optimizando el uso de los fertilizantes y mano de obra, generando incrementos en la producción, haciendo uso eficiente de los recursos y previniendo la contaminación de los acuíferos causada por el riego de los cultivos o frutales (Holzapfel, 2014).

Dentro de los sistemas de riego presurizado podemos encontrar el riego por goteo, que puede ser superficial o subterráneo, este último también denominado subsuperficial o SDI por sus siglas en inglés (*Subsurface drip irrigation*). El uso de los sistemas de riego por goteo en los cultivos se ha convertido en una práctica frecuente a medida que pasan los años, ya que se considera un medio para lograr prácticas de gestión de riego sostenibles. Este sistema consiste básicamente en pequeños emisores enterrados o colocados en la superficie del suelo que descargan el agua de manera constante.

Además, los sistemas de riego por goteo son capaces de suministrar agua y nutrientes al suelo en pequeñas cantidades y en cualquier momento sin un gran costo económico adicional, permitiendo mantener un volumen de suelo parcialmente humedecido en condiciones óptimas para el crecimiento de los cultivos (Cote *et al.*, 2003).

Los sistemas de riego por goteo superficial y subterráneo poseen un funcionamiento similar, siendo la instalación su mayor diferencia, esto provoca posibles ventajas o desventajas entre ellos, por lo que es necesario profundizar a través de un análisis comparativo general de ambos sistemas de riego por goteo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General:**

Realizar un análisis comparativo del sistema de riego por goteo superficial y subterráneo.

### **2.2. Objetivos Específicos:**

- Analizar el riego por goteo superficial y subterráneo en relación con el frente de humedad del suelo, el uso de agua y producción.
- Comparar la implementación del riego por goteo superficial y subterráneo.
- Evaluar el manejo del riego por goteo superficial y subterráneo.
- Comparar los costos de inversión del riego por goteo superficial y subterráneo.

### **3. ANTECEDENTES GENERALES**

#### **3.1. Riego por goteo superficial**

El riego por goteo superficial consiste básicamente en el transporte de agua por presión a través de tuberías o cintas de riego ubicadas en la superficie próximas al cultivo, al llegar el agua a los emisores o goteros, estos entregan pequeños volúmenes de agua de forma constante y uniforme a cada planta a lo largo de todo el predio, generando un volumen de suelo regado denominado bulbo húmedo.

#### **3.2. Riego por goteo subsuperficial**

De igual manera que el riego por goteo superficial, el riego por goteo subterráneo consiste en el transporte de agua por presión a través de tuberías, con la diferencia que los laterales de riego van enterrados y el agua se suministra debajo de la superficie del suelo de forma constante y uniforme directamente a la zona radicular de cada planta.

### **4. ANÁLISIS DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO EN RELACIÓN CON EL FRENTE DE HUMEDAD DEL SUELO, EL USO DEL AGUA Y PRODUCCIÓN.**

#### **4.1. Frente de humedad**

Determinar las dimensiones del frente de humedad del suelo que genera un emisor ya sea en riego por goteo superficial o subterráneo, es de suma

importancia, ya que nos permite aumentar la eficiencia y uniformidad de aplicación del agua. La forma del bulbo húmedo depende de factores como caudal del emisor, textura del suelo, pendiente, entre otras.

Monjezi *et al.* (2013) realizaron estudios con el objetivo de determinar la forma del bulbo húmedo en sistemas de riego por goteo superficial y subterráneo en suelos limosos, basándose en datos experimentales de laboratorio y simulaciones elaboradas con el software Hydrus-2D.

Para llevar a cabo el estudio se utilizó un depósito de plexiglás de dimensiones de 0,9x0,9x1,8 m, al cual se le suministró un caudal de entrada constante a través de una tubería lateral de 16 mm de diámetro y tubos emisores de 60 cm de largo y diámetro interno de 1 mm, tal como se muestra en la Figura 1.

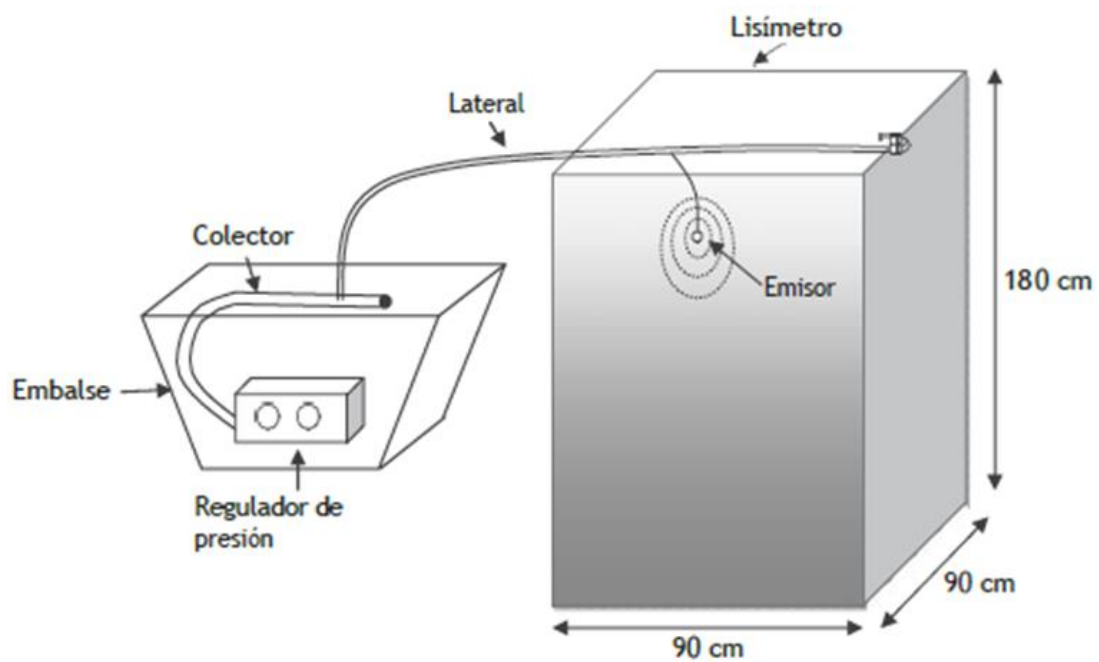


Figura 1. Montaje experimental para el riego por goteo subsuperficial. Fuente: Monjezi et al., 2013.

En la Tabla 1 a continuación se muestra los distintos tratamientos y combinaciones empleados en el estudio.

Tabla 1. Tratamientos y combinaciones de riego empleados en el ensayo.

Método de riego (Profundidad)	Abreviatura	Descarga (L h <sup>-1</sup> )	Tiempo de riego (min)	Tiempo de medición (min)
Superficial un emisor	DI	4,46	22,5	5-10-15-22,5-142,5
		6,26	16,0	5-10-16-136
Subterráneo un emisor (20 cm)	SDI-1P	4,46	22,5	5-10-15-22,5-142,5
		6,26	16,0	5-10-16-136

Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

En cada tratamiento empleado se marcaron y midieron las dimensiones del bulbo húmedo durante y después del riego. El área mojada se calculó utilizando el programa AutoCAD y finalmente con los valores obtenidos de distancia horizontal/vertical y tiempo de riego se obtuvo del cociente de estos valores, la velocidad horizontal/vertical del frente de humedad. Monjezi *et al.* (2013) utilizaron estos resultados y los evaluaron en el software Hydrus-2D para simular la forma del bulbo húmedo.

Los resultados observados y simulados del área mojada y velocidad horizontal/vertical del frente de humedad para el riego por goteo superficial y subterráneo, se muestran a continuación en las Tablas 2 y 3:

Tabla 2. Valores del área mojada observada (Ob), simulada (Pre) y error relativo porcentual (RE).

Área (*) (cm <sup>2</sup> )		Descarga (L h <sup>-1</sup> )							
		DI				SDI-1P			
		4,46		6,26		4,46		6,26	
		Ob	Pre	Ob	Pre	Ob	Pre	Ob	Pre
Riego	A <sub>I</sub>	302,6	237,2	230,6	245,4	430,4	239,8	354,3	245,8
Redistribución	A <sub>R</sub>	115,2	145,1	106,7	183,6	147,5	191,0	109,2	229,8
Total	A <sub>T</sub>	417,8	382,4	337,3	429,0	577,9	430,7	454,5	475,6
RE %		-8,5		27,2		-25,6		4,6	

(\*) Donde A<sub>I</sub> es área durante el riego, A<sub>R</sub> es área durante la redistribución y A<sub>T</sub> área total. Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

Tabla 3. Valores de velocidad horizontal y vertical observada (Ob) y simulada (Pre) del frente de humedad.

Velocidad (cm h <sup>-1</sup> )		Descarga (L h <sup>-1</sup> )							
		DI				SDI-1P			
		4,46		6,26		4,46		6,26	
		Ob	Pre	Ob	Pre	Ob	Pre	Ob	Pre
Riego	V <sub>h</sub>	84,0	94,2	122,1	133,8	62,4	48,0	80,4	67,8
	V <sub>v</sub>	32,1	28,2	34,3	38,4	60,6	47,4	76,2	67,2
Redistribución	V <sub>h</sub>	1,9	0,6	1,7	3,6	1,8	2,4	1,2	1,2
	V <sub>v</sub>	1,3	1,2	1,4	1,8	1,8	2,4	1,2	3,0

(\*) Donde V<sub>h</sub> es velocidad horizontal y V<sub>v</sub> es velocidad vertical del frente de humedad. Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

Basado en los resultados entregados de velocidad horizontal/vertical, se calculó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error cuadrático (RMSE) y coeficiente de masa residual (CRM) para la evaluación de la simulación, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de  $R^2$ , RMSE y CRM de la predicción del movimiento horizontal (H) y vertical (V) del frente de humedad para el riego por goteo superficial y subsuperficial.

Método de riego	Descarga (L h <sup>-1</sup> )	Movimiento	$R^2$	RMSE (cm)	CRM
Goteo superficial	4,46	H	0,93	3,19	-0,02
		V	0,96	1,36	0,08
	6,26	H	0,86	5,35	-0,016
		V	0,94	1,66	-0,016
Goteo subterráneo	4,46	H	0,96	3,65	0,18
		V	0,95	3,68	0,18
	6,26	H	0,92	3,05	0,14
		V	0,95	1,91	0,07

Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

Los valores de  $R^2$  indican que el modelo se ajusta de buena manera a los datos observados, corroborándose con el RMSE y el CRM, este último indica que el modelo sobreestima (valores negativos) o subestima (valores positivos) los valores reales obtenidos. Se aprecia que el modelo tiende a sobreestimar el bulbo húmedo en riego superficial, mientras que para riego subterráneo tiende a subestimarlos levemente (valores de CRM cercanos a 0). Estos resultados indican que el modelo podría predecir la dimensión del bulbo húmedo en el riego por goteo superficial y subsuperficial con un emisor con RMSE entre 1 a 5 cm.

La representación del frente de humedad observado y simulado para el riego por goteo superficial, con caudales de 4,46 y 6,26 L h<sup>-1</sup>, se presentan a continuación en las Figuras 2 y 3, respectivamente.

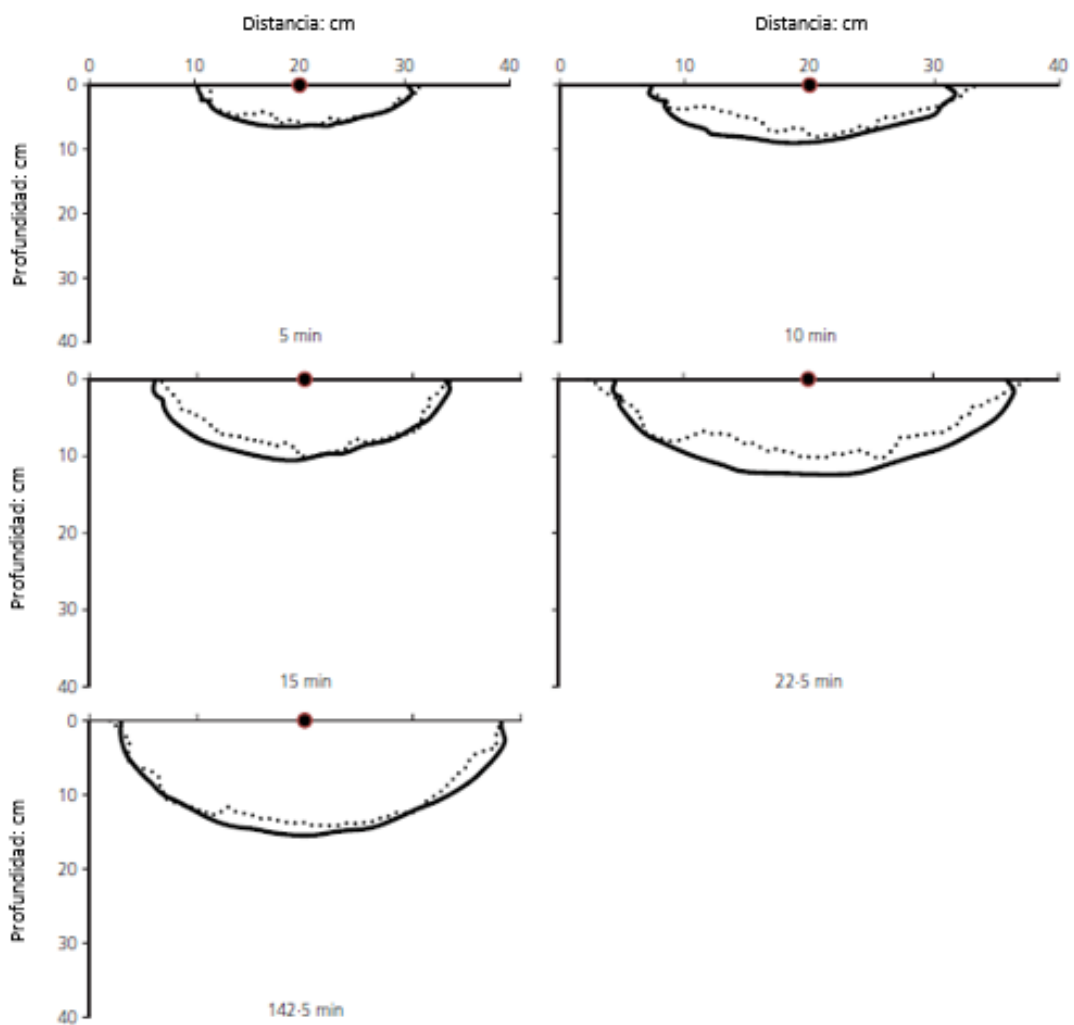


Figura 2. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo superficial (DI) con una descarga de 4,46 L h<sup>-1</sup>. Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

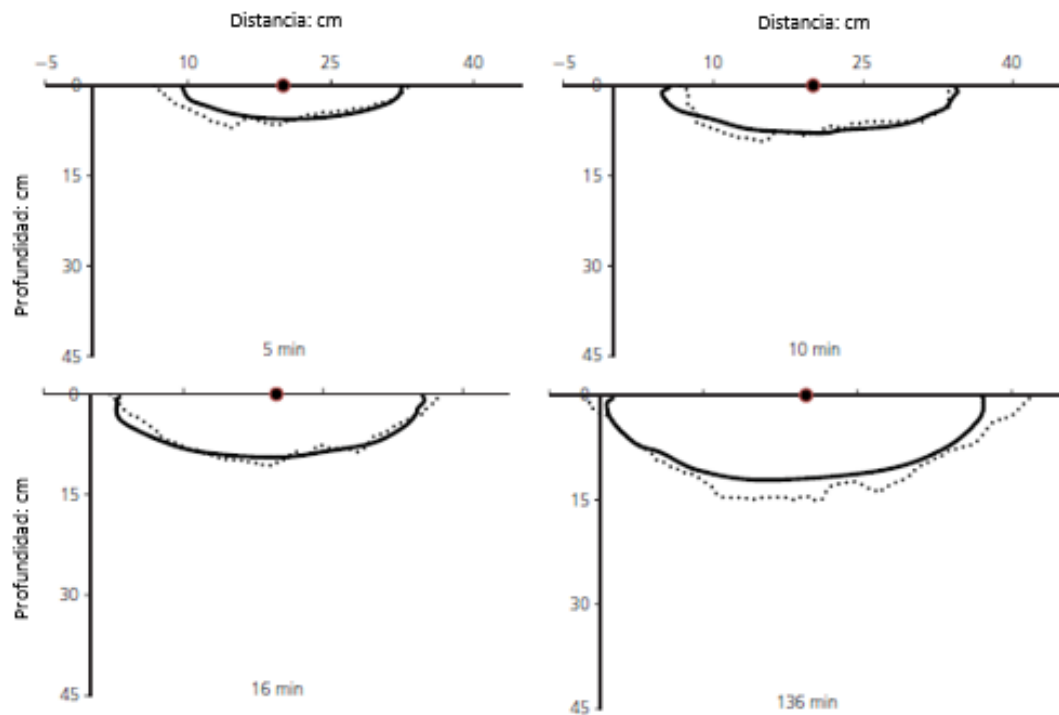


Figura 3. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo superficial (DI) con una descarga de  $6,26 \text{ L h}^{-1}$ . Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

La representación del frente de humedad observado y simulado para el riego por goteo subsuperficial, con caudales de  $4,46$  y  $6,26 \text{ L h}^{-1}$  respectivamente, se presentan a continuación en las Figuras 4 y 5, respectivamente.

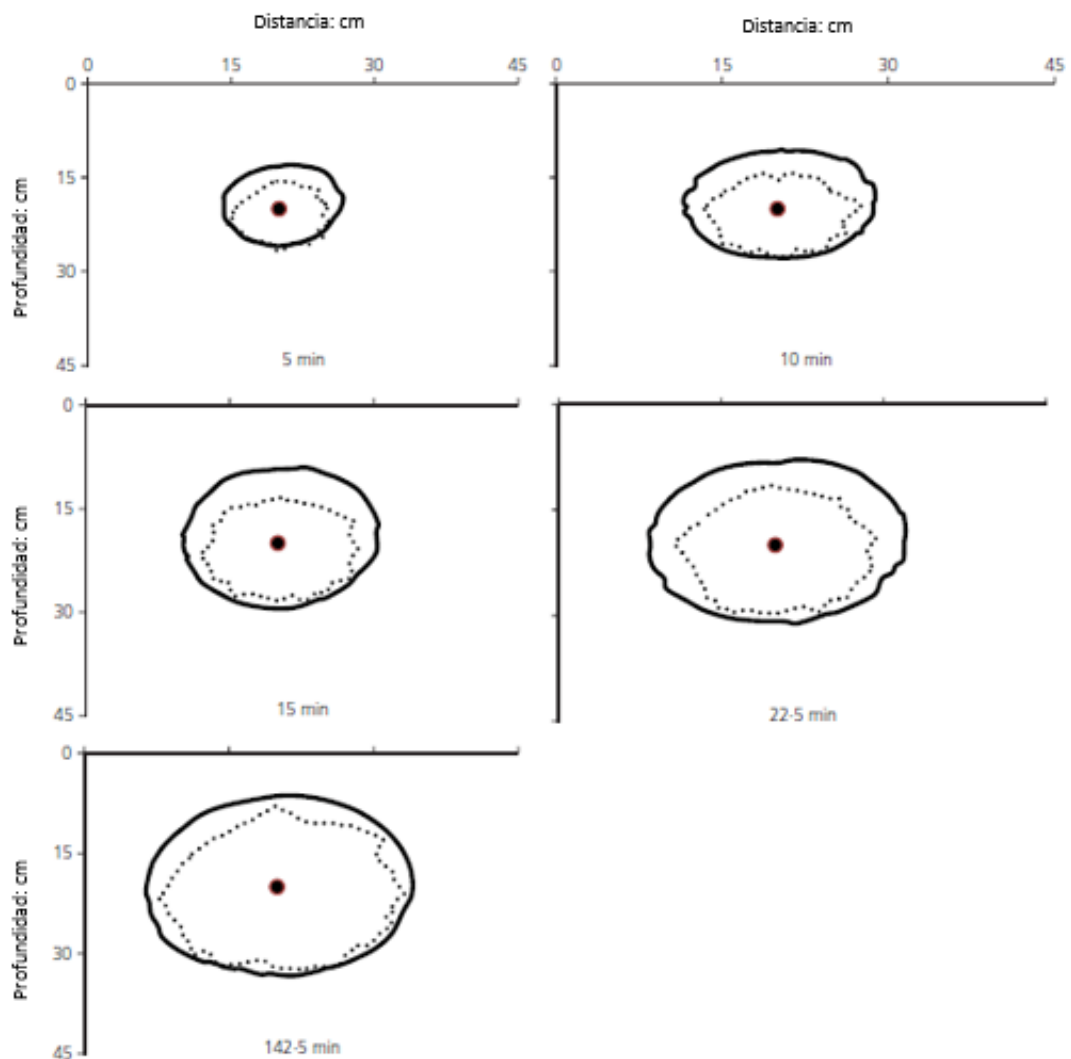


Figura 4. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo subsuperficial (SDI-1P) con una descarga de  $4,46 \text{ L h}^{-1}$ . Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

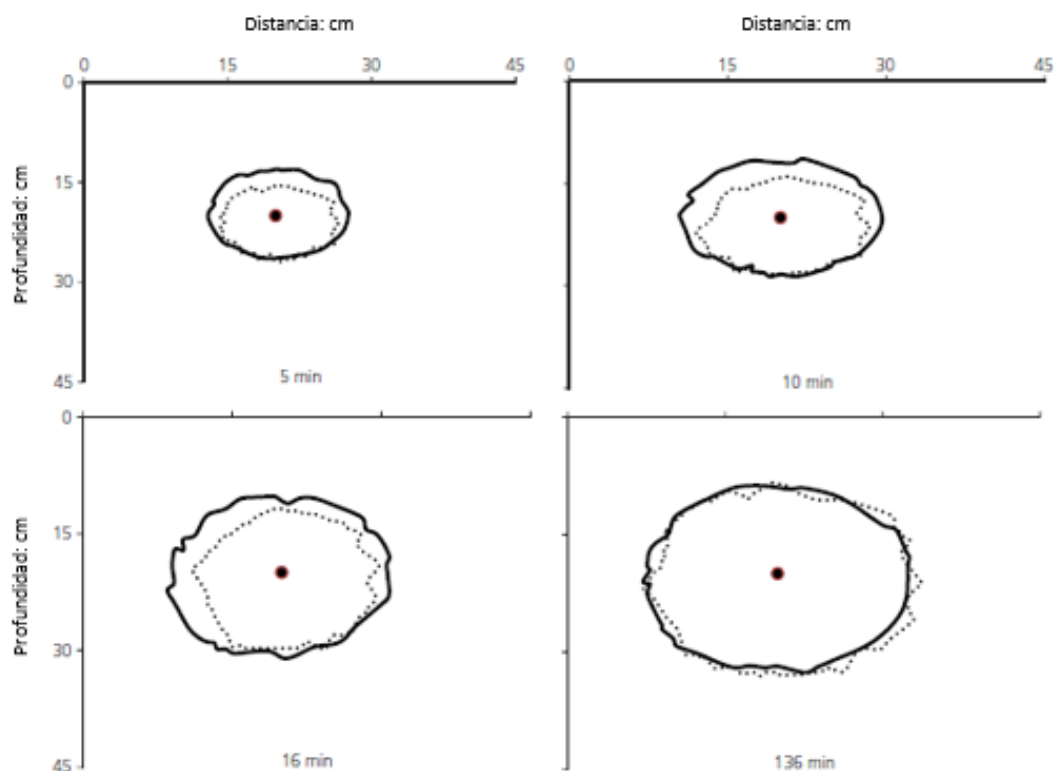


Figura 5. Frente de humedad del suelo observado (línea continua) y simulado (línea discontinua) para el riego por goteo subsuperficial (SDI-1P) con una descarga de  $6,26 \text{ L h}^{-1}$ . Fuente: Monjezi *et al.*, 2013.

Durante y después de los eventos de riego para los tratamientos de riego por goteo superficial (DI) y subsuperficial (SDI-1P), el área mojada fue mayor para una caudal de  $4,46 \text{ L h}^{-1}$  que para un caudal de  $6,26 \text{ L h}^{-1}$ . Un menor caudal implica tiempos de riego más prolongados, por lo que el avance de humedad es mayor, en cambio un caudal mayor implica tiempos más reducidos y el frente de humedad no tiene tiempo suficiente para extenderse.

En el riego por goteo superficial, los valores simulados de área y velocidad del frente de humedad fueron más cercanos cuando la descarga era mayor, mientras que en el riego por goteo subterráneo fue más cercano cuando la descarga era menor. Esta situación está asociada a los potenciales, en riego por goteo superficial está presente el potencial matricial y gravitacional y en el caso del riego por goteo subterráneo está presente preferentemente el potencial matricial.

El área mojada y la velocidad de infiltración fueron mayores tanto en las simulaciones como en las observaciones durante el riego, ya que en la redistribución no hay una fuente de agua que este alimentando el frente de distribución, al mismo tiempo el suelo está saturado casi en su totalidad en la zona más cercana al emisor y por lo tanto hay menos diferencia de potencial.

Una de las conclusiones más relevantes de este estudio fue que la forma del bulbo húmedo para el riego por goteo superficial es una elipsoide truncada y esférica para el riego por goteo subterráneo. Finalmente, la simulación resultó eficaz para simular el frente de humedad en suelos limosos con un emisor.

Otros estudios científicos ratifican lo expuesto por Monjezi *et al.* (2013). Por ejemplo, Gil-Marín (2001) determinó la forma y dimensiones del bulbo húmedo en suelos de textura areno-francoso de la zona Areo (estado de Monagas, Venezuela) y franco-arcillosa de la zona La Ceiba (estado Anzoátegui, Venezuela) con fines de diseño en riego por goteo superficial. Para la realización del estudio, Gil-Marín (2001), montó un sistema de riego por goteo superficial, el cual estaba constituido por emisores integrales de  $1 \text{ L h}^{-1}$

separados a una distancia de 1 m entre sí y emisores de 2, 4 y 10 L h<sup>-1</sup> de botón separados a una distancia de 1,5 m entre sí para evitar el solapamiento de los bulbos. Se ensayaron tiempos de aplicación de 1, 2 y 3 h (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, y T<sub>3</sub>, respectivamente), tal como se muestra en la Figura 6.

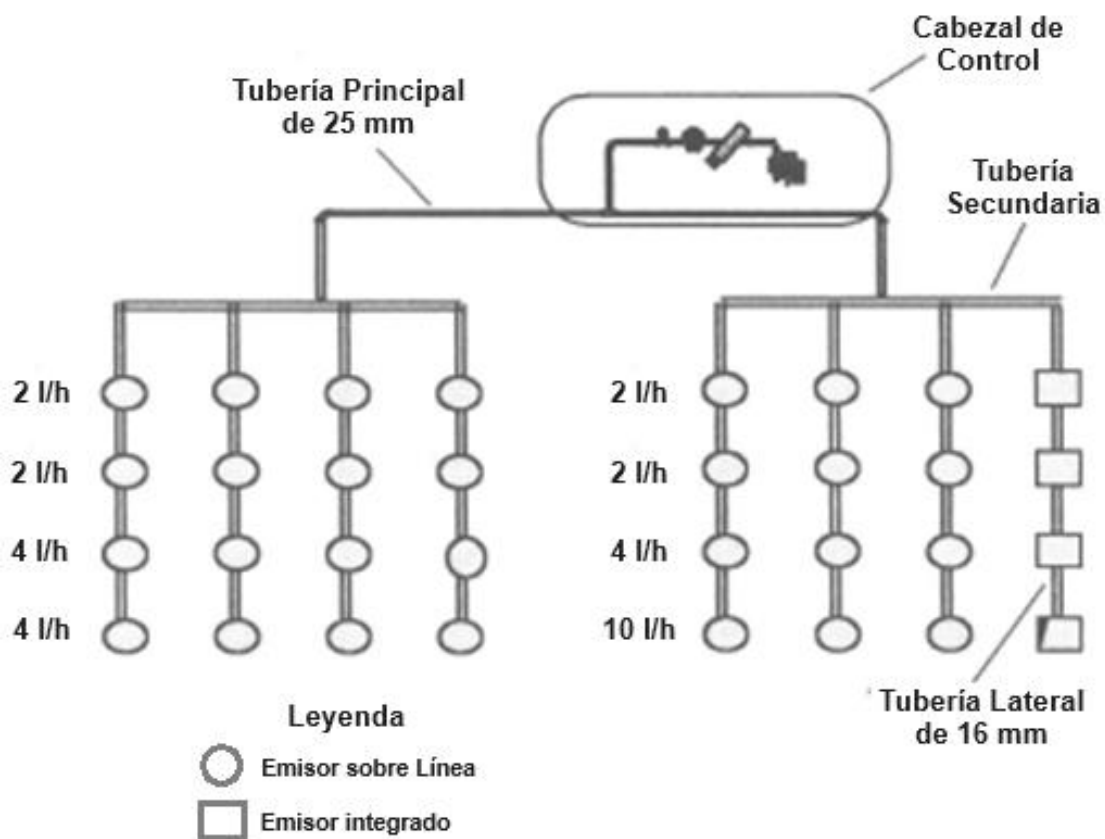


Figura 6. Disposición del sistema de riego por goteo superficial. Fuente: Gil-Marín, 2001.

Para la determinación del bulbo húmedo, Gil-Marín (2001), realizó un registro de los radios de encharcamiento formados por un emisor, en los tiempos de 1, 5, 10, 20, 30 min y al final de cada riego. Además, obtuvo un promedio del diámetro humedecido gracias a mediciones en diversas direcciones. Acabado el riego, Gil-Marín (2001), realizó una calicata y procedió a medir el diámetro de humedecimiento a 15 cm de profundidad y a la profundidad total para poder trazar con mayor exactitud la forma del bulbo húmedo. En la Figura 7 se observa la forma del bulbo húmedo obtenida con los diferentes caudales, en los suelos areno-francoso y franco-arcilloso.

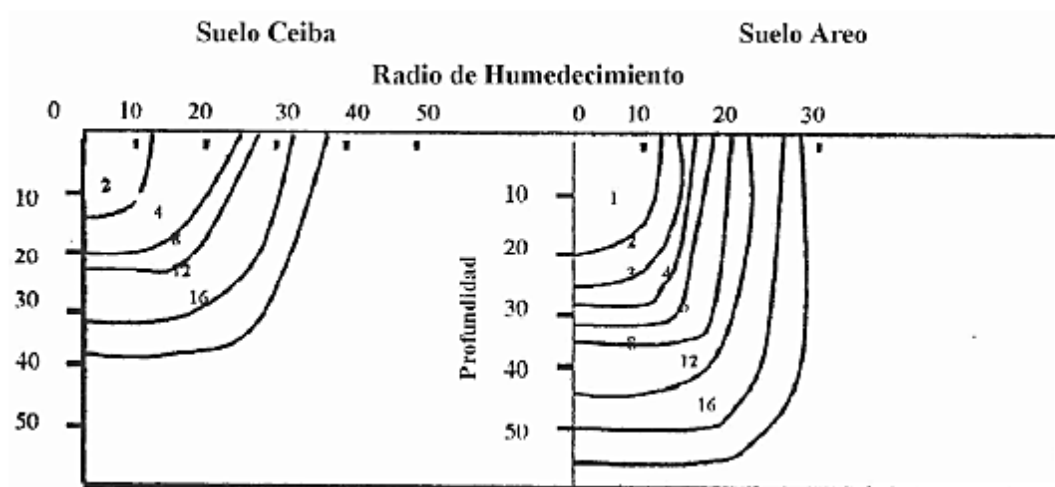


Figura 7. Forma del bulbo húmedo obtenida, suelo franco-arcilloso (izquierda) y suelo areno-francoso (derecha). Fuente: Gil-Marín, 2001.

De la Figura 7 se puede deducir que la forma del bulbo húmedo bajo las mismas condiciones de aplicación de agua y caudal, para el suelo areno-

francoso es más alargada a diferencia del suelo franco-arcilloso, esto debido al tipo de la textura de suelo.

La velocidad de infiltración fue menor en el suelo franco-arcilloso por lo que se produce una mayor acumulación de agua en la superficie, lo que induce en una mayor área húmeda a diferencia del suelo areno-francoso.

Teniendo en consideración los resultados obtenidos en el bulbo húmedo y velocidad de infiltración, Gil-Marín (2001) concluyó que: A partir de los 10 L de aplicación de agua el diámetro de humedecimiento en el suelo areno-francoso tiende a estabilizarse en aproximadamente 50 cm, esto implica, por ejemplo, en caso de tener hortalizas o frutales de desarrollo radical superficial que el espaciamiento entre emisores debe ser de 45 cm lo que permite tener un suelo adecuadamente humedecido y un traslape aproximado de bulbos de un 10%. En el caso del suelo franco-arcilloso el espaciamiento sería de 60 cm, lo que conlleva a un menor número de emisores por hectárea, que en el suelo areno-francoso.

La relación entre el radio de humedecimiento y el volumen aplicado se observa en las Figuras 8 y 9.

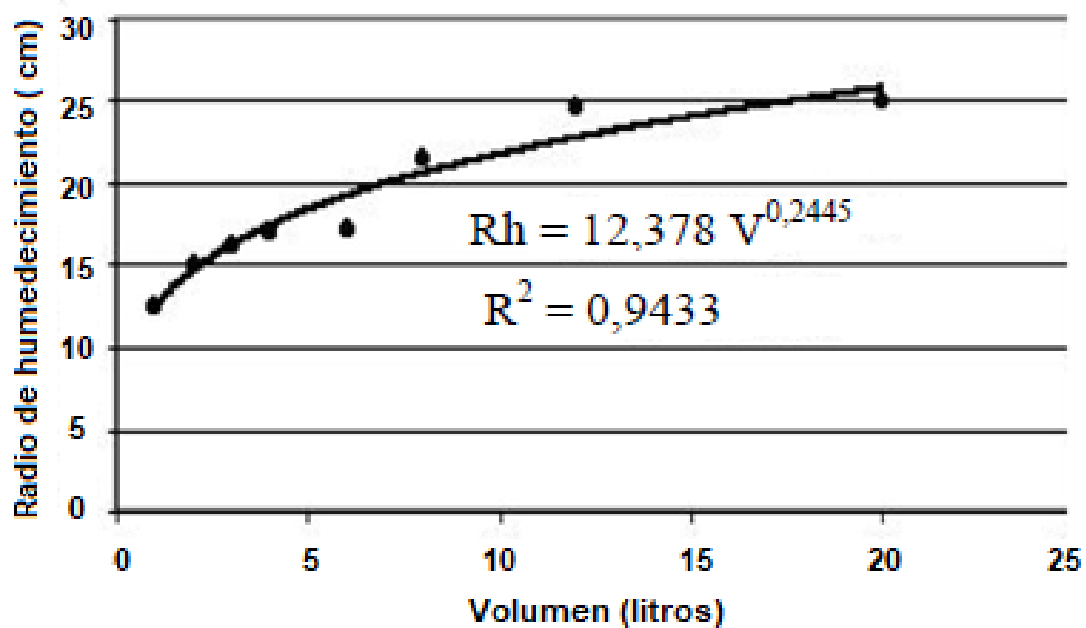


Figura 8. Radio de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en suelo arenofrancoso (Areo). Fuente: Gil-Marín, 2001.

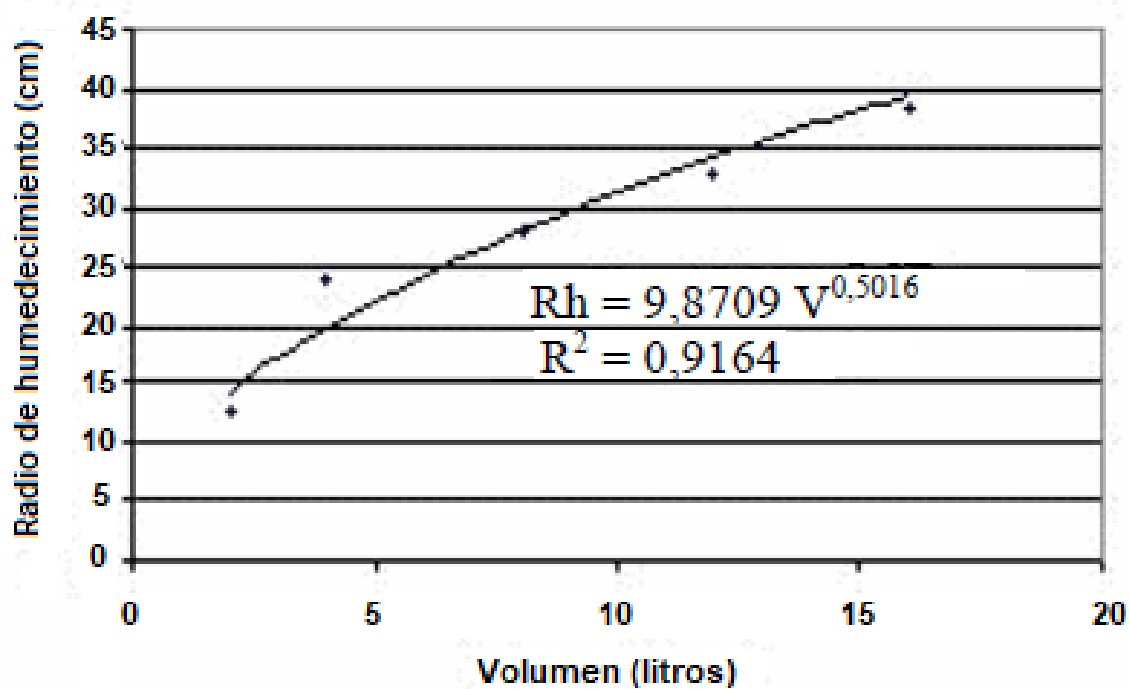


Figura 9. Radio de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en suelo francoarcilloso (Ceiba). Fuente: Gil-Marín, 2001.

La relación de profundidad de humedecimiento y el volumen de agua aplicada se observa en las Figuras 10 y 11.

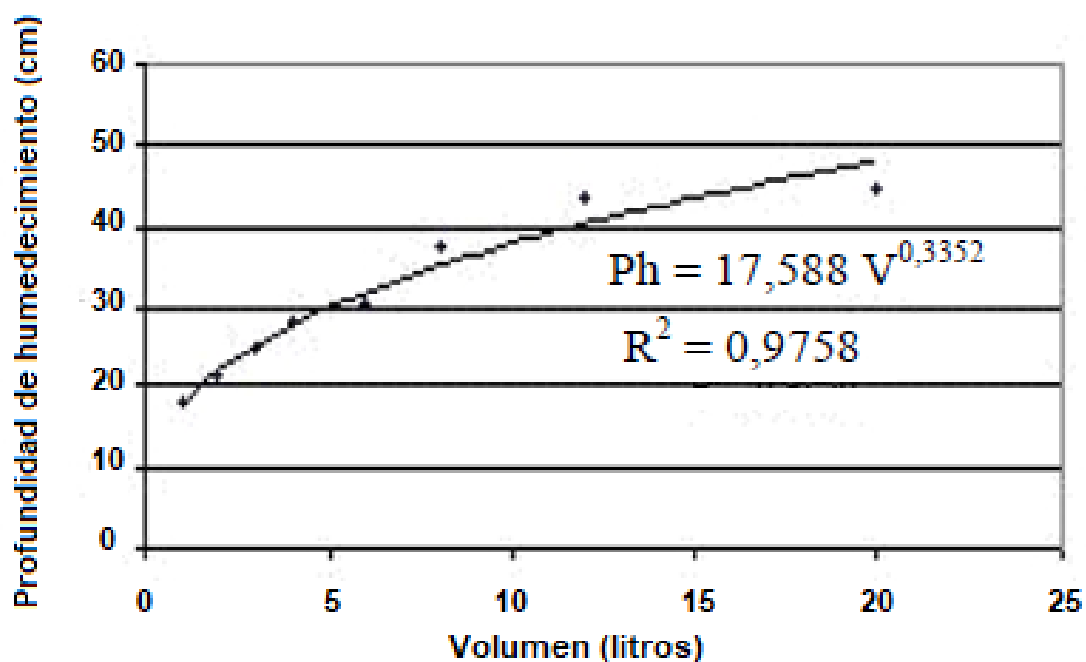


Figura 10. Profundidad de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en suelo areno-francoso (Areo). Fuente: Gil-Marín, 2001.

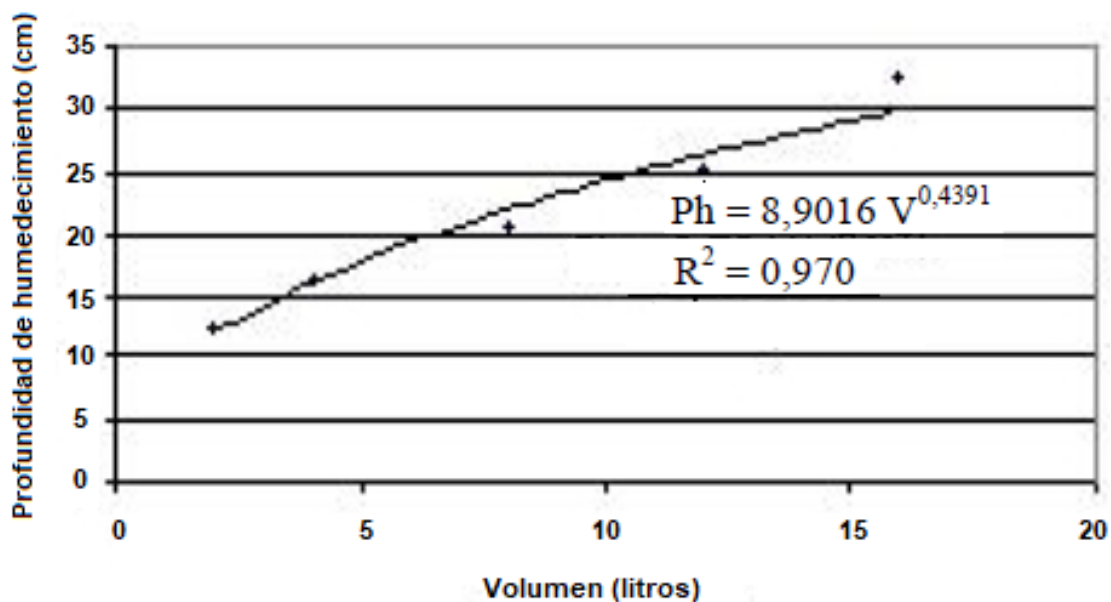


Figura 11. Profundidad de humedecimiento en relación con el volumen aplicado en el suelo franco-arcilloso (Ceiba). Fuente: Gil-Marín, 2001.

A medida que aumenta el caudal aplicado, aumenta la profundidad de humedecimiento y por ende el volumen de suelo mojado. Las relaciones de radio y profundidad de humedecimiento en relación con el volumen aplicado presentaron coeficientes de determinación mayores al 91%, porcentajes aceptables para obtener un estimado del volumen requerido por el cultivo. Además, es posible desarrollar modelos empíricos específicos por tipo de suelos para determinar el área de humedecimiento y volumen de suelo humedecido, que permita apoyar los diseños de riego.

Gil-Marín (2001) concluyó que al aumentar el caudal de aplicación el frente de humedad avanzará en sentido horizontal y vertical. El radio de

humedecimiento fue mayor en el suelo franco-arcilloso lo que significa que se extendió más horizontalmente que el suelo areno-francoso, por otro lado, el suelo que tuvo una mayor profundidad de infiltración fue el suelo areno-francoso.

El bulbo húmedo depende de factores como las características físico-hídricas del suelo, caudal, tiempo de riego y topografía del terreno, debido a esto hay dificultades con las estimaciones teóricas, en general el bulbo húmedo se puede evaluar con tablas, con el uso de modelos y mediciones in situ, tener una aproximación de la forma del bulbo húmedo hace posible determinar el caudal del emisor y la cantidad de emisores necesarios para el diseño un sistema de riego por goteo.

Ticona (2013) determinó el bulbo húmedo en riego por goteo superficial en suelos de textura franca y arenosa de la costa peruana. Para ello, realizó 18 tratamientos con 6 repeticiones, caudales de  $1,1 \text{ L h}^{-1}$ ,  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  y  $2,2 \text{ L h}^{-1}$  y tiempos de aplicación de riego de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 h.

Los 18 tratamientos se distribuyeron en tres bloques de seis tratamientos cada uno, cada bloque estuvo compuesto por laterales separados 0,8 m de cada tipo de suelo, tal como se describe y se muestra en la Tabla 5 y Figura 12.

Tabla 5. Distribución de los tratamientos realizados correspondiente a los tiempos de aplicación de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 h para cada bloque y sus caudales correspondientes.

Bloque	Caudal (L h <sup>-1</sup> )	Tratamiento
1	1,1	T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> T <sub>3</sub> T <sub>4</sub> T <sub>5</sub> T <sub>6</sub>
2	1,6	T <sub>7</sub> T <sub>8</sub> T <sub>9</sub> T <sub>10</sub> T <sub>11</sub> T <sub>12</sub>
3	2,2	T <sub>13</sub> T <sub>14</sub> T <sub>15</sub> T <sub>16</sub> T <sub>17</sub> T <sub>18</sub>

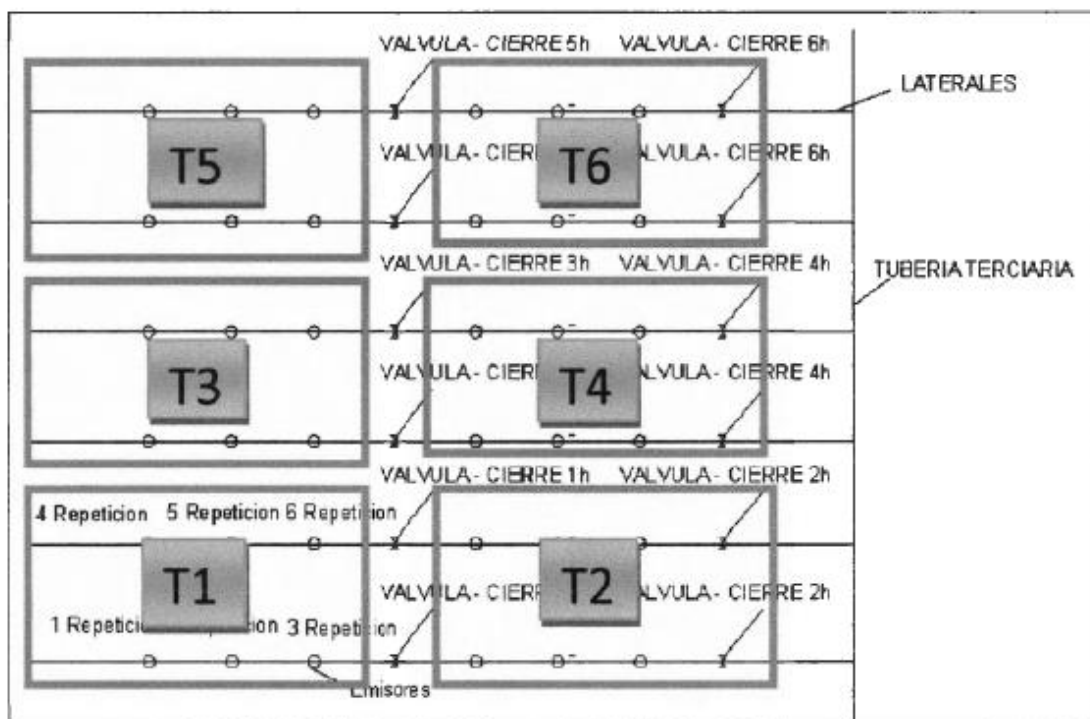


Figura 12. Ejemplo del bloque 1 de riego para aplicación de un caudal de 1 L h<sup>-1</sup>. Fuente: Ticona, 2013.

La forma del bulbo húmedo posee como factor determinante la textura del suelo y por lo tanto de los potenciales matricial y gravimétrico, en los suelos

francos estos potenciales se encuentran en equilibrio y como resultado poseen una distribución más homogénea, los suelos de textura arcillosa poseen mayor retención de agua debido a que están compuestos por pequeñas partículas que generan microporos por lo que el potencial mátrico predomina por sobre el potencial gravimétrico, a diferencia de los suelos de textura arenosa que se compone por partículas de mayor tamaño y por lo tanto posee macroporos predominando el potencial gravimétrico sobre el potencial mátrico, esto provoca que el bulbo húmedo se extienda más verticalmente que horizontalmente. Para que el bulbo húmedo se amplie horizontalmente en suelos de textura arenosa se debe aumentar el número de emisores, en cuanto a la profundidad del bulbo húmedo, dependerá de factores como la velocidad de infiltración y el tiempo de riego.

Es importante conocer el bulbo húmedo que generan los emisores del sistema de riego del terreno donde se esté incorporando el riego, ya que gracias a ello podemos optimizar el uso de agua, evitar percolación profunda y obtener un buen diseño del sistema de riego.

La Figura 13 muestra el bulbo húmedo en suelos de textura arenosa y franca a un mismo caudal.

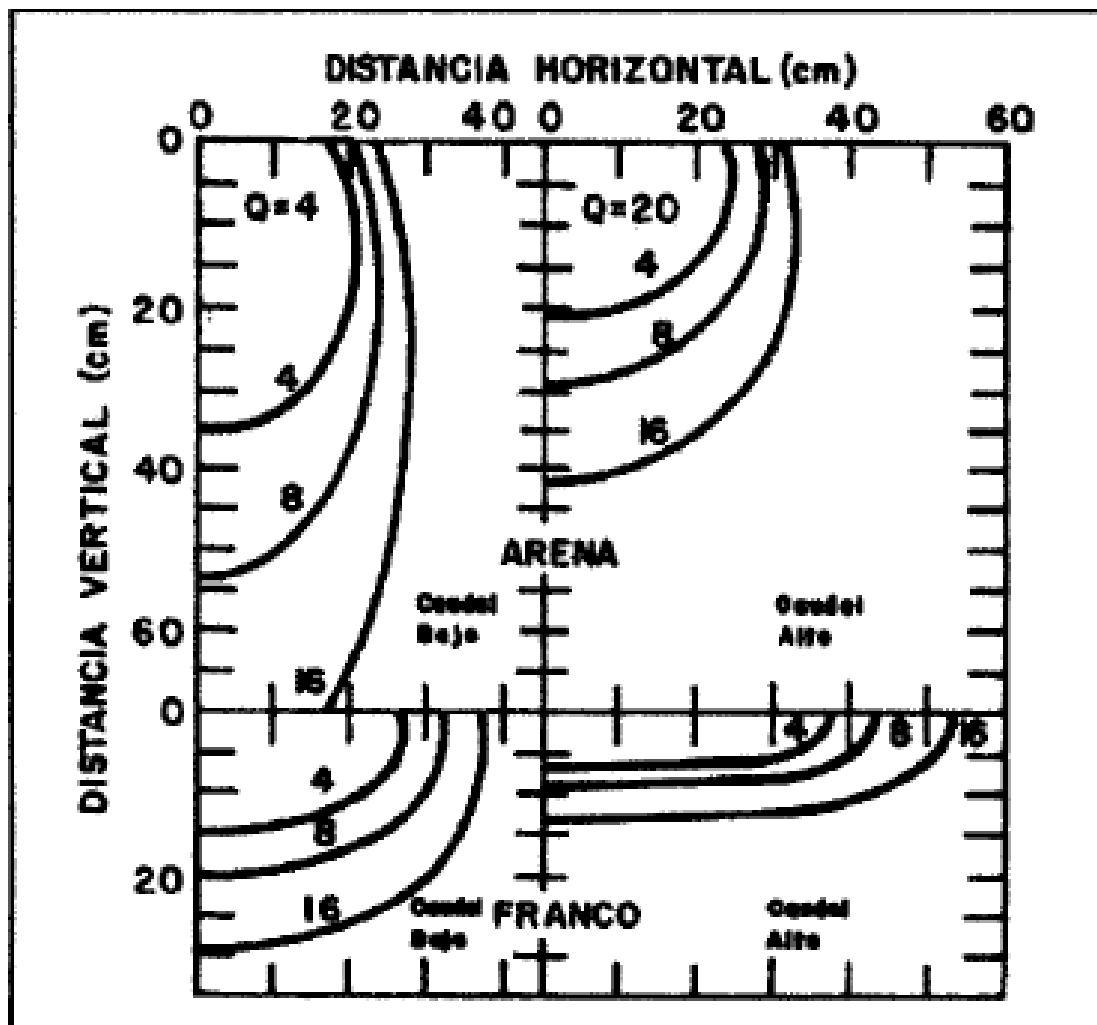


Figura 13. Tamaño del bulbo húmedo en función del caudal del emisor  $Q$  ( $L h^{-1}$ ), textura del suelo y tiempo de riego. Fuente: Ticona, 2013.

Finalizado el riego 6 horas después se procedió a evaluar el bulbo húmedo, mediante calicatas de 50 cm de profundidad luego se procedió a medir las dimensiones del bulbo húmedo con cinta métrica y una regla.

Se registró la distancia horizontal (radio de humedecimiento) y vertical (profundidad del bulbo húmedo). Los resultados obtenidos para 1, 3 y 6 h de

riego y caudales de  $1,1 \text{ L h}^{-1}$ ,  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  y  $2,2 \text{ L h}^{-1}$ , se muestran en las Figuras 14, 15 y 16, respectivamente.

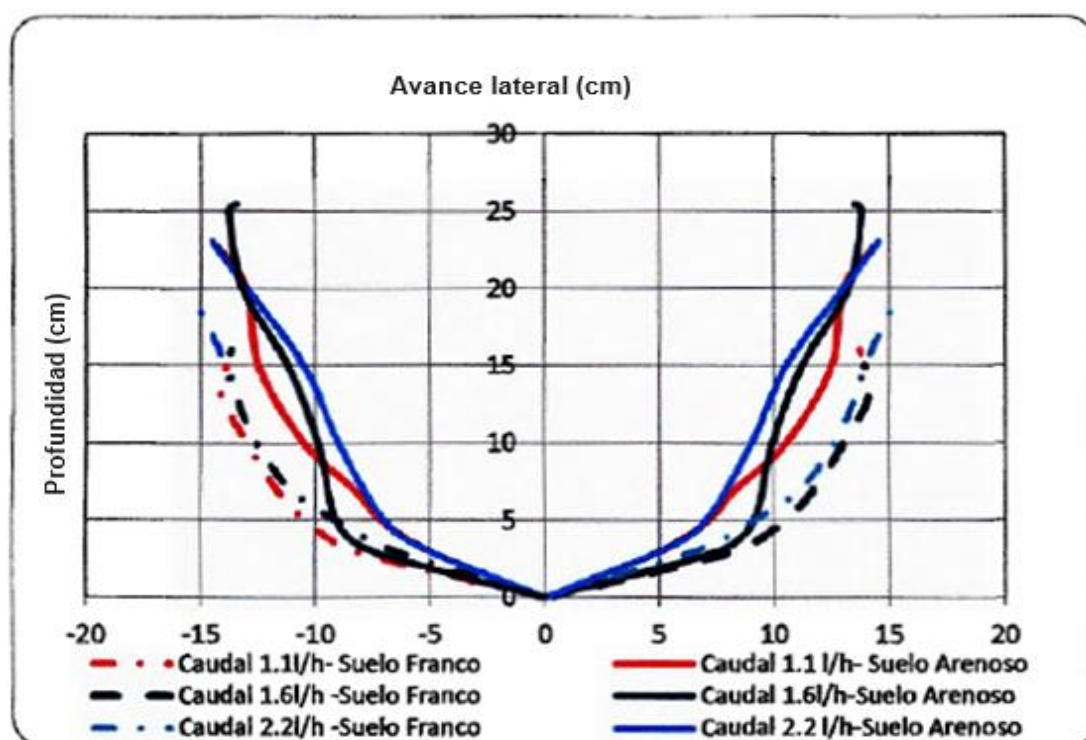


Figura 14. Forma y dimensiones del bulbo húmedo en texturas franca y arenosa, con una hora de riego, aplicando caudales de  $1,1 \text{ L h}^{-1}$ ,  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  y  $2,2 \text{ L h}^{-1}$ . Fuente: Ticona, 2013.

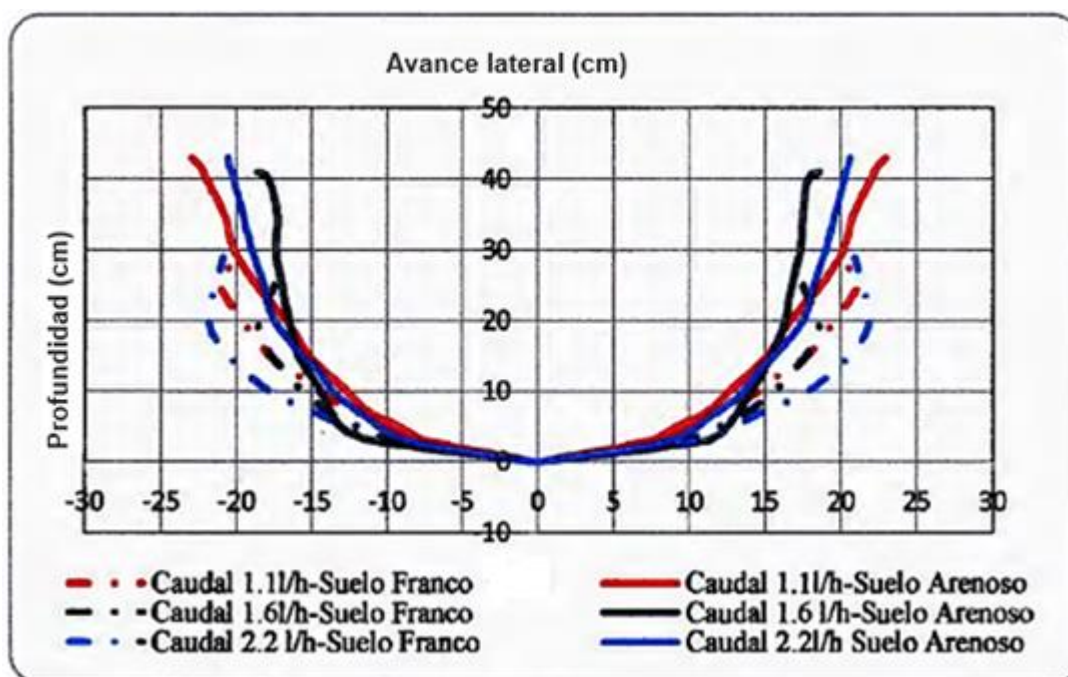


Figura 15. Forma y dimensiones del bulbo húmedo en texturas franca y arenosa, con tres horas de riego, aplicando caudales de  $1,1 \text{ L h}^{-1}$ ,  $1,6 \text{ L h}^{-1}$  y  $2,2 \text{ L h}^{-1}$ . Fuente: Ticona, 2013.

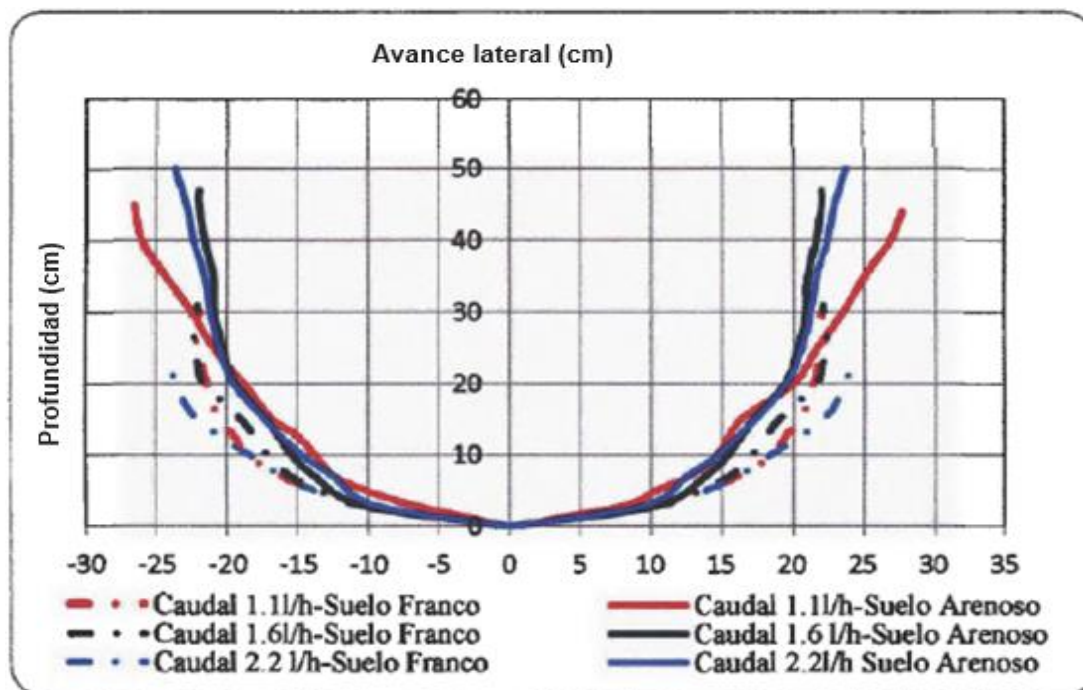


Figura 16. Forma y dimensiones del bulbo húmedo en texturas franca y arenosa, con seis horas de riego, aplicando caudales de 1,1 L h<sup>-1</sup>, 1,6 L h<sup>-1</sup> y 2,2 L h<sup>-1</sup>. Fuente: Ticona, 2013.

De los resultados obtenidos podemos observar en la mayoría de los ensayos el suelo franco posee un radio de humedecimiento mayor que el suelo arenoso, en cuanto a la profundidad de humedecimiento fue mayor en el suelo de textura arenosa por lo que la forma del bulbo húmedo se tornó un elipsoide truncado alargado.

En la Figura 17 se puede observar las dimensiones del radio y la profundidad de humedecimiento del total de tratamientos empleados en Ticona (2013).

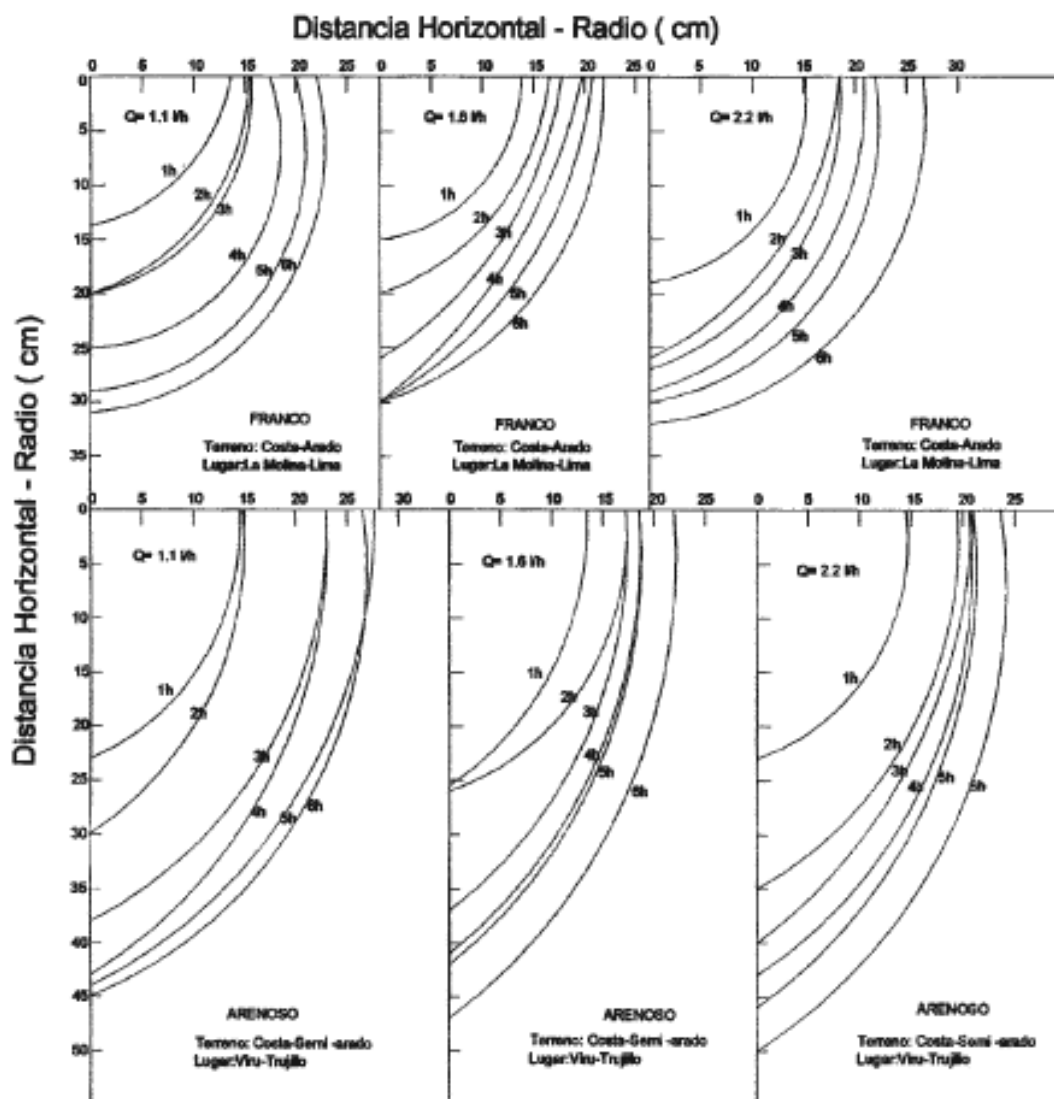


Figura 17. Dimensiones del bulbo húmedo en textura franca y arenosa. Fuente: Ticona, 2013.

Finalmente, del estudio de Ticona (2013) se concluye que para un suelo franco el bulbo humedecido es un elipsoide truncado, y para un suelo arenoso es un elipsoide alargado truncado. Estos resultados permiten determinar la distancia entre emisores y la cantidad de emisores según sea el tipo de suelo.

Siguiendo esta misma línea, en los últimos años existen investigaciones que relacionan el número de laterales, emisores y distancia con respecto al tronco con el área humedecida. Por ejemplo, Reckmann *et al.* (2022) considera que para diseñar un sistema de riego es importante conocer la forma del bulbo húmedo, ya que permite determinar de forma más exacta la distancia entre emisores en la línea de riego y la entre laterales si hay más de uno. La forma del bulbo húmedo depende de factores como el caudal del emisor, tiempo de riego y la textura del suelo, siendo esta última la más importante. La textura del suelo es el factor que más influye en la forma del bulbo húmedo, por ejemplo, en suelos de textura arcillosa el agua tiende a distribuirse más en forma radial por lo que existe una mayor retención de agua, en cambio en suelos de textura arenosa es todo lo contrario predominando el flujo vertical, lo que resulta en un menor diámetro de humedecimiento. Por lo tanto, las líneas de riego y las distancia entre emisores debe ser más próxima en suelos arenosos lo que conlleva a un mayor costo de inversión ya que se necesitarán más emisores que en un suelo de textura arcillosa. En riego por goteo superficial, la forma del bulbo húmedo es esférica y en riego por goteo subsuperficial toma la forma de una elipse truncada, como se muestra en las Figuras 18 y 19, y como se mencionó antes se ven afectadas por la textura de suelo.

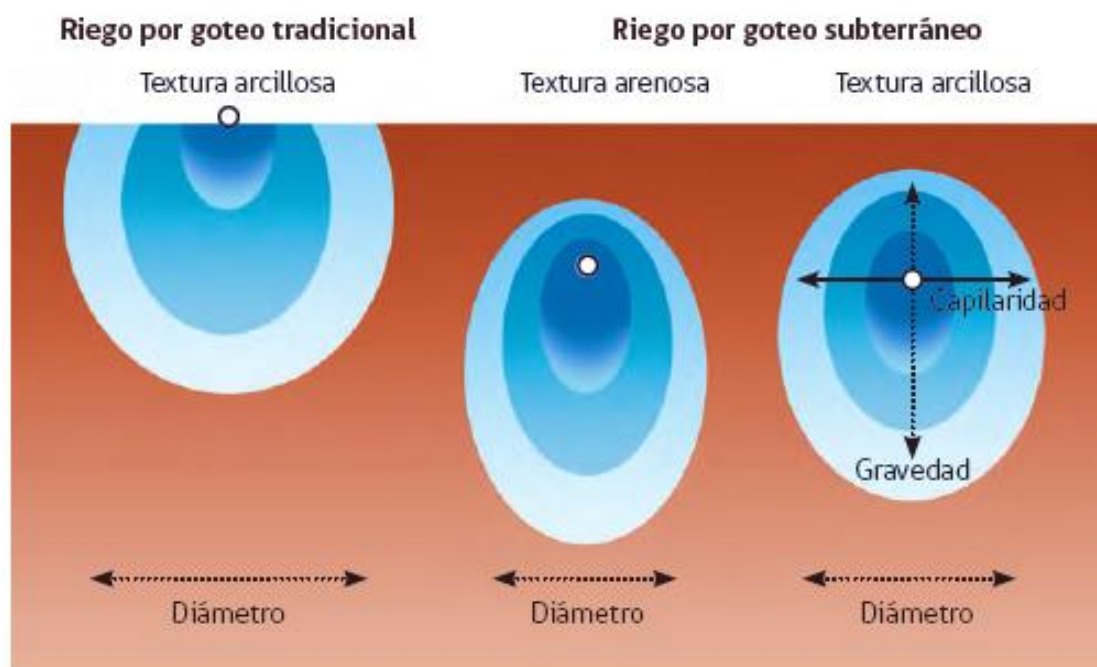


Figura 18. Bulbo de humedecimiento bajo un emisor en riego por goteo tradicional y subterráneo. Fuente: Reckmann *et al.*, 2022.

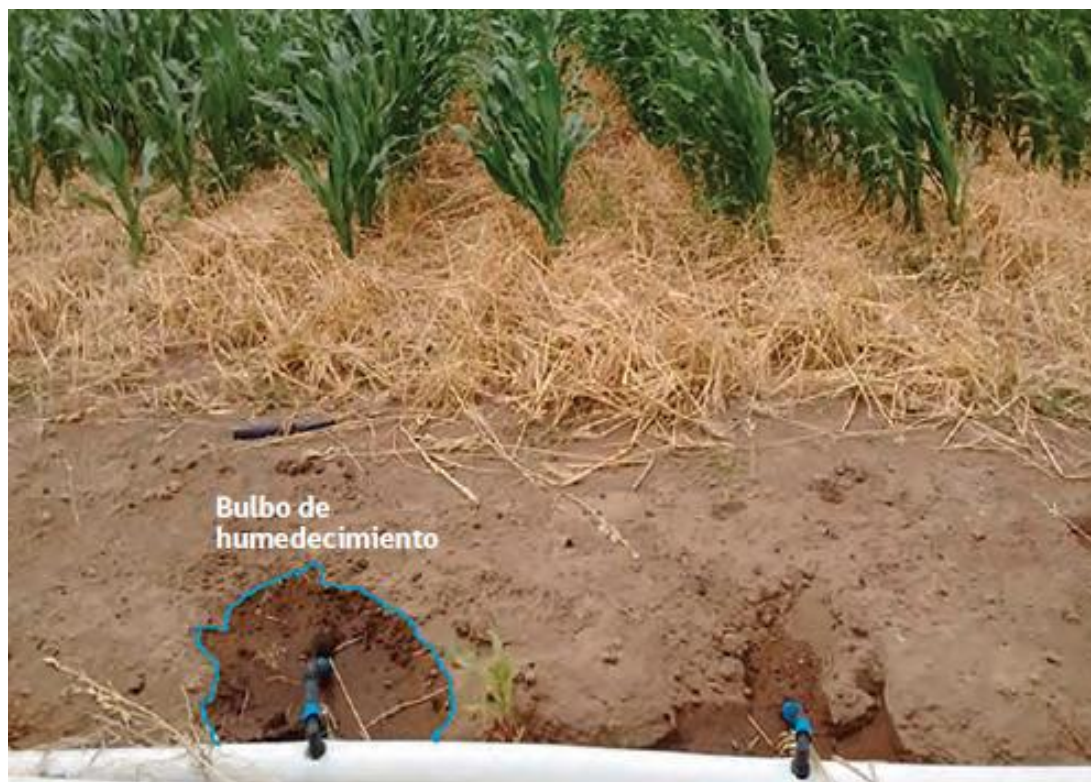


Figura 19. Bulbo húmedo bajo un emisor, para goteo enterrado en un cultivo de maíz. Fuente: Reckmann *et al.*, 2022.

#### 4.2. Uso de Agua y producción.

Quezada (2019) realizó una comparación de riego por goteo superficial y subsuperficial en tomate industrial con nano-burbujas (NB) y sin nano-burbujas. Los resultados revelaron que la producción de tomates fue mayor en el riego con nano burbujas que sin nano burbujas y también fue mayor al regar por goteo de manera superficial que subsuperficial. La diferencia del contenido de humedad en el suelo fue más alto al regar los tomates de manera subsuperficial que superficial.

En general la producción no muestra grandes diferencias entre los sistemas de riego por goteo superficial y subsuperficial, lo que sí es posible establecer es que el cultivo aprovecha de mejor manera el agua disponible en el riego por goteo subsuperficial que superficial, esto asociado a que al estar enterrados los goteros disminuyen las pérdidas por evaporación (aunque no fue medida), sin embargo, esta diferencia no es un factor determinante en la producción de cultivos.

## **5. IMPLEMENTACIÓN DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.**

Antes de implementar cualquier tipo de sistema de riego es necesario tener una serie de antecedentes tales como: Las características físico-hídricas del suelo (capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente, velocidad de infiltración); Evapotranspiración de referencia; Porcentaje de cobertura o sombreado; Volumen de agua que requiere el cultivo; Volumen total a aplicar; Volumen de agua que almacena el suelo; Topografía del terreno; Calidad del agua, ya que todos estos antecedentes tienen un marcado efecto en el diseño final del sistema.

En cuanto a los sistemas de riego por goteo, tanto para superficial y subterráneo, los equipos y accesorios utilizados son similares, los componentes básicos consisten en una bomba, inyector de fertilizante, filtros,

líneas de goteo, emisores y dispositivos de control y monitoreo, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Componentes principales en sistemas de riego por goteo superficial y subterráneo. "X" representa que el sistema de riego por goteo contiene el componente.

Componentes principales	Sistema de riego por goteo superficial	Sistema de riego por goteo subterráneo
1. Emisor	X	X
2. Tuberías	X	X
3. Filtros	X	X
4. Equipo de Inyección de fertilizante	X	X
5. Dispositivos de control y monitoreo (válvulas, manómetros, caudalímetros)	X	X
6. Colector de descarga		X
7. Bomba	X	X

Fuente: Elaboración propia.

La mayor diferencia es el proceso de implementación, según se observa en las Figuras 20 y 21.

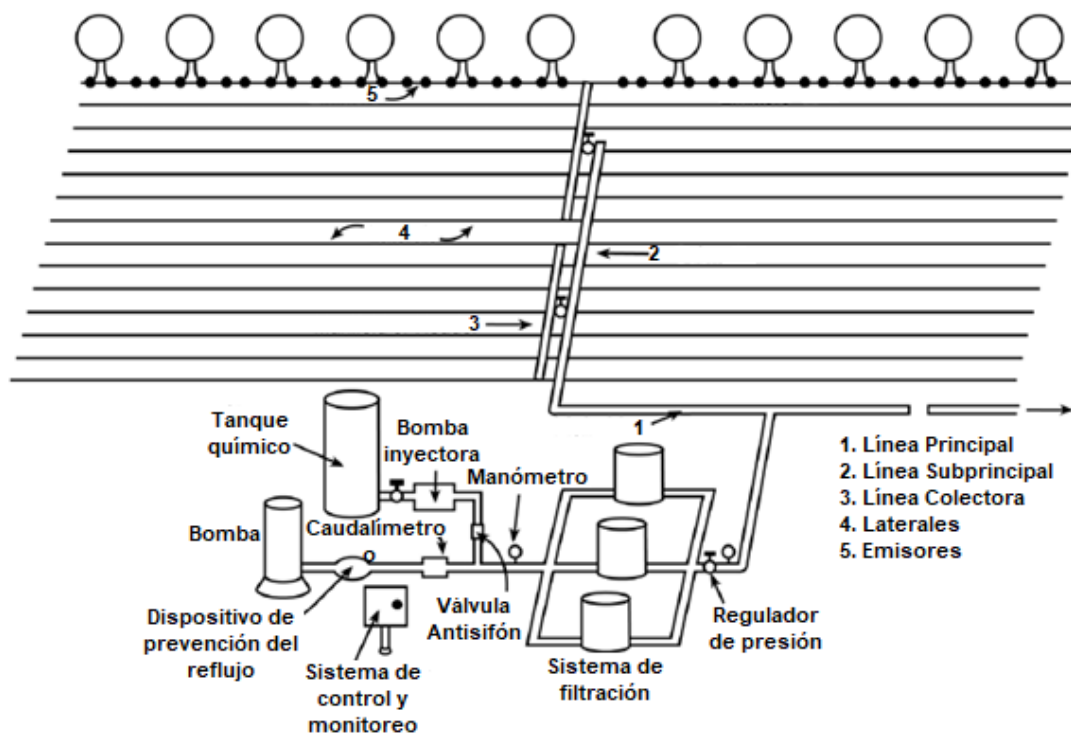


Figura 20. Ejemplo de un sistema básico de riego por goteo superficial. Fuente: Lamm *et al.*, 2006.

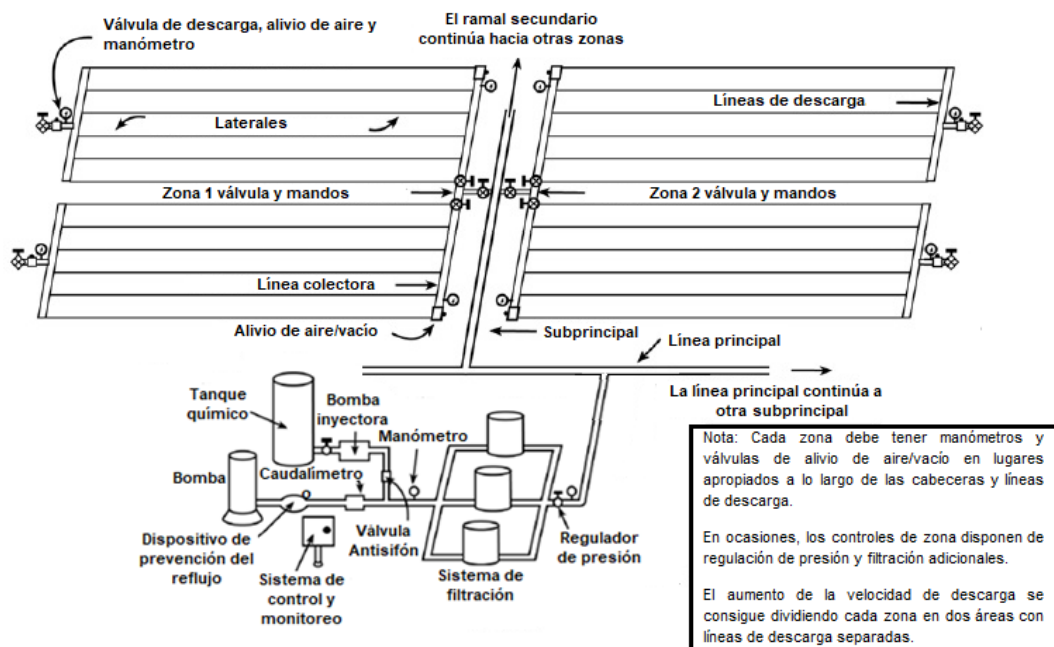


Figura 21. Esquema de un sistema SDI. Fuente: Lamm *et al.*, 2006.

### 5.1. Componentes principales del riego por goteo superficial y subterráneo:

**Tuberías:** Consiste en una red de tuberías de tamaños graduales empezando con una línea principal seguida de líneas secundarias y laterales más pequeñas, las líneas principales y secundarias deben tener salidas con válvula para el lavado periódico de las tuberías (Lamm *et al.*, 2006).

El espaciamiento entre los emisores y la distancia entre las líneas de riego es básico para determinar la tasa de aplicación del equipo de riego, las distancias entre los emisores varían entre 0,1 m a 1,0 m dependiendo de la distancia entre las plantas, en el caso de las líneas de riego no siempre equivale a la separación entre las hileras de cultivo, por ejemplo, en algunos frutales como

paltos, nogales, cerezos, ciruelos, etc., cuyas hileras están separadas a más de 3 m, se tiende a utilizar más de una línea (laterales) de goteo por hilera de plantación.

La pérdida de presión máxima permitida de una subunidad es función de las pérdidas de presión en los laterales, la variación topografía. La variación máxima de presión permitida para determinar el largo de los laterales está asociada al tipo de emisor (Lamm *et al.*, 2006).

En riego por goteo subsuperficial, las líneas de goteo se instalan con un tractor conectado a un arado llamado topo, como se observa en las Figuras 22 y 23, además se debe usar un GPS para que su posición se establezca con precisión, según sea necesario. Los laterales se entierran generalmente a una profundidad entre 30 a 50 cm, suelen ser instalaciones permanentes y generalmente están hechas de tubería plástica de cloruro de polivinilo (PVC), cemento de asbesto o polietileno (PE) (laterales), el grosor de las tuberías juega un papel importante ya que determinará la vida útil del sistema de riego por goteo subterráneo, un mayor grosor implica una mayor vida útil lo que involucra un mayor costo por metro lineal, en la Tabla 7 se muestra más información con respecto a la profundidad de instalación. La cosecha, la textura del suelo, las raíces y la presencia de roedores son las consideraciones principales al determinar la profundidad a la cual se entierra la línea de goteo. Por lo general, los suelos arenosos requieren menor profundidad de instalación debido al tipo de distribución del agua, tal como se mencionó anteriormente.

Tabla 7. Profundidad de instalación de emisores en riego por goteo subsuperficial.

Textura del Suelo	Profundidad de instalación bajo la superficie	Observaciones
Areno-francoso y Franco-arenoso	15 a 20 cm	Estos suelos se benefician con riegos cortos y frecuentes. Se debe regar para rellenar el perfil del suelo solamente hasta la profundidad efectiva. Nótese que en estos suelos el riego por goteo moja solo una estrecha franja bajo las líneas de goteo, y que la capacidad de almacenaje del suelo es pequeña.
Franco-limoso y Franco-Arcilloso	20 a 25 cm	Los riegos pueden ser menos frecuentes; se permite aplicar un mayor volumen de agua en cada riego, pues el agua se expande más lateralmente hacia la zona radicular. La capacidad de almacenaje de agua de estos suelos es alta.
Arcilloso	25 a 30 cm	Los riegos pueden ser menos frecuentes; se permite aplicar un mayor volumen de agua en cada riego, pues el agua se expande más lateralmente hacia la zona radicular. La capacidad de almacenaje de agua de estos suelos es muy alta. Sin embargo, evite condiciones de mal drenaje e inundaciones en la zona de raíces del cultivo.

Fuente: Romero, 2022.



Figura 22. Instalación de laterales de riego por goteo subterráneo por tractor.  
Fuente: Lamm *et al.*, 2006.



Figura 23. Instalación mecanizada de un sistema de riego por goteo subterráneo con arado topo. (Romero, 2022, diapositiva 11)

Emisores: Son el componente principal del riego, cumplen la función de disipar la presión y aplicar una tasa de descarga de agua constante (goteo) en un rango de 0,5 a 8 L h<sup>-1</sup> a lo largo del predio. Existen una diversidad de goteros en el mercado tal como se observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Tipos de goteros.

Autocompensación	<p><u>No autocompensados (non-PC):</u> Diseñados para asegurar una distribución precisa y eficiente del flujo sobre áreas de cultivo relativamente planas.</p> <p><u>Autocompensados:</u> Diseñados para asegurar una distribución precisa y eficiente del flujo sobre toda el área de cultivo, sin que les afecten las fluctuaciones de presión ni los accidentes topográficos.</p>
Emplazamiento en el lateral	<p><u>Gotero de inserción (On line):</u> Los goteros de inserción se instalan en el exterior del lateral.</p> <p><u>Integrales:</u> Los goteros integrales están incorporados en el interior del lateral.</p>
Grosos de pared	<p><u>Paredes delgadas:</u> Funcionan con tuberías integrales de 0,15-0,4 mm de grosor y se usan con cultivos estacionales de hilera a campo abierto</p> <p><u>Paredes medianas:</u> Funcionan con tuberías integrales de 0,5-0,8 mm de grosor y se usan con cultivos en hilera a campo abierto a plazo mediano (5-9 años)</p> <p><u>Paredes gruesas:</u> Funcionan con tuberías integrales de 0,9-1,2 mm de grosor y se usan con cultivos multianuales (más de 10 años) tales como viñedos y plantaciones de frutales</p>

Fuente: Netafim, 2014.

En los sistemas de riego por goteo subterráneo se requieren goteros autocompensados y antisucción, pero también los hay con repelente de raíz tal como se muestra a continuación en las Figuras 24 y 25.

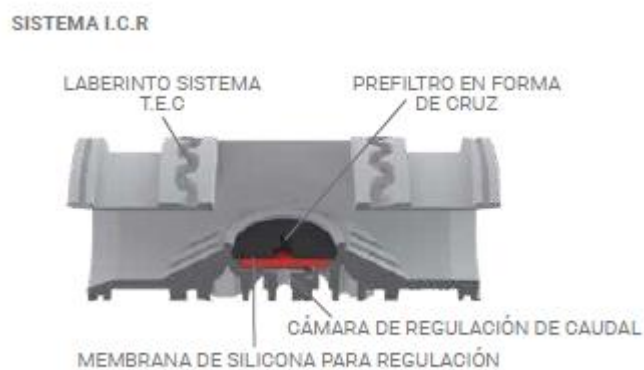


Figura 24. Gotero antisucción y repelente de raíz. Fuente: Romero, 2022.

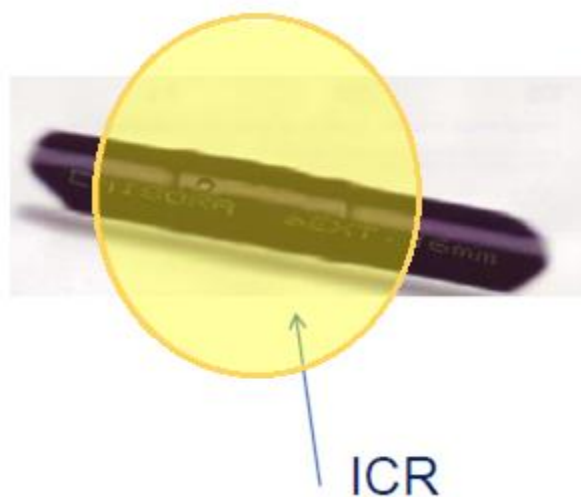


Figura 25. Sistema anti-raíz ICR (inhibidor del crecimiento radicular). Fuente: Romero, 2022.

El sistema ICR corresponde a un herbicida de liberación lenta y baja movilidad en el suelo, incorporado al emisor, que tiene una vida útil de 10 años impidiendo la intrusión de las raíces en el sistema y pérdidas por lixiviación.

Unidad de filtrado y fertilización: Para una buena selección del sistema de filtrado, debemos considerar tamaño y capacidad de este, dependiendo de la calidad del agua, caudal del sistema y tipo de emisor. El sistema de filtros protege el sistema de goteo de arena y otras partículas pequeñas que pueden obturar los goteros de la línea de goteo.

El sistema está diseñado para suministrar fertilizantes ácidos, bactericidas u otros productos químicos a todos los bloques de riego usando un sistema automatizado o una simple bomba de inyección.

Existen una variedad de filtros utilizados en riego por goteo, tales como:

- Filtros de arena
- Hidrociclones
- Filtros de malla
- Filtros de anillas o discos

Bomba: Es la fuente impulsora que debe otorgar presión y caudal de agua suficiente para la correcta operación del sistema. En terrenos planos, la presión de salida requerida de las estaciones de bombeo está dictada principalmente por los requisitos del gotero o emisor, de filtros y tuberías. En terrenos inclinados también se debe considerar la presión requerida para elevar el agua hasta el punto más alto.

Elementos de regulación y control: Son aquellos dispositivos que se ubican en la red de conducción para regular y controlar el flujo de agua dentro de las tuberías, tales como válvulas de control de flujo, manómetros, caudalímetro entre otros.

Además de estos componentes los sistemas SDI a diferencia del riego por goteo superficial poseen:

Válvulas de aire: Impiden la entrada o salida de aire en las tuberías evitando sobrepresiones o vacío en las tuberías. El vacío en las tuberías puede provocar que los goteros succionen partículas de suelo cuando se apague el sistema. Por cada 50 laterales debe haber una válvula de aire y éstas siempre deben ubicarse en los sectores más altos, en riego por goteo subterráneo además debe haber uno ensamblado en la elevación más alta del colector de descarga. Se debe instalar una válvula de aire de doble función en la bomba y normalmente se requiere en la línea principal.

Colectores de descarga: La mayoría de los sistemas SDI permanentes utilizan colectores de descarga para lavar zonas enteras simultáneamente. El montaje y diseño del colector de descarga se observa en la Figura 26.

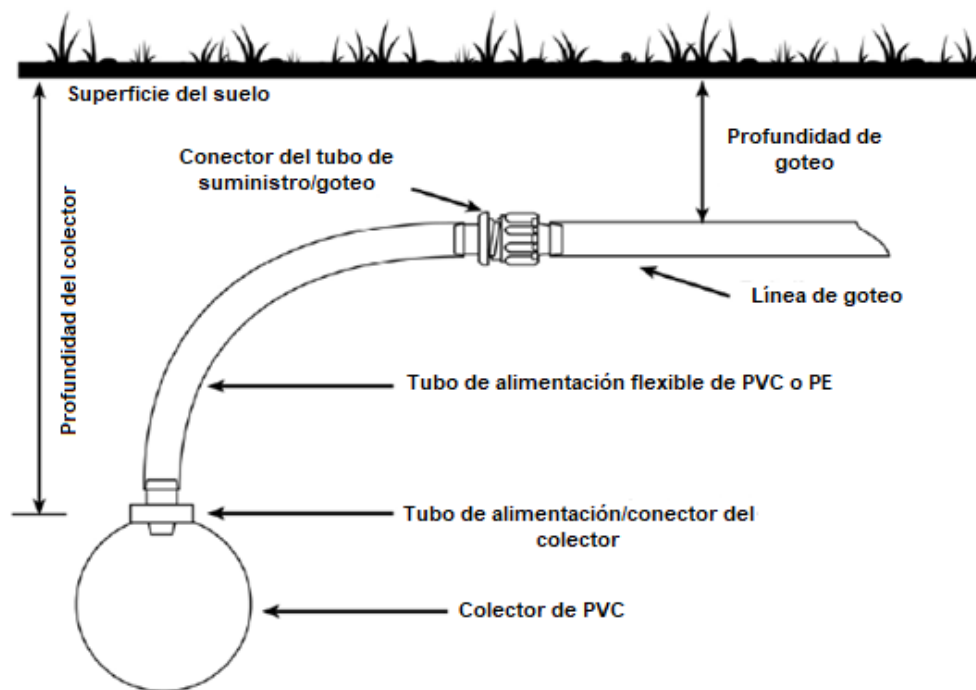


Figura 26. Disposición típica de colector, tubo de suministro, conectores y líneas de goteo para un sistema SDI. Fuente: Lamm *et al.*, 2006.

Un ejemplo de un sistema de riego por goteo subterráneo se puede observar en las Figuras 27 y 28, la primera correspondiente a un proyecto denominado “CANNAVA”, realizado en la provincia de Jujuy, Argentina (Pannunzio, 2022), el cual consiste en una plantación de 55,5 ha de cultivo de cannabis bajo este método de riego.

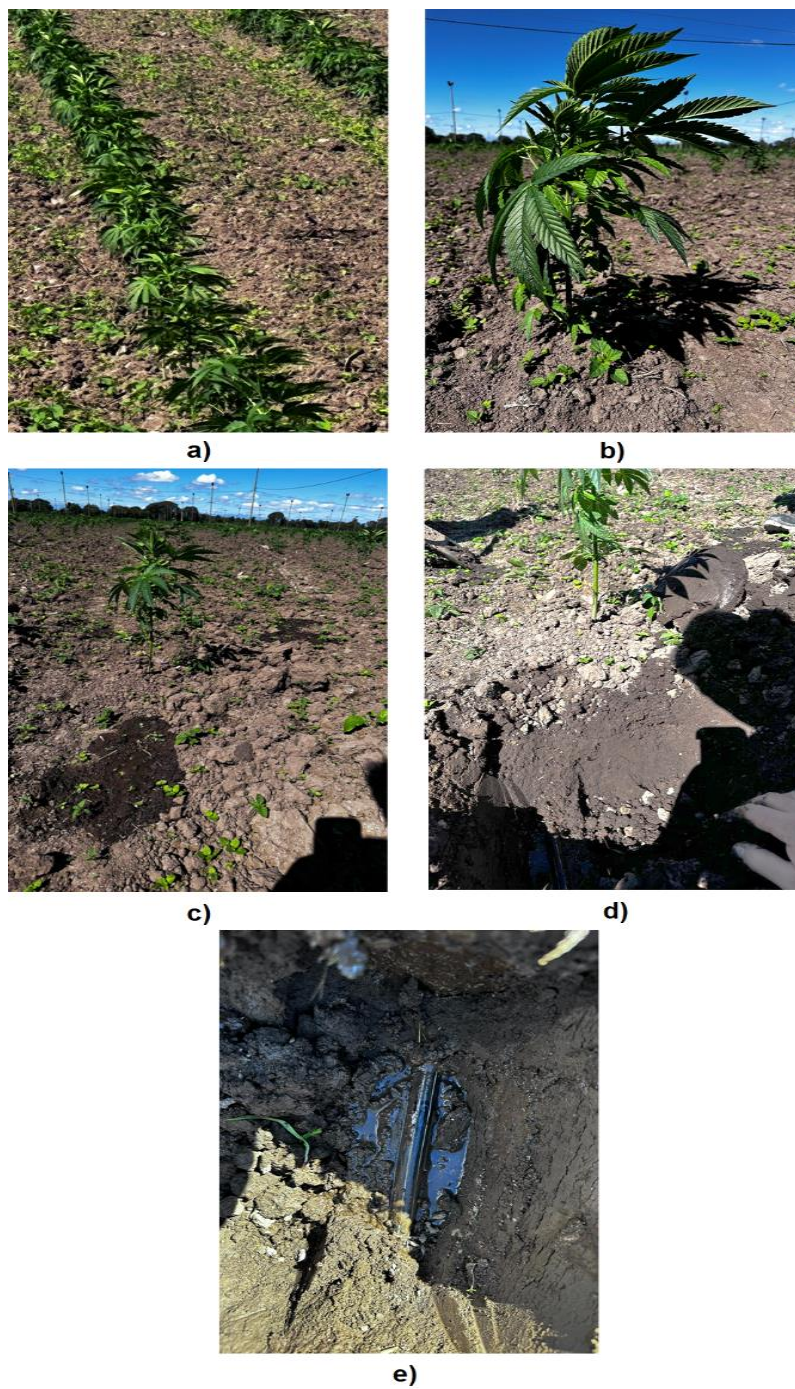


Figura 27. Ejemplo de un sistema de riego por goteo subterráneo. a) Cultivo de Cannabis, b) planta de Cannabis, c) superficie mojada por el gotero, d) ubicación de la tubería del sistema de riego, e) tubería enterrada. Fuente: Pannunzio, 2023.



Figura 28. Sistema de riego por goteo subterráneo, disposición en terreno antes de ser cubierto. Fuente: Reckmann *et al.*, 2022.

Entre las ventajas del sistema de riego subsuperficial sobre el riego por goteo superficial en cuanto a su implementación están:

El uso de aguas residuales para riego está permitido ya que no existe contacto con la superficie evitando la contaminación de los cultivos, personas y animales, también tiene aplicaciones como en jardinería urbana.

Al no humedecerse la superficie, las enfermedades de las plantas (fungosas y bacterianas) son menos frecuentes y se pueden controlar fácilmente y con mayor facilidad, así como la proliferación de malezas.

Reducción de la mano de obra, inconvenientes como la recogida de líneas de goteo (mano de obra) y el almacenaje de las tuberías entre campañas de riego, quedan eliminados.

La realización de las tareas agrícolas como el uso de maquinaria es más sencilla debido a su disposición, se evitan daños por el paso de animales y vandalismo, además al ir enterradas las tuberías estas no se exponen a la radiación solar aumentando la vida útil del sistema de riego.

Algunas desventajas del sistema de riego por goteo subsuperficial sobre el riego por goteo superficial

La intrusión de raíces o roedores en las tuberías genera problemas en el sistema.

Determinar visualmente una falla en el sistema es imposible por lo tanto la única guía son los indicadores de presión y caudal, por ejemplo, en caso de que algún gotero no funcione adecuadamente no existe manera de determinar a cuál corresponde a diferencia del riego por goteo superficial en donde se hacen mantenimientos constantemente y determinar fallas en el sistema es más sencillo.

En el sistema de riego por goteo subsuperficial la rotación de cultivos está limitada ya que al cambiar de cultivo el marco de plantación no necesariamente puede coincidir.

## **6. MANEJO Y MANTENIMIENTO DEL RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL.**

Antes de manejar un sistema de riego por goteo superficial o subterráneo es preciso realizar un programa de riego, este consiste en determinar el inicio del riego, la cantidad de agua a aplicar y el tiempo que estará trabajando el sistema, además de esto el programa debe incluir los tiempos de inyección de fertilizantes, tratamientos de agua y algunas funciones de mantenimiento. La mayoría de las operaciones de mantenimiento se pueden realizar al mismo tiempo en que el sistema esté en marcha, con excepción de algunas como lo son el lavado de líneas, estas requieren de tiempo extra ya que necesitan pasar por un tiempo mínimo necesario para limpiar las líneas de goteo, por lo que debe considerarse dentro de la programación aparte de los requisitos de tiempo normales dedicados al riego.

La mayor diferencia entre el riego por goteo superficial y subsuperficial en el programa de riego son los tiempos de riego, ya que en el riego por goteo subsuperficial los tiempos de riego son menores que en riego por goteo superficial, esto como hemos mencionado anteriormente por el ahorro de agua del riego por goteo subsuperficial, ya que las tuberías al estar enterradas las pérdidas por evaporación disminuyen en comparación con el riego por goteo superficial.

Implementada la programación de riego comienza el proceso de funcionamiento del sistema, este es similar en ambos sistemas de riegos,

superficial y subterráneo. A continuación, se describe brevemente los pasos para el buen manejo del sistema.

- 1.** Antes de poner el filtro en marcha es necesario realizar un dragado al pozo. Un pozo nuevo o uno que ha permanecido sin uso durante la temporada baja, puede descargar arena en la puesta en marcha, lo cual puede provocar una sobrecarga del sistema de filtración haciendo que en repetidas ocasiones se desencadene un ciclo de autolavado improductivo.
- 2.** Limpieza de las tuberías laterales y principales antes de poner en marcha el sistema. En sistemas nuevos, durante la instalación, es posible que la suciedad y las piezas de PVC se acumulen en el sistema, éstas deben ser eliminadas adecuadamente. Durante la temporada de cultivo, los sistemas deben lavarse regularmente. Se debe comprobar si hay fugas en los laterales de la línea de goteo. Los laterales ocasionalmente se dañan durante la instalación (riego superficial).
- 3.** Hay que hacer funcionar el sistema hasta que esté totalmente presurizado y se descargue todo el aire.
- 4.** Comprobar que todos los componentes del sistema funcionen correctamente: bombas, caudal de los emisores, controladores, válvulas, reguladores de presión, medidores, contadores de agua, sistema de filtros e inyectores de fertilizantes.

5. Elaboración de un registro de las lecturas de todos los manómetros y medidores de flujo comprobando la frecuencia del ciclo de retro lavado de sus filtros.

Un buen funcionamiento requiere una evaluación constante de la uniformidad del sistema de goteo, para ello es necesario medir constantemente presión y caudal, ambos factores dan una buena idea del rendimiento del sistema. Medir la presión en varios puntos del sistema de goteo y compararla con la presión de diseño, es la forma más sencilla de evaluar el funcionamiento del equipo. Una buena evaluación incluirá mediciones de presión en un mínimo de tres puntos a lo largo del extremo de la cabecera del campo y tres puntos en el extremo de fondo del campo. Para conocer el caudal se debe leer el medidor de agua o calcular el flujo del sistema y comparar el resultado con el caudal de diseño. El diseño del sistema debe incluir un caudal previsto del sistema y el caudal medido debe estar dentro de  $\pm 5\%$  de la tasa diseñada. Durante la temporada de cultivo, los cambios en la tasa de flujo o la presión en el sistema se pueden utilizar para diagnosticar problemas con el mismo.

En riego por goteo subsuperficial la evaluación de los goteros no se puede realizar ya que no hay manera exacta de saber que gotero es el que está fallando, en cambio en riego por goteo superficial, además de medir caudal y presión se puede hacer una inspección visual general de los goteros.

La Tabla 9 detalla algunos de los problemas que pueden diagnosticarse mediante el monitoreo de la presión y el caudal del sistema.

Tabla 9. Problemas diagnosticados a través del caudal y la presión del sistema.

Síntoma	Posible Problema
Disminución gradual del caudal	Obstrucción de gotero Posible desgaste de la bomba (verifique la presión)
Disminución repentina del caudal	Válvula de control atascada Falla en el suministro de agua
Aumento gradual en el caudal	Daño progresivo en la línea de goteo por plagas
Aumento repentino del caudal	Lateral, línea principal rotos Fallo del regulador de presión
Gran caída de presión a través de los filtros	Acumulación de residuos en filtros Limpieza inadecuada de los filtros
Disminución gradual de presión en la entrada del filtro	Degaste de la bomba o problemas de suministro de agua
Disminución repentina de presión en la salida del filtro	Lateral o línea principal rotos Fallo del regulador de presión o en el suministro de agua
Aumento gradual de presión en la salida del filtro	Obstrucción de gotero
Aumento repentino de presión en la salida del filtro	Válvula de control atascada Otras restricciones de flujo
Disminución repentina de presión en la línea principal	Lateral dañado o roto

Fuente: Netafim, 2014.

El mantenimiento del sistema se centra en la identificación de los factores que pueden conducir a la reducción del rendimiento del sistema de goteo, y los procedimientos para mitigar estos impactos negativos. Los factores que pueden retardar o detener el flujo a través del sistema de goteo, puede requerir tratamiento de agua y un programa sistemático para el mantenimiento regular.

### **6.1. Problemas potenciales que pueden afectar negativamente al sistema de riego por goteo:**

Calidad del agua:

Cuando el agua posee una salinidad alta, en el riego por goteo superficial las sales se filtran entorno al bulbo húmedo, el problema es que ante posibles eventos de lluvia las sales podrían infiltrarse hacia la zona de las raíces del cultivo, una solución a esta problemática sería el control a través del riego durante o después del evento.

Según la fuente del agua de riego, ya sea superficial o subterránea se podrán asociar los problemas potenciales de obstrucción del gotero. En general, las algas y el crecimiento bacteriano suelen asociarse con el uso de agua superficial. El agua subterránea, por otra parte, puede contener altos niveles de minerales que pueden dificultar la función del gotero.

Tabla 10. Problemas comunes de la calidad del agua en el riego por goteo.

Propiedad	Concentración (ppm)		
	Bajo	Moderado	Severo
<u>Físicas</u>			
Sólidos suspendidos filtrables.	menor que 50	50 a 100	más que 100
<u>Químicas</u>			
PH	menor que 7	7 a 7,5	mayor que 7
Sólidos disueltos	menor que 500	500 a 2000	mayor que 2000
Manganeso	menor que 0,1	0,1 a 1,5	mayor que 1,5
Fierro <sup>1</sup>	menor que 0,1	0,1 a 1,5	mayor que 1,5
Sulfuro de hidrógeno	menor que 0,5	0,5 a 2	mayor que 2
Dureza	menor que 150	150 a 300	mayor que 300
<u>Biológicas</u>			
Población de bacterias	< 10.000	10.000 a 50.000	Mayor a 50.000

<sup>1</sup> bajo condiciones favorables de pH, temperatura, aireación y población bacteriana, concentraciones de Fe de 0,05 ppm pueden resultar en obstrucciones serias de los emisores. Fuente: Zazueta, F. (1992).

#### Sólidos suspendidos:

Los sólidos suspendidos en el agua es lo que más afecta al sistema de goteo y lo más fácil de controlar. En primera instancia está el sistema de filtraje y posteriormente existen goteros que tiene un filtro integrado en la unidad para evitar que las partículas suspendidas queden atrapadas en el laberinto. Este filtro se encuentra en la parte inferior del gotero y apunta hacia el centro de la tubería de goteo de modo que se puede limpiar mediante el lavado de la línea de goteo. Por tanto, la mayor parte del agua usada para riego por goteo debe filtrarse para eliminar partículas sólidas suspendidas que pueden alojarse en los goteros y reducir o incluso detener el flujo.

#### Precipitación química:

La obstrucción química generalmente resulta de la precipitación de uno o más de los siguientes minerales: calcio, magnesio, hierro o manganeso. Los minerales se precipitan de la solución y forman incrustaciones que pueden bloquear parcial o completamente el flujo de agua a través del gotero. El agua con cantidades significativas de estos minerales y un pH mayor de siete puede tapar goteros.

#### Crecimiento bacteriano:

Un sistema de riego por goteo puede proporcionar un ambiente favorable para el crecimiento bacteriano, resultando en la acumulación de limo. Este limo se mezcla con partículas minerales en el agua y forma acumulaciones lo suficientemente grandes como para tapar los goteros.

Intrusión de raíces:

Este es un problema específicamente de riego por goteo subsuperficial, las raíces de la plantación tienden a crecer hacia las áreas del suelo que tengan mayor contenido de agua, debido a esto, las raíces pueden obstruir los goteros. El problema se torna más agudo cuando el riego no es suficiente para cubrir las necesidades de la planta. Este es un problema específico de los sistemas que no se usan durante parte de la temporada. Se pueden emplear estrategias para reducir la posibilidad de intrusión de raíces tales como:

Riegos cortos y frecuentes mantendrán el agua adecuada en la zona de las raíces, lo que evitará que estas crezcan hacia las tuberías.

Inyección de ácido que disminuya el pH a menos de cuatro reducirá el crecimiento de raíces y se puede utilizar para limpiar las raíces de goteros que tengas pequeñas cantidades de intrusión de raíz.

## **6.2. Procedimientos de mantenimiento**

Mantenimiento del filtro:

Los filtros son la primera línea de protección para el sistema de goteo y necesitan mantenimiento regular para operar a un nivel alto. De forma semestral, se debe comprobar el sistema a medida que completa un ciclo de retrolavado, también que todas las presiones se encuentren dentro de los límites del sistema antes y después del retrolavado, cerciorarse del funcionamiento de las válvulas de retrolavado, los interruptores diferenciales de presión y el controlador, de limpiar el filtro de comandos y al final de la

temporada, por ejemplo de poseer un filtro de arena comprobar el nivel de arenas en los tanques de arenas, en el caso que fuera un filtro de discos, la suciedad puede acumularse en los filtros de disco y los discos pueden necesitar ser limpiados con ácido.

Lavado de la línea de goteo:

Para minimizar la acumulación de sedimentos, se recomienda el lavado regular de las tuberías de riego por goteo. El diseño del sistema debe ser tal que se pueda obtener una velocidad de descarga mínima de  $0,3 \text{ m s}^{-1}$  en las líneas. Las válvulas de lavados deben ser de un tamaño adecuado para permitir una velocidad de flujo suficiente y se instalan en los extremos de las líneas.

El lavado de las líneas laterales de goteo debe continuar hasta que fluya agua limpia de la línea lavada durante al menos dos minutos. Un programa regular de mantenimiento de inspección y lavado ayudará significativamente a prevenir la obstrucción del gotero.

Tratamiento químico:

El tratamiento químico se requiere a menudo para prevenir la obstrucción del gotero debido al crecimiento microbiano y/o la precipitación mineral. La fijación de partículas inorgánicas al limo microbiano es una fuente significativa de obstrucción del gotero. La cloración es una medida eficaz contra la actividad microbiana, por otro lado, la inyección ácida puede eliminar depósitos de

incrustaciones, reducir o eliminar la precipitación de minerales y crear un ambiente no apto para el crecimiento microbiano.

Para que funcione bien el sistema de riego por goteo es primordial el mantenimiento y gestión del sistema, mediante su evaluación constante, el mantenimiento posee componentes estratégicos (a largo plazo) que incluyen controles fuera de temporada y reparaciones necesarias, y tácticos (corto plazo) como el registro de caudalímetros, manómetros, inyección de fertilizante, tratamientos de agua y limpieza frecuente de filtro y líneas.

Cabe señalar que, aunque se realice un buen mantenimiento es imposible presagiar las fallas, el mantenimiento preventivo puede minimizarlo este tipo de situaciones, pero de todas maneras se debe considerar tiempo para realizar reparaciones y/o reemplazos de ser necesario del equipo táctico de emergencia.

## **7. COSTO DEL RIEGO POR GOTEO**

Los costos que conllevan los sistemas de riego por goteo deben considerar factores como: la dimensión del terreno, el tipo de cultivo, condiciones climáticas, entre otras.

### **7.1. Costos Fijos**

Corresponde a los costos que deben pagarse anualmente, tales como un préstamo o el costo de oportunidad del capital de inversión, la depreciación,

impuestos y/o seguros. Los costos fijos anuales, en general, son superiores que los costos de otros sistemas de riego más comunes.

## **7.2. Costos Variables**

Los costos variables son aquellos correspondientes al uso de agua, energía, mano de obra, materiales, entre otros.

Tanto en riego por goteo superficial como en riego por goteo subterráneo los costos relacionados con la mano de obra pueden verse reducidos con la programación de riego, contrario a ello los costos asociados a los materiales, ya que depende de que tan frecuentes sean los mantenimientos y reparaciones que puedan presentarse, respecto a los costos de energía, suelen ser inferiores debido a que las presiones de trabajo son menores en comparación a otros sistemas de riego, por último, en cuanto a los costos correspondientes al uso de agua, estos disminuyen con los sistemas de riego presurizados, sin embargo los sistemas SDI poseen un ahorro de agua mayor que en los sistemas de riego por goteo superficial, el cual se ve reflejado en el saldo final.

## **7.3. Comparación de costos de inversión inicial del riego por goteo superficial y subterráneo.**

Se evaluaron tres opciones de diseño de un equipo de riego por goteo en la empresa Riego Chile, para una plantación de 15,52 ha de cerezos, con un marco de plantación de 5,0 m entre hilera y 3,0 m sobre hilera. El sistema

además incluye dos líneas de riego por hilera, con goteros separados a 0,50 m y caudales de 2,2 L h<sup>-1</sup> respectivamente.

El primer diseño corresponde a un sistema de riego por goteo superficial tradicional con las líneas de goteo ubicadas sobre la superficie.

El segundo diseño corresponde a un sistema de riego por goteo subterráneo con las líneas de goteo enterradas y con colectores finales para el lavado de las líneas.

El tercer diseño corresponde a un sistema de riego por goteo subterráneo sin colectores de descarga con las líneas de goteo enterradas, sin embargo, en vez de colectores de descarga, el final de cada lateral se ubica en la superficie para el lavado de las líneas.

Como se ha mencionado anteriormente el riego por goteo superficial y subterráneo comparten materiales y equipos con excepción de que en riego por goteo subterráneo existen los colectores de descarga que permiten el lavado simultáneo de las líneas y emisores especiales con tecnología antisucción y antiraíz que no posee el riego por goteo tradicional superficial.

Tabla 11. Materiales y equipos valorados dentro de la cotización para riego por goteo superficial y subterráneo.

Materiales y equipos
1. Matrices, submatrices y fittings de riego.
2. Válvulas hidráulicas de comando eléctrico y cableado.
3. Válvula de aire.
4. Equipo de bombeo.
5. Filtro de anilla automático.
6. Tablero de distribución de fuerza y control.
7. Programador.
8. Caudalímetro.

Bajo estas mismas condiciones se estimó el valor por hectárea de los sistemas de riego para las tres opciones. En la Tabla 12 se entregan los valores por hectárea y en la tabla 13 las diferencias de costo entre los diferentes sistemas de riego por goteo.

Tabla 12. Costo de inversión inicial por hectárea de los diferentes sistemas de riego.

Sistema de riego por goteo	Precio (\$/ha)
Superficial tradicional	3.515.507
Subterráneo con colector de descarga	5.193.489
Subterráneo sin colector de descarga	4.793.864

Tabla 13. Diferencias de costos de inversión inicial por hectárea entre las diferentes alternativas de riego por goteo.

Diferencia de costo entre los sistemas de riego por goteo	Precio (\$/ha)
Superficial tradicional y Subterráneo con colector de descarga	1.677.981
Superficial tradicional y Subterráneo sin colector de descarga	1.278.357
Subterráneo con colector de descarga y Subterráneo sin colector de descarga	399.625

La diferencia de costos de inversión inicial entre el riego por goteo superficial tradicional y el riego por goteo subterráneo con y sin colector de descarga no considera la habilitación y relleno de zanjas, tampoco cuantifica los costos de manejo ya que no hay antecedentes al respecto.

## 8. CONCLUSIONES

Se realizó un análisis comparativo del sistema de riego por goteo superficial y subterráneo mediante una revisión bibliográfica. Del análisis realizado se puede concluir que:

- Determinar el frente de humedad del suelo que genera un emisor ya sea en riego por goteo superficial o subterráneo permitirá establecer el espaciamiento entre emisores y líneas de riego, lo que conlleva a un aumento de la eficiencia y uniformidad de aplicación del sistema.
- Aunque no se han evidenciado investigaciones concluyentes en el ahorro de agua por disminución de la evaporación de suelo en riego subterráneo, se cree que este sistema requiere de un menor volumen de agua a aplicar puesto que la evaporación de suelo disminuye al tener los laterales enterrados. Se espera que futuras investigaciones evalúen el ahorro de agua del sistema de riego por goteo subterráneo.
- La principal diferencia de implementación y manejo es que el riego por goteo subterráneo requiere de: emisores antiraíz y antisucción, y un colector de descarga que permita lavar simultáneamente todas las líneas de riego. Si bien esto podría no implementarse es un riesgo a largo plazo por taponamiento de emisores.
- Ambos sistemas de riego poseen un manejo semejante, un buen manejo implica como primer paso tener un programa de riego, la cantidad de agua a aplicar y el tiempo de riego.

- El mantenimiento constante es fundamental para mantener niveles de eficiencia altos, un claro ejemplo es la obstrucción de emisores que afecta directamente a la uniformidad de riego y la aplicación de fertilizantes o químicos.
- La implementación de ambos sistemas de riego por goteo (subterráneo y superficial) implica altos costos de inversión iniciales, sin embargo, si el sistema de riego se maneja de forma adecuada, a largo plazo los beneficios que conllevan podrían justificar esta inversión.
- La adopción de sistemas de riego subterráneo aún es reducida en Chile, debido a la falta de conocimiento con respecto a los efectos productivos y económicos, sumándole el gran costo inicial de inversión, a largo plazo los beneficios podrían justificar esta mayor inversión inicial considerando la alta eficiencia del sistema de riego.

La incorporación de sistemas de riego por goteo subterráneo posee beneficios con respecto al riego por goteo superficial, asociado a la eficiencia en uso del agua, sin embargo, presenta problemas para la evaluación del funcionamiento de los emisores e incremento en los costos de implementación, que es necesario evaluar para considerar su implementación.



6. Honari, M., Ashrafzadeh, A., Khaledian, M., Vazifedoust, M. and Mailhol, J. C. (2017). Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France. *Irrigation and Drainage Engineering*, 143 (7), 04017014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001188](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001188)
7. Holzapfel J. E. y Holzapfel E. (2014). Diagnóstico general de los sistemas de riego. *Revista Frutícola*, 35(1), 24-30.
8. Holzapfel E., Rivera D., Arumí J. L. (9 de marzo de 2020). *Tecnología de manejo de agua: Para una agricultura intensiva sustentable*. Universidad de Concepción.
9. Lagos O., Manríquez C., Contreras J., Valdivia W., Souto C., Pérez A., Murillo H. (2020) *Manual sistemas de riego y manejo hídrico de cultivos: Programa capacitación y transferencia tecnológica en riego para pequeños agricultores en las regiones del Biobío y La Araucanía*. CNR
10. Lamm F. R., Ayars J. E. and Nakayama F. S. (2006). *Microirrigation for crop production*. Elsevier Science. <https://shop.elsevier.com/books/microirrigation-for-crop-production/ayars/978-0-323-99719-5>
11. Monjezi, M. S., Ebrahimian, H., Liaghat, A., and Moradi, M. A. (2013). Soil-wetting front in surface and subsurface drip irrigation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - *Water Management*, 166(5), 272–284. <https://doi.org/10.1680/wama.12.00065>

12. Netafim. (21 de febrero de 2014). *RIEGO POR GOTEO SUBTERRÁNEO*  
*NETAFIM: Realidad versus ficción.*  
<https://www.netafimusa.com/496d66/globalassets/literature-usa/new-folder/ltlb-s-fact-v-fiction-spanish.pdf>
13. Netafim. (10 de agosto de 2015). *Una oferta completa de sistemas de riego: Cubre todas las necesidades de todos los agricultores.*  
<https://www.netafim.ec/assets/files/product-offering-brochure-spanish.pdf>
14. Netafim. (22 de noviembre de 2017). *Operación y mantenimiento del sistema de goteo: Procedimientos recomendados para un sistema de riego por goteo.* <https://www.netafimusa.com/bynder/C210A7CB-3076-4928-874F6E96CFE9DEFA-a012s-drip-system-ops-maint-spanish.pdf>
15. Novagric. (s.f.). *Filtros para riego por goteo.* *Novedades Agrícolas S.A.*  
<https://www.novagric.com/es/riego/materiales-de-riego/filtros-riego-por-goteo>
16. Quezada Henríquez L. A. (2019). *Comparación de riego por goteo superficial y subsuperficial en tomate industrial con y sin nano-burbujas* [Proyecto de título]. Universidad de Concepción.
17. Reckmann, O., Ibarra, D. y Ivelic-Sáez, J. (2022). *CAPÍTULO 5: Diseño de riego subterráneo.* CIREN.  
<https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/68621/Capitulo%205.pdf?sequence=6>

18. Ren, C., Zhao, Y., Dan, B., Wang, J., Gong, J. and He, G. (2018). Lateral hydraulic performance of subsurface drip irrigation based on spatial variability of soil: experiment. *Agricultural Water Management* 204: 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.034>
19. Romero, J. (2022) TERRAM, Riego subterráneo. [Diapositiva de PowerPoint].
20. Romero, J. (2018) Sistema de riego subterráneo TERRAM para cítricos sedientos.
21. Santizo O. (27 de mayo de 2021). *Riego por goteo subterráneo (SDI) en el cultivo de alfalfa.* Netafim. <https://www.netafim.co.cr/4a0c0f/siteassets/webinar-sistema-de-riego-por-goteo-subterraneo-sdi-en-alfalfa-27-mayo.pdf>
22. Singh, D. K., Rajput, T. B. S., Singh, D. K., Sikarwar, H. S., Sahoo, R. N., and Ahmad, T. (2006). Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management*, 83(1-2), 130–134. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.11.002>
23. Ticona Apaza, Y. (2013). *Determinación del bulbo húmedo con goteros de diferente caudal en dos suelos, La Molina -Lima y Viru-Trujillo.* [Proyecto de tesis]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
24. Zazueta, F. (1992). *Microirrigación.* ICFA international, Inc.