

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA  
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO PARA EL  
CULTIVO DE HORTALIZAS EN CASA SOMBRA PARA LA REGIÓN CHOROTEGA Y  
BRUNCA BAJO EL MARCO DEL PROYECTO “MESOAMÉRICA SIN HAMBRE” DE  
LA REPRESENTACIÓN DE FAO EN COSTA RICA

EMMANUEL RODRÍGUEZ BEJARANO

CARTAGO, 2018

INSTALACIÓN Y EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEO PARA EL  
CULTIVO DE HORTALIZAS EN CASA SOMBRA PARA LA REGIÓN CHOROTEGA Y  
BRUNCA BAJO EL MARCO DEL PROYECTO “MESOAMÉRICA SIN HAMBRE” DE  
LA REPRESENTACIÓN DE FAO EN COSTA RICA

Emmanuel Rodríguez Bejarano

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la  
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para  
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

---

MBA. Milton Solórzano Quintana  
Asesor

---

M Sc. Marvin Villalobos Araya  
Director Escuela  
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
CARTAGO, COSTA RICA

2018

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CUADROS .....	iii
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	vii
1. RESUMEN .....	viii
1.1 Resumen .....	ix
1.2 Palabras clave .....	ix
1.3 Abstract .....	x
1.4 Keywords .....	x
2. INTRODUCCIÓN .....	1
2.1 Antecedentes .....	2
2.2 Objetivo general .....	3
2.3 Objetivos específicos .....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA .....	5
3.1 Evaluación de sistemas de riego por goteo .....	6
3.1.1 Concepto de evaluación de riego .....	6
3.1.2 Coeficiente de uniformidad .....	6
3.1.3 Coeficiente de uniformidad de presiones .....	8
3.1.4 Diagnóstico de una baja uniformidad .....	9
3.2 Diseño agronómico .....	11
3.3 Diseño hidráulico .....	30
4. METODOLOGÍA .....	35

4.1	Transmisión de conocimiento .....	36
4.1.1	Elaboración de nomogramas.....	36
4.1.2	Generación de representaciones tridimensionales .....	37
4.2	Evaluación de los sistemas de riego.....	37
4.3	Diseño agronómico .....	38
4.3.1	Pruebas físicas.....	38
4.3.2	Evapotranspiración .....	38
4.3.3	Lámina de riego .....	40
4.4	Diseño hidráulico .....	41
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	44
5.1	Transmisión de conocimiento .....	45
5.2	Evaluación de sistemas .....	46
5.2.1	Análisis de suelos.....	46
5.2.2	Evaluación de eficiencia de goteo .....	47
5.3	Diseño de nuevos proyectos.....	48
5.3.1	Disposición de tuberías .....	48
5.3.2	Evapotranspiración y riego .....	51
5.3.3	Porcentaje de área regada (PAR).....	53
5.3.4	Diseño hidráulico.....	56
6.	CONCLUSIONES .....	57
7.	RECOMENDACIONES.....	59
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	61
9.	ANEXOS .....	64



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1. Valores recomendados de CU. (Pizarro, 1990).....	8
Cuadro 3.2. Clasificación de la uniformidad en función del CVt (Bralts y Kesner, 1983). ....	10
Cuadro 3.3. Rangos óptimos de pH para la producción de vegetales. Fuente (Havlin, 2005).	12
Cuadro 3.4. Interpretación de resultados de salinidad en sitio. British Columbia Ministry of Agriculture (2015). ....	13
Cuadro 3.5. Velocidad del viento en términos generales. ....	19
Cuadro 3.6. Valores de Ksat para distintas texturas de suelo. Fuente: USDA (s.f.).....	27
Cuadro 3.7. Valores de TR en climas húmedos (Pizarro, 1990). ....	28
Cuadro 3.8. Coeficiente K para accesorios plásticos de 2 pulgadas. ....	34
Cuadro 4.1. Datos de entrada establecidos para la elaboración del nomograma. ....	36
Cuadro 5.1. Resultados de análisis físicos 1. ....	46
Cuadro 5.2. Resumen de resultados de evaluación de uniformidad de riego. ....	47
Cuadro 5.3. Corrección de tiempos de riego para los módulos evaluados. ....	48
Cuadro 5.4. Resultados del diseño agronómico.....	51
Cuadro 5.5. Resumen del consumo hídrico para el cultivo del Naranja .....	52
Cuadro 5.6. Cálculo del PAR con ecuaciones de Schwartzmass.....	53
Cuadro 5.7. Segundo cálculo del PAR con ecuaciones de Schwartzmass. ....	55
Cuadro 5.8. Diámetro y caudales de diseño.....	56
Cuadro 5.9. Resumen de pérdidas de presión.....	56

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Coeficiente de uniformidad medido en campo. ....	6
Ecuación 2. Coeficiente de uniformidad de diseño. ....	7
Ecuación 3. Coeficiente de uniformidad de presiones. ....	8
Ecuación 4. Coeficiente de variación de caudales. ....	9
Ecuación 5. Coeficiente de variación de caudales debido a baja uniformidad de los emisores. ....	9
Ecuación 6. Coeficiente de variación de caudales debido a causas hidráulicas. ....	9
Ecuación 7. Coeficiente de uniformidad absoluto. ....	10
Ecuación 8. Corrección por temperatura para lectura de higrómetro. ....	13
Ecuación 9. Porcentaje de material en suspensión a 40 s. ....	13
Ecuación 10. Porcentaje de arena presente en la muestra. ....	13
Ecuación 11. Porcentaje de arcilla presente en la muestra. ....	14
Ecuación 12. Evaporación de referencia por el método de Penman-Monteith. ....	14
Ecuación 13. Presión atmosférica. ....	15
Ecuación 14. Constante psicrométrica. ....	15
Ecuación 15. Promedio de la temperatura. ....	15
Ecuación 16. Presión de saturación de vapor. ....	16
Ecuación 17. Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor. ....	16
Ecuación 18. Presión real de vapor con datos de HR media. ....	17
Ecuación 19. Fórmula de Angstrom. ....	17
Ecuación 20. Radiación solar en un día despejado. ....	17
Ecuación 21. Radiación neta solar. ....	17
Ecuación 22. Radiación neta de onda larga. ....	17
Ecuación 23. Flujo de calor en el suelo mensual. ....	18
Ecuación 24. Ajuste de la velocidad del viento según la altura de muestreo. ....	19
Ecuación 25. Índice térmico mensual. ....	19
Ecuación 26. Índice térmico anual. ....	19
Ecuación 27. Constante dependiente del lugar. ....	20
Ecuación 28. Evapotranspiración potencial mensual. ....	20

Ecuación 29. KL 1. ....	21
Ecuación 30. KL 2. ....	21
Ecuación 31. KL 3. ....	21
Ecuación 32. KL 4. ....	21
Ecuación 33. Evapotranspiración del cultivo localizado. ....	22
Ecuación 34. Lámina neta de riego. ....	22
Ecuación 35. Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo según textura. ....	23
Ecuación 36. Contenido de agua en el suelo en punto de marchitez permanente según capacidad de campo. ....	23
Ecuación 37. Contenido de agua en el suelo a capacidad de campo según textura II. ....	23
Ecuación 38. Contenido de agua en el suelo a punto de marchitez permanente según textura. ....	23
Ecuación 39. Fórmula de Schwartzmass y Zur para bulbo húmedo. ....	25
Ecuación 40. Avance lateral en riego por goteo. ....	26
Ecuación 41. Avance vertical en riego por goteo. ....	26
Ecuación 42. Ciclo de riego. ....	27
Ecuación 43. Lámina bruta. ....	28
Ecuación 44. Requerimiento de lavado de sales en riego. ....	29
Ecuación 45. Densidad de emisores. ....	29
Ecuación 46. Volumen que debe depositar cada emisor. ....	30
Ecuación 47. Tiempo de riego. ....	30
Ecuación 48. Fórmula de Hazen – Williams para pérdidas de presión. ....	31
Ecuación 49. Factor de corrección para $n$ número de salidas. ....	32
Ecuación 50. Presión de entrada. ....	32
Ecuación 51. Presión distal. ....	32
Ecuación 52. Potencia requerida para el bombeo. ....	33
Ecuación 53. pérdidas de presión en accesorios. ....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Bulbos de humedecimiento para diferentes texturas de suelo. Adaptado al español de Reddy (2016).....	24
Figura 5.1. Nomograma para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías de polietileno para 3 diámetros diferentes. Caudal en litros por segundo. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel. ....	45
Figura 5.2. Disposición de cintas de riego en bancales. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD. ....	49
Figura 5.3. Disposición de cintas de riego en macro túnel. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD ....	49
Figura 5.4. Disposición de cintas de riego en Casa Sombra. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD. ....	50
Figura 5.5. Croquis del sistema de riego diseñado en la Finca jilgueros. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD. ....	50
Figura 5.6. Representación gráfica de los Ksat calculados. Fuente: elaboración propia con el software Microsoft Excel 2017.....	54

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Norma ASTM D-422 .....	65
Anexo 2. Coeficientes de cultivo proporcionados por FAO (2006). .....	79
Anexo 3. Porcentaje de suelo humedecido por varios grados de descarga y espaciamiento para un único lateral en línea recta con emisores uniformemente espaciados depositando 40 mm de agua por cada ciclo sobre el área humedecida. Fuente: Keller y Karmelli, 1973.....	80
Anexo 4. Fragmento aportado para la conformación de material didáctico e informe de proyecto. Recopilación de literatura y elaboración propia. ....	81
Anexo 5. Muestra de imágenes generadas con el software SketchUp. Fuente: elaboración propia. ....	102
Anexo 6. Triángulo de texturas y muestras en campo. Fuente: USDA y elaboración propia.	103
Anexo 7. Resumen de análisis de textura para las muestras tomadas en campo. ....	104
Anexo 8. Resumen de características de las cintas de riego seleccionadas. ....	104
Anexo 9. Datos de estaciones meteorológicas proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. ....	105

## **1. RESUMEN**

## 1.1 Resumen

A través de la toma de muestras en campo se logró caracterizar el estado actual de los sistemas de riego presentes en los módulos Casa Sombra del programa desarrollado por FAO, posteriormente, realizar el diseño de nuevos sistemas considerando la información recopilada durante el proceso de evaluación; generando una oportunidad de retroalimentación que contribuye a la producción de sistemas mejor adaptados a las condiciones presentes en campo. Finalmente, se encuentra que los sistemas de riego evaluados son más frecuentemente afectados por problemas de presión y obstrucción que por problemas de conducción, presentando una uniformidad promedio del 80%. Además, se desarrollan dos sistemas de riego socializando las características técnicas de los mismos para asegurar una correcta instalación y operación del equipo.

## 1.2 Palabras clave

Riego por goteo, RLAF, casa sombra, evaluación, uniformidad.

### 1.3 Abstract

The characterization of the actual shade house's irrigation systems was possible through in-field samples acquisition and analysis. Also, these results, gave the parameters for designing new irrigation systems, giving the opportunity to implement the feedback received from the analysis of the installed systems, allowing to generate systems better adapted to the real conditions in field. Finally, it is found that the irrigation systems are very susceptible to develop problems due to pressure lack or drip clogging with a mean irrigation uniformity of 80%. Also, there were designed two irrigation systems, transferring the knowledge necessary to assure the equipment's appropriate installation and operation.

### 1.4 Keywords

Drip irrigation, evaluation, shade house.



## **2. INTRODUCCIÓN**

## 2.1 Antecedentes

El programa Mesoamérica sin Hambre, impulsado por Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) tiene como finalidad erradicar la malnutrición prestando especial atención a impulsar las capacidades de las comunidades, donde la pobreza afecta a la población rural, a fin de aumentar su acceso a los recursos y lograr la seguridad alimentaria sostenible. Como parte de este proceso se ha brindado asistencia técnica y financiera a las comunidades involucradas en el plan, conformadas por los cantones de Buenos Aires, Golfito, Coto Brus de la Región Brunca y Nicoya y Santa Cruz de la región Chorotega.

De este programa se deriva el proyecto “Producción de Hortalizas Bajo Ambiente Protegido y Proceso de Vinculación de Productores Familiares Organizados al Programa de Abastecimiento Institucional y a otros Mercados Locales en Costa Rica”, más adelante abreviado como Programa Casa Sombra, organizado en conjunto por la Representación en Costa Rica de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Instituto Mixto de Ayuda Social (IMAS) y el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), entre otras instituciones del gobierno de Costa Rica. Este consiste en dotar a pequeños agricultores de un ambiente protegido tipo casa sombra donde puedan cultivar hortalizas en zonas de alta radiación solar, cubriendo con sombra un área de 675 m<sup>2</sup> y proveyendo de 551m<sup>2</sup> de área efectiva para la siembra. Sólo en la Región Chorotega pueden contabilizarse 36 beneficiarios y un total de 130 beneficiarios en todo el país distribuidos entre las regiones Chorotega y Brunca, además de nuevos proyectos en la región Huetar Norte. El área total que debe ser revisada en la región Chorotega equivale a 24,3 Ha de terreno bajo Casa Sombra.

La entrega de las Casas Sombra consiste en el diseño de la estructura, diseño del sistema de riego por goteo con fertirriego, la adquisición de los materiales necesarios y el acompañamiento técnico para que los mismos beneficiarios sean quienes construyan la estructura.

El diseño estructural y de riego fue realizado el año 2016 y todo el material fue adquirido a lo largo del mismo año, por lo cual el proyecto es asumido en una etapa avanzada, siendo únicamente necesario brindar el acompañamiento técnico necesario para terminar de instalar los equipos de riego adquiridos, su posterior evaluación en campo y la transmisión de conocimiento

en el uso del sistema de riego a los productores beneficiados. Es en este proceso de instalación, verificación del rendimiento y asesoría que la institución ha solicitado la colaboración de un estudiante de ingeniería agrícola debido a que la conclusión del proyecto se ha visto atrasada por sistemas de riego que no se han terminado de instalar.

Cada proyecto de Casa Sombra incluye un sistema de riego para afrontar el déficit hídrico que se produce durante la época seca en las regiones Chorotega y Brunca. Este sistema está compuesto por una bomba de 1 Hp, tubería de conducción y tubería con goteros integrados de polietileno con sus respectivos accesorios.

Las estructuras se encuentran en zonas geográficamente diferentes, presentando topografías variadas a las cuales se les debe adaptar el sistema de riego, destacando el hecho de que fue creado un único diseño para todas las topografías, condiciones de clima y suelo. Una vez concluida la evaluación de los sistemas se entregarán las recomendaciones, las cuales comprenden la modificación de sectores de riego, instalación de bombeo, cálculo de parámetros agronómicos y asesoramiento en materia de conservación de suelos y buenas prácticas agrícolas. En los casos de nuevos proyectos de Casa Sombra, se colaborará con nuevos diseños específicos para cada proyecto.

## 2.2 Objetivo general

Implementar mejoras al sistema de riego de los módulos de ambiente protegido tipo casa sombra a través de la evaluación de los sistemas actuales, brindando orientación a los beneficiarios de las Regiones Chorotega y Brunca en la instalación y uso adecuados del equipo de riego durante la permanencia del programa en el 2017.

## 2.3 Objetivos específicos

- a. Evaluar cinco de los sistemas de riego por goteo instalados en las Casa Sombra.
- b. Diseñar e instalar los nuevos sistemas de riego necesarios para los proyectos que surjan hasta la conclusión del programa en diciembre del 2017.
- c. Transferir el conocimiento técnico necesario para la operación del sistema de riego a los agricultores beneficiados con el Proyecto Casa Sombra.

- d. Elaborar material didáctico para la Representación de FAO en Costa Rica con las recomendaciones necesarias para alcanzar un uso óptimo del sistema de riego y un manejo responsable del recurso hídrico.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

### 3.1 Evaluación de sistemas de riego por goteo

#### 3.1.1 Concepto de evaluación de riego

Parte del proceso de diseño e instalación de un sistema de riego está compuesto por la evaluación del sistema una vez que ha sido implementado en el campo. Esta evaluación, como explica Pizarro (1990) tiene como fin conocer la eficacia del sistema, identificar problemas y aplicar las medidas necesarias para su solución. En una evaluación son muchos los componentes que pueden ser analizados, pero de una manera generalizada, la evaluación consiste en la toma de muestras de presión y caudal para estimar la variabilidad de las láminas depositadas por distintos emisores. Los resultados que se obtengan de la evaluación permiten tanto mejorar el sistema evaluado como implementar mejoras a los nuevos sistemas que se desarrollen.

#### 3.1.2 Coeficiente de uniformidad

Este índice evalúa la cantidad de agua que ha recibido la parcela en estudio utilizando las medidas recopiladas. La deficiencia de uniformidad ocasiona que algunos sectores de la zona en riego reciban menos agua que otros, por lo que es necesario depositar más agua en general para alcanzar la lámina mínima en las zonas desfavorecidas (Villalobos, 2001). El método de evaluación más popular es el propuesto por Christiansen en 1942 para la evaluación de riego por aspersión (como cita Pizarro, 1990) el cual consiste en la medición del volumen depositado por los emisores de la instalación y estimando un coeficiente como se observa en la Ecuación 1. Merriam y Keller (1973) recomiendan la medición de 16 emisores, es decir, 4 laterales con 4 puntos cada uno, siendo estos los localizados al principio, al final, a 1/3 y a 2/3 de la longitud total, tanto en la múltiple como en el lateral.

$$CU = \frac{q_{25}}{q_a} \dots (1)$$

Donde:

$CU$  = Coeficiente de uniformidad

$q_{25}$  = Caudal medio de los emisores que constituyen el 25 % de más bajo caudal [ml]

$q_a$  = Caudal medio de todos los emisores medidos [ml]

Esta ecuación únicamente contempla los factores hidráulicos que afectan el gotero, es decir, variaciones de caudal. Pizarro (1990) recomienda que se compare el resultado del coeficiente de uniformidad medido en campo contra el coeficiente de uniformidad de diseño, el cual se calcula con la Ecuación 2 o que generalmente se asume como un 90 % de eficiencia. La ecuación anterior es aprobada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (NRCS) y la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE) para su uso como referencia en la evaluación de sistemas de riego. Pizarro (1990) presenta recomendaciones para la selección del grado de uniformidad según el espaciamiento entre emisores, la pendiente del terreno y el clima de la zona, los cuales están recopilados en el Cuadro 3.1.

$$CU = 100 \left( 1 - 1,27 * \frac{CV}{\sqrt{e}} \right) * \left( \frac{Q_{mi}}{Q_m} \right) \dots (2)$$

Donde:

$CU$  = Coeficiente de uniformidad [%]

$CV$  = Coeficiente de variación de los goteros

$e$  = Número de goteros de los que recibe agua cada planta

$Q_{mi}$  = Caudal mínimo del gotero que corresponde a la presión mínima [ml]

$Q_m$  = Caudal medio de todos lo goteros considerados [ml].

Cuadro 3.1. Valores recomendados de CU. (Pizarro, 1990)

Espaciamiento de Emisores	Pendiente (i)	CU	
		Clima árido	Clima húmedo
Emisores espaciados más de 4 m en cultivos permanentes	Uniforme (i < 2 %)	0,90 - 0,95	0,80 - 0,85
	Uniforme u ondulada (i > 2 %)	0,85 - 0,90	0,75 - 0,80
Emisores espaciados menos de 2,5 m en cultivos permanentes o semi permanentes	Uniforme (i < 2 %)	0,85 - 0,90	0,75 - 0,80
	Uniforme u ondulada (i > 2 %)	0,80 - 0,90	0,70 - 0,80
Mangueras o cintas de exudación en cultivos anuales	Uniforme (i < 2 %)	0,80 - 0,90	0,70 - 0,80
	Uniforme u ondulada (i > 2 %)	0,70 - 0,85	0,65 - 0,75

### 3.1.3 Coeficiente de uniformidad de presiones

Los sistemas de riego por goteros son sensibles a las variaciones de presión. En algunos casos es posible medir la presión a la que opera cada gotero evaluado. La Ecuación 3 se utiliza para estimar el coeficiente de uniformidad de presiones.

$$CUp = \left(\frac{P_{25}}{P_m}\right)^x \dots (3)$$

Donde:

$CUp$  = Coeficiente de uniformidad debido a presiones

$P_{25}$  = Media de la presión del 25% de las lecturas menores [mca]

$P_m$  = Media de presiones de todas las lecturas tomadas [mca]

$x$  = Exponente de descarga de los goteros (obtenido del fabricante o estimado)

El valor del coeficiente de uniformidad de presiones debe ser igual o mayor al 90%, los valores entre 80% – 90% se consideran buenos, entre 70% y 80% son aceptables, pero por



debajo del 70% son inaceptables para un sistema de riego por goteo. Este mismo criterio de porcentajes es aplicable a los caudales. (Villalobos, 2010).

#### 3.1.4 Diagnóstico de una baja uniformidad

Una baja uniformidad puede deberse a muchas causas, Pizarro (1990) las agrupa de la siguiente forma:

- Causas hidráulicas: Son todas aquellas que afectan la presión de funcionamiento y pueden deberse a un diseño inadecuado, falta de reguladores de presión, desajustes, etc.
- Baja uniformidad de los emisores: Esto puede deberse a obstrucciones en el sistema o por un deficiente coeficiente de variación (CV) causado por problemas de fabricación.

Bralts y Kesner (como se cita en Pizarro, 1990) proponen un método para identificar la fuente de la baja uniformidad. Este consiste en el cálculo de tres coeficientes: CV<sub>t</sub> que es el coeficiente de variación total de caudales, CV<sub>e</sub> el coeficiente de variación de caudales debido a la baja uniformidad de los emisores y CV<sub>h</sub> que es el coeficiente de variación de caudales debido a causas hidráulicas, los cuales se estiman a través de las ecuaciones 4, 5 y 6, respectivamente.

$$CV_t = \frac{\sigma_q}{q_a} \dots (4)$$

$$CV_h = \frac{\sigma_p}{p_a} \dots (5)$$

$$CV_e = \sqrt{CV_t^2 - x^2 CV_h^2} \dots (6)$$

Donde:

$\sigma_q$  = Desviación típica de la muestra de caudales

$q_a$  = Promedio de caudal recibido por las plantas

$\sigma_p$  = Desviación típica de la muestra de presiones

$p_a$  = Presión media de la muestra

$x$  = Exponente de descarga del gotero

El CVt puede clasificarse según el Cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Clasificación de la uniformidad en función del CVt (Bralts y Kesner, 1983).

$CV_t$	Uniformidad
$> 0,4$	Inaceptable
$0,4 - 0,3$	Baja
$0,3 - 0,2$	Aceptable
$0,2 - 0,1$	Muy buena
$0,1 - 0$	Excelente

Se considera que el CVe debe mantenerse por debajo de 0,2, en caso contrario los emisores son inadecuados (alto CV) o están bloqueados. Si el CVt es inadecuado y el CVe se encuentra por debajo de 0,2; entonces es necesario comprobar cuál factor hidráulico es el que ocasiona problemas.

Finalmente, Medina (1993) propone la Ecuación 7 para estimar el CU absoluto que se trata de una combinación entre la Ecuación 2 y la ecuación propuesta por Keller y Karmelli (1975) para calcular el CU absoluto de diseño pero obviando el peso ocasionado por el CV sobre la eficiencia de riego y manteniendo únicamente el caudal máximo, mínimo y medio.

$$CU_a = \frac{100}{2} * \left( \frac{q_{min}}{q_{med}} + \frac{q_{med}}{q_{máx}} \right) \dots (7)$$

Dónde:

$q_{min}$  = media de los cuatro aforos más bajos [ml]

$q_{máx}$  = media de los dos aforos más altos [ml]

$q_{med}$  = media de los 16 aforos [ml]

Zúñiga propone el siguiente procedimiento para la evaluación de sistemas de riego por goteo (como se citó en Villalobos, 2001):

- a. Hacer un esquema topográfico del campo, ubicando tanto el sistema de riego como otros aspectos de interés.
- b. Anotar las características del suelo y cultivo.
- c. Consultar frecuencias de riego, duración y déficit permisible de humedad.
- d. Determinar presiones de entrada y salida de filtros.
- e. Registrar la descarga del sistema, presiones y diámetros de tuberías en toda la red. Definir cuales sectores de la casa sombra se riegan al mismo tiempo.
- f. Anotar diámetros de lateral, número de laterales en cada tubería de distribución, espaciamiento de laterales, longitud, descarga y presión del lateral.
- g. Anotar las características del gotero, espaciamiento, número por planta, presión, descarga.
- h. Escoger el primer lateral en la tubería de distribución, y localizar 4 goteros. Uno cerca del inicio del lateral, el segundo a la tercera parte del lateral, el tercero a las dos terceras partes del lateral y el último al final del lateral. Esta misma secuencia se utiliza en la tubería de distribución con los laterales.
- i. Para cada gotero se debe de medir el volumen de agua que éste da en un determinado tiempo, y la presión a la cual está trabajando. Los datos de volumen y tiempo se convierten a caudal.
- j. Se deben de registrar las presiones a la entrada y final del lateral, bajo condiciones normales de operación.
- k. La información recolectada se procesa para completar la evaluación.

### 3.2 Diseño agronómico

Los resultados obtenidos de una evaluación de uniformidad no representan el estado total del sistema. Un sistema de riego eficiente no sólo contempla el diseño hidráulico y su comportamiento, sino que también analiza si la disposición utilizada es la adecuada para el tipo de cultivo y método de producción seleccionado para cada proyecto. Es decir, es también obligatorio evaluar la calidad del suelo (pH, salinidad), tiempos de riego y requerimiento

hídricos de la planta y, en el caso específico del riego por goteo, conformación de los bulbos de humedecimiento.

El pH de los suelos limita el tipo de cultivo a establecerse, esto implica que puede llegar a ser necesario la aplicación de químicos modificadores de pH o la implementación de cultivos diferentes que se adapten mejor al pH del suelo disponible. En el Cuadro 3.3 puede encontrarse un ejemplo de guía para la toma de decisiones respecto al pH de un determinado suelo.

Cuadro 3.3. Rangos óptimos de pH para la producción de vegetales. Fuente (Havlin, 2005).

<i>Cultivo</i>	<i>Rango óptimo de pH</i>
<i>Remolacha</i>	6 - 8
<i>Broccoli</i>	6 - 7,5
<i>Repollo</i>	5,8 - 7
<i>Coliflor</i>	6 - 7
<i>Pepino</i>	5,5 - 6,8
<i>Lechuga</i>	6 - 7
<i>Cebolla</i>	6 - 6,7
<i>Tomate</i>	5,5 - 6,8

La salinidad, que se mide como conductividad eléctrica en mili Siemens por centímetro, puede clasificarse según el cuadro proporcionado por el Ministerio de Agricultura de Colombia Británica de Canadá y adjunta en el Cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Interpretación de resultados de salinidad en sitio. British Columbia Ministry of Agriculture (2015).

<i>Salinidad mS/cm</i>	<i>Indicación</i>
0 a 0,75	Muy bajo
0,75 a 2,0	Bajo
2,0 a 3,5	Normal
3,5 a 5,0	Alto
5,0 a 6,0	Muy Alto
> 6,0	Extremo

La textura del suelo es un parámetro que debe conocerse para utilizar los cuadros desarrollados por Keller y Karmeli (1975), además, otros métodos expuestos en este trabajo necesitan la descripción textural del suelo como parámetro de entrada.

La textura del suelo se midió a través de un higroscopio normado siguiendo lo expuesto en la norma ASTM D422 que puede ser consultada en el Anexo 1, la cual define el procedimiento de Bouyoucos para el cálculo de sólidos en suspensión. En este caso, se realizaron lecturas a los 40 s y a las 2 h. Además, la variación de la densidad del agua por la temperatura será estimada a través de un factor de ajuste y no por medio de mediciones en blancos, por lo que las ecuaciones 8, 9, 10 y 11 representan el cálculo del material en suspensión, arena y arcilla respectivamente.

$$\text{lectura higro corregida} = \text{lectura higro} + (\text{lect temp mayor a } 19,4 \text{ } ^\circ\text{C} - 19,4) * 0,3 \dots (8)$$

$$\% \text{material en suspensión} = \frac{\text{lectura higro corregida @ } 40 \text{ s} * 100}{\text{peso de la muestra g}} \dots (9)$$

$$\% \text{arena} = 100 - \% \text{material en suspensión} \dots (10)$$

$$\% \text{arcilla} = \frac{\text{lectura higro corregida } 120 \text{ s} * 100}{\text{peso de la muestr g}} \dots (11)$$

Posteriormente, para el cálculo de las pérdidas hídricas por evapotranspiración, la FAO recomienda utilizar el método de Penman Monteith, el cual necesita de parámetros como velocidad del viento, humedad, temperatura del aire y radiación solar. La ecuación con la que se estima la evapotranspiración de referencia es la Ecuación 12

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \dots (12)$$

Donde:

$ET_o$  = Evapotranspiración de referencia [mm día<sup>-1</sup>]

$R_n$  = Radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]

$R_a$  = Radiación extraterrestre (mm día<sup>-1</sup>)

$G$  = Flujo de calor de suelo [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>]

$T$  = Temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

$u_2$  = Velocidad del viento a 2 m de altura [m s<sup>-1</sup>]

$e_s$  = Presión de vapor de saturación [kPa]

$e_a$  = Presión real de vapor [kPa]

$e_s - e_a$  = Déficit de presión de vapor [kPa]

$\Delta$  = Pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>]

$\gamma$  = Constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>]

Primeramente, deben calcularse los parámetros atmosféricos como la presión atmosférica, la constante psicrométrica, presiones de saturación de vapor de agua y la presión de vapor real.

La presión atmosférica varía a lo largo del tiempo, pero se puede estimar usando la elevación sobre el nivel del mar del lugar en estudio. De igual forma, la constante psicrométrica depende de la presión atmosférica y, por tanto, de la altitud del lugar.

$$P = 101,3 * \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \dots (13)$$

$$\gamma = \frac{c_p * P}{\epsilon \lambda} \dots (14)$$

Donde:

P = Presión atmosférica [kPa]

z = Elevación sobre el nivel del mar [m]

$\gamma$  = Constante psicrométrica [kPa°C<sup>-1</sup>]

$\lambda$  = Calor latente de vaporización, 2,45 [MJ kg<sup>-1</sup>]

$c_p$  = Calor específico a presión constante, 1,013 x 10<sup>-3</sup> [MJ kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>]

$\epsilon$  = Cociente del peso molecular de vapor de agua / aire seco, 0,622

Para el cálculo de la presión de vapor es necesario estimar primero la temperatura media con la Ecuación 15. En este caso, y en los demás parámetros de la ecuación que no son constantes o estables, se deben utilizar los datos según la resolución con la que se recolectaron los datos, es decir, horas, días, semanas o meses. A futuro, cuando se mencione la utilización de un promedio, se referirá a una ecuación con una estructura semejante a esta, es decir, del tipo (n1 + n2) / (N).

$$T_{media} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \dots (15)$$

Donde:

T<sub>media</sub> = Temperatura media [°C]

$T_{\text{máxima}}$  = Temperatura máxima [°C]

$T_{\text{mínima}}$  = Temperatura mínima [°C]

La presión de vapor de saturación se estima con la Ecuación 16 tanto para la temperatura mínima como la máxima y luego se obtiene el promedio entre los dos datos. El cálculo de la pendiente de la curva de saturación con la Ecuación 17 es parecido al cálculo utilizado para la presión de vapor de saturación, en este caso, la temperatura que debe usarse es la temperatura media y no los mínimos y máximos.

$$e^{\circ}(T) = 0,618 * \exp\left(\frac{17,27*T}{T+237,3}\right) \dots (16)$$

$$\Delta = \frac{4098 * \left[0,6108 * \frac{\exp\left(\frac{17,27*T}{T+237,3}\right)}{T+237,3}\right]}{(T+237,3)^2} \dots (17)$$

Donde:

$e^{\circ}(T)$  = Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa]

T = Temperatura del aire [°C]

$\exp(a)$  = 2,7183 (base del logaritmo natural) elevado a la potencia (a)

$\Delta$  = Pendiente de la curva de la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire T [kPa °C<sup>-1</sup>]

La presión real de vapor puede ser derivada de la temperatura del punto de rocío, datos psicrométricos y humedad relativa. Los datos actualmente disponibles corresponden a la media de la humedad relativa. Por lo que la Ecuación 18 no aplica para otro tipo de datos.



$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} e^\circ(T_{media}) \dots (18)$$

Donde:

$e_a$  = Presión de vapor real [kPa]

$HR_{media}$  = Humedad relativa media [%]

$e^\circ(T_{media})$  = Presión de saturación de vapor a la temperatura media del aire [kPa]

La estimación de la radiación extraterrestre y la duración máxima de la insolación son tomados de los cuadros 2,5 y 2,6 presentes en el documento de FAO citado como referencia. Por otra parte, los datos de radiación solar son suministrados, junto con los demás datos meteorológicos, por el Instituto Meteorológico Nacional. Si no se dispone de datos de radiación solar, esta puede ser estimada a partir de la fórmula de Angstrom, que se muestra en la Ecuación 19. La radiación solar en un día despejado se calcula con la Ecuación 20, la radiación neta solar se calcula con la Ecuación 21 y la radiación neta de onda larga con la Ecuación 22.

$$R_s = \left( a_s + b_s * \frac{n}{N} \right) R_a \dots (19)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \dots (20)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \dots (21)$$

$$R_{nl} = \sigma \left( \frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \dots (22)$$

Donde:

$R_s$  = Radiación solar de onda corta [ $MJ m^{-2} día^{-1}$ ]

$a_s$  = Constante, se recomienda un valor de 0,25

$b_s$  = Constante, se recomienda un valor de 0,50

$R_{so}$  = Radiación solar en un día despejado [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$z$  = Elevación de la estación sobre el nivel del mar [m]

$R_a$  = Radiación extraterrestre [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$R_{ns}$  = Radiación de onda corta [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$\alpha$  = albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0,23 para el cultivo hipotético

$R_s$  = Radiación solar entrante [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$R_{nl}$  = Radiación neta de onda larga [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann,  $4,93 \times 10^{-9}$  [ $\text{MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$T_{\max}$  = Temperatura máxima absoluta [K]

$T_{\min}$  = Temperatura mínima absoluta [K]

$e_a$  = Presión de vapor real [kPa]

$R_s/R_{so}$  = Radiación relativa de onda corta

El flujo de calor en el suelo para datos mensuales se calcula con la Ecuación 23.

$$G_i = 0,14(T_i - T_{i-1}) \dots (23)$$

Donde:

$G_i$  = Flujo de calor en el mes [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ]

$T_i$  = Temperatura del mes en cálculo [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{i-1}$  = Temperatura del mes anterior [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Finalmente, la velocidad del viento si no es medida a 2 metros del suelo debe ajustarse con la Ecuación 24.

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)} \dots (24)$$

Donde:

$u_2$  = Velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie [ $m s^{-1}$ ]

$u_z$  = Velocidad del viento medida a z metros sobre la superficie [ $m s^{-1}$ ]

z = Altura de medición sobre la superficie [m]

En caso de no disponer de acceso a datos de la velocidad del viento, es posible utilizar el Cuadro 3.5, proporcionado por FAO, para estimar una velocidad del viento.

Cuadro 3.5. Velocidad del viento en términos generales.

<i>Descripción</i>	<i>Velocidad media mensual del viento a 2 m de altura</i>
<i>Vientos suaves</i>	$\leq 1,0 m s^{-1}$
<i>Vientos suaves a moderados</i>	1 - 3 $m s^{-1}$
<i>Vientos moderados a fuertes</i>	3 - 5 $m s^{-1}$
<i>Vientos fuertes</i>	$\geq 5,0 m s^{-1}$

Otro método comúnmente utilizado para el cálculo de la evapotranspiración potencial es el Método de Thornwaite, el cual estima la evapotranspiración a través de un índice de calor y posteriormente realiza un balance hídrico como complemento al estudio. Las ecuaciones utilizadas para este método se detallan a continuación.

$$Ii = \left(\frac{Ti}{5}\right)^{1.514} \dots (25)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} Ii \dots (26)$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-3} * I + 0,49239 \dots (27)$$

$$ET_o = \frac{N}{12} * \frac{d}{30} * 16 * \left(\frac{10 * t}{I}\right)^a \dots (28)$$

Donde:

$Eto$  = evaporación potencial mensual [mm/mes]

$Ii$  = Índice térmico mensual

$I$  = Índice térmico anual

$Ti$  = Temperatura media mensual del mes [°C]

$a$  = Constante dependiente del lugar

$N$  = Número máximo de horas sol para la latitud considerada.

$d$  = Número de días del mes

Para el cálculo de la evapotranspiración real, es necesario multiplicar la evapotranspiración potencial por el coeficiente de cultivo. Este coeficiente de cultivo ( $Kc$ ) será tomado de la tabla propuesta por la FAO (2006), la cual puede ser consultada en el Anexo 2. Normalmente los sistemas de riego se diseñan a partir de esta evapotranspiración ajustada al cultivo, pero para el caso del riego por goteo, es necesario contemplar el efecto de localización. Como explican Keller (1990), Pizarro (1990) y Karmelli (1975), el efecto de localización es un factor tomado en cuenta debido a que en el área de siembra se presenta tanto suelo descubierto como suelo sombreado por el cultivo. Aunado a esto, acontece que la lámina de agua depositada por el sistema de riego por goteo no forma un humedecimiento superficial, sino que conforma bulbos que se extienden debajo del punto de emisión. Es por estas dos características que la evaporación representa una pérdida de agua pequeña en comparación a la transpiración que producen las

plantas al tomar agua almacenada en el suelo e integrarla al aire como consecuencia del proceso de respiración. Por tanto, se debe conocer la razón del área sombreada por las plantas sobre el área total del cultivo para precisar la estimación de la evaporación.

Karmelli y Keller (1975), Pizarro (1990) y Medina (1993) presentan diferentes formas de estimar este coeficiente. Primeramente, Karmelli y Keller presentan una solución estimada únicamente con la división del porcentaje de área sombreada entre 85. Lo cual, para efectos de estudio, es muy impreciso.

Luego tenemos a Medina quién recopila un método desarrollado por Kodama y Solomon (s.f.) en el cual se estiman dos factores. El primero se trata de un coeficiente de cultivo, semejante al  $K_c$  propuesto por FAO y un segundo factor climático, el cual se conforma por la temperatura, altitud, humedad relativa, velocidad del viento, latitud y nubosidad. Ambos factores son multiplicados por la superficie ocupada por la planta. Este método no será utilizado a razón de que estima evapotranspiración potencial, coeficiente de cultivo y coeficiente de localización en un único cálculo a través de cuadros.

Pizarro (1990) recomienda utilizar la media de las ecuaciones, que Él mismo recopila, propuestas por Aljiburry et al, s.f., Decroix, s.f., Hoare et al, s.f., y Keller, s.f., para la estimación del coeficiente de localización ( $KL$ ), las cuales están resumidas en las siguientes cuatro ecuaciones respectivamente.

$$KL = 1,34 * A \dots (29)$$

$$KL = 0,1 + A \dots (30)$$

$$KL = 0,5 * (1 + A) \dots (31)$$

$$KL = 0,15 * (1 + 5.67A) \dots (32)$$

Donde:

$KL$  = Coeficiente de localización

$A$  = Fracción de área sombreada

Finalmente, la evapotranspiración del cultivo localizado se estima según la Ecuación 33.

$$ETcl = ETc * KL \dots (33)$$

El suelo, por su característica de poseer poros puede retener agua dentro de sí mismo. Es decir, se comporta como una reserva de agua para el cultivo. El cálculo de la lámina neta que puede retener un suelo se presenta en la Ecuación 34

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} * \rho_{ap} * Prof * Agot * PAR \dots (34)$$

Donde:

$Ln$  = Lámina neta [mm]

$CC$  = Capacidad de campo [%]

$PMP$  = Punto de marchitez permanente [%]

$\rho_{ap}$  = Peso específico aparente [g/cm<sup>3</sup>]

$Prof$  = Profundidad de raíces [cm]

$Agot$  = Fracción de agotamiento

$PAR$  = Porcentaje de área regada [%]

Cuando no se dispone de la posibilidad de medir el contenido de humedad en el suelo a capacidad de campo o punto de marchitez permanente pueden utilizarse las ecuaciones Ecuación 35 Ecuación 36 recopiladas por Chavarría (2013).

$$CC = 0,6382 * \%arcilla + 0,2845 * \%limo + 0,0507 * \%arena \dots (35)$$

$$PMP = 0,4897 * CC + 1,1666 \dots (36)$$

Por otra parte, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA (2010) propone el uso de las regresiones desarrolladas por Tomasella y Hodnett (1998) para calcular CC (Ecuación 37) y PMP (Ecuación 38).

$$CC = 0,01 * (0,426 * \%limo + 0,404 * \%arcilla + 4,046 \dots (37)$$

$$PMP = 0,01 * (0,15 * \%limo + 0,396 * \%arcilla + 0,91 \dots (38)$$

Donde:

CC = Capacidad de campo [%]

PMP = Punto de marchitez permanente [%]

%arcilla = Porcentaje de arcilla que compone el sustrato [%]

%limo = Porcentaje de limo que compone el sustrato [%]

%arena = Porcentaje de arena que compone el sustrato [%]

La fórmula con la que se estima la lámina a regar es semejante a la utilizada en otros tipos de riego, exceptuando por un factor, el porcentaje de área humedecida (PAR).

Para explicar este fenómeno es necesario comprender cómo se comporta el agua debajo del suelo al ser aplicada por goteo. Cuando el agua es aplicada en un único punto el movimiento de esta se ve afectado por tres factores, el primero, una fuerza vertical ocasionada por la atracción de la gravedad, el segundo, una distribución horizontal que es ocasionada por la capilaridad del agua y el tercero, la capacidad de conductividad hidráulica del suelo. Cuando estos tres factores entran en juego se genera un bulbo de humedecimiento cuya forma es característica para cada

tipo de suelo. En la Figura 3.1 se puede observar, la forma que, con generalidad, toma un bulbo de humedecimiento para tres texturas de suelo diferentes.

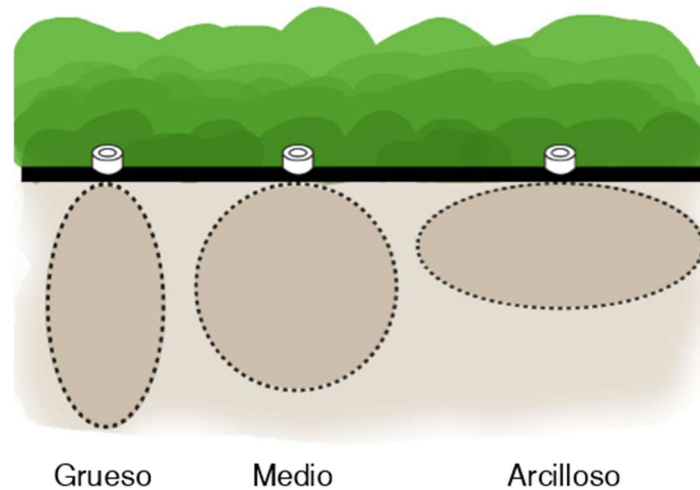


Figura 3.1. Bulbos de humedecimiento para diferentes texturas de suelo. Adaptado al español de Reddy (2016).

Si se observa un bulbo de humedecimiento desde una vista superior, se notará que el área ocupada por el mismo es un círculo. Es decir, se forma una diferenciación visual entre área húmeda y área no húmeda debajo del suelo que puede ser simplificada a geometría básica y, consecuentemente, calculada con facilidad.

Karmelli y Keller (1975) recomiendan que el bulbo de humedecimiento tenga un traslape a lo largo del lateral de al menos un 50 %. Es decir, formando una franja continua de humedecimiento. De esto se extiende que la razón entre el área húmeda y la seca es el PAR. El PAR es tomado en cuenta para reducir la lámina de riego, disminuyendo pérdidas por percolación.

Una de las ventajas del riego localizado está en que no toda el área es humedecida, sino que sólo una parte previamente establecida y es en esto dónde se presenta un ahorro considerable del recurso hídrico. Pizarro (1990) recomienda que para clima húmedo el PAR no debe ser menor que 20 %, Karmelli y Keller (1975) lo establecen en 33 % como mínimo y Goldberg (como se cita en Medina, 1993) lo fija en 50 %.



Para el cálculo del PAR la mayoría de los autores sugieren la realización de pruebas en campo las cuales consisten en la aplicación de una o varias láminas de riego y la posterior excavación para la medición del diámetro del bulbo de humedecimiento y el consiguiente cálculo del PAR. Por otro lado, Karmelli y Keller (1975) proponen el uso de un cuadro, el cual fue generado a partir de los resultados de mediciones tomadas en experimentos desarrollados con diversas configuraciones de espaciamiento entre goteros, caudal y tipo de suelo; para simplificar la estimación del PAR de un sistema. En este cuadro, que puede ser consultado en el Anexo 3, se debe tener en cuenta que el espaciamiento entre emisores está recomendado para ocasionar un traslape del 80 % del diámetro, además de que el PAR es el correspondiente a una profundidad de muestreo de 30 cm.

La ecuación de Schwartzmass y Zur, Ecuación 39, (1985, como se cita en Keller, 1990) permite estimar el diámetro del bulbo de humedecimiento. Cabe destacar que en esta ecuación no es relevante la lámina depositada y los únicos factores que influyen son el caudal del gotero, el tipo de suelo, compactación y profundidad que debe alcanzar el agua.

$$w = K * (z)^{0,35} * (q)^{0,33} * (Ksat)^{-0,33} \dots (39)$$

Donde

$w$  = Diámetro de humedecimiento [m]

$K$  = Coeficiente empírico (0,0094)

$z$  = Profundidad de humedecimiento [m]

$q$  = Descarga del emisor [l/hora]

$Ksat$  = Conductividad hidráulica saturada del sustrato [m/s]

Por otra parte, Cruz-Bautista et al. (2015), desarrollaron pruebas con goteros de 2, 4 y 8 litros por hora en tres tipos de suelos diferentes para validar dos ecuaciones; las cuales estiman el radio del bulbo húmedo y su profundidad utilizando como datos de entrada el volumen depositado, la conductividad hidráulica, el contenido de humedad inicial y el contenido de

humedad residual. Los resultados de las pruebas mostraron que las ecuaciones tienen una confiabilidad de un 90 % y 94 % para la estimación del radio y la profundidad respectivamente. Cabe destacar que no se menciona si los datos utilizados para la evaluación provienen de los mismos datos utilizados para la regresión o de un conjunto de experimentos distinto. En la Ecuación 40 se aplica para estimar el radio del bulbo y la Ecuación 41 la ecuación con la que puede ser estimada la penetración de este.

$$r = 0,14 * V^{0,353} * K_s^{-0,110} * \theta_v^{-0,387} \dots (40)$$

$$Z = 7,906 * V^{0,458} * Q^{-0,152} * \theta_v^{0,386} * \theta_r^{0,349} * L_i^{-0,421} \dots (41)$$

Donde:

$r$  = Avance lateral [m]

$Z$  = Avance vertical [m]

$V$  = Volumen de agua aplicada [m<sup>3</sup>]

$K_s$  = Conductividad hidráulica saturada [m/s]

$\theta_v$  = Contenido de humedad volumétrica inicial en el suelo [fracción]

$Q$  = Caudal del emisor [m<sup>3</sup>/s]

$\theta_r$  = Contenido de humedad volumétrica residual del suelo [fracción]

$L_i$  = Contenido de limo [%]

Debe tomarse en cuenta que para su uso en diseño deben establecerse previamente los parámetros de humedades en el suelo, por lo cual sólo es necesario conocer la capacidad de retención del suelo, la conductividad hidráulica saturada y el porcentaje de limo presente en el suelo, además del volumen a depositar y el caudal del gotero seleccionado. Se desconoce si esta ecuación se puede utilizar en caso de que, en lugar de un suelo, el cultivo se desarrolle sobre un

sustrato cuya presencia masiva de macro poros o poca retención hídrica podrían afectar el comportamiento del bulbo de humedecimiento.

Los valores de la conductividad hidráulica saturada necesaria en el método de Cruz-Bautista son tomados del cuadro propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, en inglés), tabulados en el Cuadro 3.6.

Cuadro 3.6. Valores de Ksat para distintas texturas de suelo. Fuente: USDA (s.f.)

Textura	Clase textural	Clase de Ksat	Ksat ( $\mu\text{m/s}$ )
Arena gruesa	Grueso	Muy rápido	>141,14
Arenas	Grueso	Rápido	42,34 - 141,14
Arena francosa			
Franco arenoso	Moderadamente grueso	Moderadamente rápido	14,11 - 42,34
Franco	Medio	Moderado	4,23 - 14,11
Franco limoso			
Limoso			
Franco arcilloso	Moderadamente fino	Moderadamente lento	1,41 - 4,23
Arcillo arenoso	Fino y muy fino	Lento	0,42 - 1,41
Arcillo limoso			
Arcilloso			
Fragipan, Orstein		Muy lento, impermeable	0,00 - 0,42

Continuando con el diseño agronómico, la lámina neta debe convertirse a una lámina bruta o total de riego. Antes de esto debe estimarse el ciclo de riego, para ello se utiliza la Ecuación 42.

$$CR = \frac{Ln}{ETcl} \dots (42)$$

Donde:

$CR$  = Ciclo de riego [días]

$Ln$  = Lámina neta [mm]

$ETcl$  = Evapotranspiración del cultivo localizada [mm/día]

De esta forma se redondea hacia abajo para conocer durante cuántos días el cultivo puede ser sustentado por las reservas de agua en el suelo. Luego debe recalcularse la lámina neta, en el caso de riego por goteo, es recomendable aplicar una lámina diaria que reponga el agua evapotranspirada.

Posteriormente, la lámina debe dividirse por el producto entre la eficiencia de riego y la relación de transpiración (TR). La relación de transpiración consiste en la relación entre el agua transpirada por la planta y el agua aplicada por el sistema de riego, es decir, es una cuantificación del agua perdida por percolación profunda. Este factor varía entre 0,8 y 0,9 según Medina (1993), por otra parte, Karmelli y Keller (1975) recomiendan para zonas húmedas, donde el riego es suplementario, utilizar un TR de 0,95. Finalmente, Pizarro (1990) recomienda el Cuadro 3.7 en donde se puede encontrar un valor de TR según la textura del sustrato y profundidad radicular para un clima húmedo.

Cuadro 3.7. Valores de TR en climas húmedos (Pizarro, 1990).

El autor no especifica los rangos de partículas para el tipo de textura.

<i>Profundidad de raíces (m)</i>	<i>Textura</i>			
	Muy porosa (grava)	Arenosa	Media	Fina
< 0,75	0,65	0,75	0,85	0,90
0,75 - 1,50	0,75	0,80	0,90	0,95
> 1,50	0,80	0,90	0,95	1,00

La estimación de la uniformidad de riego ya fue previamente abordada, por lo que el cálculo de la lámina bruta se lleva a cabo con la Ecuación 43.

$$Lb = \frac{Ln}{CU*TR} \dots (43)$$

Donde:

$Lb$  = Lámina bruta o total [mm]

$Ln$  = Lámina neta [mm]

$CU$  = Coeficiente de uniformidad de riego [fracción]

$TR$  = Relación de transpiración

Cabe destacar que Pizarro propone incluir las necesidades de lavado de sales (LR) en la ecuación anterior, en donde después de estimar las LR se realiza la resta  $1 - LR$  y si ésta es mayor al  $TR$ , entonces se sustituye el factor ( $TR$ ) por  $(1 - LR)$  en la Ecuación 43. El cálculo de LR se lleva a cabo con la Ecuación 44.

$$LR = \frac{CEi}{2CEe} \dots (44)$$

Donde:

$LR$  = Requerimiento de lavado [fracción]

$CEi$  = Conductividad eléctrica del agua de riego [mmohs/cm]

$CEe$  = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo, valor que se impone como objetivo a conseguir con el lavado y dependerá directamente del tipo de cultivo [mmohs/cm]

Debe calcularse la densidad de emisores por metro cuadrado con la Ecuación 45.

$$Em^2 = \frac{1}{Slprom * Se} \dots (45)$$

Donde:

$Em^2$  = Número de emisores por metro cuadrado

$Slprom$  = Distancia promedio entre laterales [m]

$Se$  = Distancia entre emisores [m]

Con esto se debe calcular el volumen correspondiente a cada emisor a través de la Ecuación 46.

$$Ve = \frac{Lb}{Em^2} \dots (46)$$

Donde

$Ve$  = Volumen que debe depositar cada emisor [l]

$Lb$  = Lámina bruta [mm]

$Em^2$  = Densidad de emisores, en emisores por metro cuadrado

El tiempo de riego se determina mediante la Ecuación 47.

$$Tr = \frac{Ve}{Qe} \dots (47)$$

Donde:

$Tr$  = Tiempo de riego [h]

$Ve$  = Volumen a depositar por emisor [l]

$Qe$  = Caudal del emisor [l/h]

### 3.3 Diseño hidráulico

El diseño hidráulico corresponde al cálculo y especificación de las tuberías necesarias para la conducción del agua en el sistema. Es decir, estimar las pérdidas por fricción y seleccionar los diámetros de las tuberías.

Las pérdidas de presión, como explica White (1979), en los sistemas de conducción de fluidos son ocasionadas por la fricción que manifiesta un fluido al rozar las paredes del ducto conductor y la fricción propia del fluido ocasionada por la viscosidad del mismo. Para estimar esta pérdida de presión por fricción será utilizada la ecuación de Hazen-Williams. Pizarro (1990) especifica que, en las tuberías con salidas múltiples, es necesario contemplar un Factor de ajuste. Esto debido a que el diámetro es constante a lo largo de la tubería, pero el caudal que transporta disminuye a lo largo de la misma. Ocasionando que las pérdidas de presión no sean constantes, sino que disminuyen conforme se extiende la tubería. Si no fuese contemplado este factor, implicaría la sobreestimación de las pérdidas por fricción y, por tanto, un cálculo erróneo en la presión de entrada del sistema.

En la Ecuación 48 se observa la fórmula para estimar las pérdidas por fricción bajo el método de Hazen - Williams.

$$H_f = (1,131 \times 10^9) \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \times (D)^{-4,87} \times L \times F \dots (48)$$

Donde:

$H_f$  = Pérdidas de presión en el lateral [mca]

$Q$  = Caudal del lateral [m<sup>3</sup>/h]

$C$  = Coeficiente de Hazen-Williams, 140 en polietileno

$D$  = Diámetro interno de la tubería [mm]

$L$  = Longitud del lateral [m]

$F$  = Factor según cantidad de orificios, sólo para lateral y múltiple

El factor F que depende de la cantidad de orificio presentes en el lateral y es calculado a través del método desarrollado por Christiansen (como cita Villalobos, 2001). La posición del primer gotero es importante para el cálculo del factor F, debido a que de esta depende la ecuación con la que se procederá a estimar el coeficiente. Por el momento sólo se mencionará la ecuación que

debe aplicarse cuando la distancia desde el comienzo del lateral hasta el primer gotero es equivalente a la mitad del espaciamiento entre goteros. Esta es la Ecuación 49

$$F = \frac{2*N}{2*N-1} * \left( \frac{1}{m+1} + \frac{\sqrt{m-1}}{6*N^2} \right) \dots (49)$$

Donde:

$F$  = Factor de corrección por salidas a lo largo de la tubería.

$N$  = Cantidad de salidas presentes en la tubería.

$m$  = Coeficiente de tipo de material, 1,760 para el caso de PVC y PE.

Pizarro (1990) recomienda que las pérdidas de presión por fricción entre el primer gotero y el último no excedan al 20 % de la presión de operación del gotero recomendada por el fabricante. De esta manera se asegura que la diferencia de lámina depositada en el sistema no será mayor al 10 %, mejorando así la eficiencia de aplicación y reduciendo las pérdidas por percolación o el estrés hídrico sobre las plantas.

La presión a la entrada del lateral se estima con la Ecuación 50 y la presión distal con la Ecuación 51. La presión a la entrada de una múltiple se estima de la misma forma que la presión a la entrada de un lateral, variando únicamente la presión de operación que, en este caso, sería la presión de entrada al lateral, previamente estimada.

$$Pe = P0 + \frac{3}{4}hf \dots (50)$$

$$Pd = Pe - hf \dots (51)$$

Donde:

$Pe$  = Presión de entrada al lateral (o múltiple) [mca]



$P_0$  = Presión de operación del gotero [mca]

$P_d$  = Presión distal [mca]

$h_f$  = Pérdidas estimadas a lo largo del lateral [mca]

Otro componente del sistema hidráulico es la bomba. La estimación de la potencia de esta se lleva a cabo con la Ecuación 52. De esta manera, si ya existen bombas en campo, se posee el criterio para decidir entre la reutilización o la compra de equipo nuevo que se adapte mejor a las condiciones de operación. White (1979) explica que el comportamiento de una bomba centrífuga puede ser caracterizado a través de ensayos en laboratorio y el resultado de estos es resumido en la curva característica de la bomba. Esta curva, proporcionada por el fabricante, permite juzgar la capacidad de una bomba de cumplir con los requerimientos hidráulicos, por lo que este material debe ser utilizado en conjunto con la ecuación de potencia durante el proceso de evaluación del sistema de riego.

$$HP = \frac{Q * P_p}{270 * E_f} \dots (52)$$

Donde:

$HP$  = Es la potencia requerida por la bomba [Hp]

$Q$  = Es el caudal del sistema [m<sup>3</sup>/h]

$P_p$  = Es la presión requerida por la bomba [mca]

$E_f$  = Es un estimado de la eficiencia de operación de la bomba [%]

Los accesorios que forman parte del sistema de riego y que pueden ocasionar pérdidas por fricción son las llaves de bola, codos de 90°, Tees y los conectores. Debido a la longitud de los rollos de tubería, no se utilizan acoples. Estas pérdidas se calculan con la Ecuación 53. Los coeficientes K son tomados del cuadro recopilado por White (1979) y pueden ser consultados en el Cuadro 3.8.

$$H_f = K \frac{v^2}{2g} \dots (53)$$

Donde:

$H_f$  = pérdidas de presión [mca]

$K$  = Coeficiente característico de cada accesorio

$V$  = Velocidad del fluido [m/s]

Cuadro 3.8. Coeficiente K para accesorios plásticos de 2 pulgadas.

<i>Accesorio</i>	<i>Coeficiente K</i>
<i>Llave de bola</i>	4,7
<i>Codo de 90°</i>	0,72
<i>Conector</i>	0,78
<i>Tee</i>	1,8

## **4. METODOLOGÍA**

## 4.1 Transmisión de conocimiento

### 4.1.1 Elaboración de nomogramas

Para facilitar el cálculo de las pérdidas de fricción para tuberías de polietileno se elaboró un nomograma utilizando la Ecuación 48. Los parámetros de entrada fueron la matriz tabulada en el Cuadro 4.1. Los tres caudales elegidos como referencias para el nomograma corresponden a:

- Límite inferior del régimen turbulento: Debajo de este límite se manifiesta el flujo laminar y mayor sedimentación (White, 1979).
- Velocidad mínima de flujo: Velocidad mínima de flujo en tuberías para evitar la sedimentación como se establece en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CFIA, 2017).
- Velocidad máxima de flujo: Velocidad máxima de flujo en tuberías para evitar daños por golpe de ariete como se establece en el Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones (CFIA, 2017).

Cuadro 4.1. Datos de entrada establecidos para la elaboración del nomograma.

<i>Diametro nominal [mm]</i>	<i>Diametro interior</i>	<i>Razón caudal diámetro [L/(s-mm)]</i>	<i>Caudal [l/min]</i>	<i>Pérdidas [mca/m]</i>
20	16,9	0,1775	3	0,0052
		0,4734	8	0,0321
		1,1834	20	0,1751
32	28,7	0,1742	5	0,0010
		0,8014	23	0,0172
		2,0209	58	0,0953
40	36	0,1944	7	0,0006
		1,0278	37	0,0137
		2,5556	92	0,0742

Una vez calculadas las pérdidas, estas se organizaron en un gráfico y se ajustó una ecuación potencial a cada serie de datos con el software Microsoft Excel 2017.

#### 4.1.2 Generación de representaciones tridimensionales

Con el fin de facilitar la comprensión de la estructura de una Casa Sombra, es decir, los sistemas de anclaje, distribución de soportes y su sistema de riego, se dibujó con el software de modelación 3D SketchUp un ejemplo de Casa Sombra con sus elementos. También, utilizando las herramientas de escenas del mismo software, se generaron tanto imágenes como videos que fueron empleados en la elaboración de presentaciones digitales.

En el Anexo 5 es posible observar una muestra de las imágenes generadas para facilitar la creación de material didáctico e informativo.

#### 4.2 Evaluación de los sistemas de riego

Se evaluaron cuatro sistemas de riego, de estos, tres correspondían a los proyectos desarrollados en la Región Brunca y sólo uno a la Región Chorotega. Esto debido a que muy pocos productores de la Región Chorotega estaban anuentes a instalar el sistema de riego.

Para la evaluación se recolectaron muestras del caudal entregado por los goteros, de manera que se tomaran como mínimo 16 muestras por sistema, es decir, cuatro laterales de cuatro goteros cada uno. Entre los proyectos visitados se encontró un módulo de ambiente protegido con características topográficas muy particulares. En este se tenía los cultivos dispuestos en terrazas; para este caso en específico, se analizaron las 16 muestras en dos grupos separados de 8 y 8, debido a que la diferencia de presiones era considerable. El fin de este análisis segmentado era caracterizar las terrazas independientemente, porque la presión a la que operaban podía variar hasta 7 mca. entre una y otra.

Se procuró adquirir datos confiables, es decir, que no existieran fugas entre los goteros y los recipientes de recolección. Una vez recolectados los datos de láminas depositadas se procedió, aplicando la Ecuación 1, a estimar el volumen mínimo depositado.

Al no disponer de información directa del fabricante, la Ecuación 2 no fue utilizada como comparador, sino que, el coeficiente de uniformidad calculado fue comparado con el Cuadro 3.1.

Una vez se estimó el coeficientes de uniformidad, se procedió a calcular el coeficiente de variación total, el cual se calcula a través de las ecuaciones 4, 5 y 6 y fue comparado con el Cuadro 3.2 para describir el estado actual del sistema.

Una vez concluida la evaluación de la uniformidad del sistema se continuó con el rediseño agronómico, proceso a través del cual se estableció una estimación de las necesidades hídricas de las plantas.

### 4.3 Diseño agronómico

#### 4.3.1 Pruebas físicas

El muestreo se llevó a cabo en seis fincas diferentes localizadas en Liberia, Bagaces, Curubandé y Upala. Este muestreo consistió en la toma de muestras cuarteadas de suelo en cada finca que luego fueron analizadas en laboratorio para conocer la textura, acidez y salinidad.

El análisis de textura se abordó con el método de Bouyoucos. El pH y la salinidad del suelo fueron medidos con el dispositivo OAKTON© ION 6+ y los resultados comparados según el Cuadro 3.3 para los datos de pH y el Cuadro 3.4 para los de salinidad. Para el pH, se estableció que el rango óptimo es aquel que abarque todos los cultivos, es decir, el pH mínimo más alto y el máximo más bajo de los cultivos propuestos. Este rango es un pH entre 6 y 6,7.

#### 4.3.2 Evapotranspiración

Una vez concluidas las pruebas físicas, se procedió a estimar la evapotranspiración potencial.

Como no se poseían dispositivos para el registro de datos climáticos en los diferentes proyectos, se utilizaron los datos recolectados y proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional a través de estaciones meteorológicas en la región.

En la revisión de literatura, se presentaron dos métodos diferentes para la estimación de las pérdidas por evapotranspiración: el método de Penman-Monteith, que se utilizara únicamente cuando se dispone de la mayoría de las variables necesarias para su cálculo y el método de Thornwaite, el cual, se caracteriza por requerir pocas variables de entrada y, por lo tanto, ofrecer una estimación sacrificando exactitud con la realidad. El método de Penman-Monteith permite

utilizar datos con alta resolución (horas, días), contrario al método de Thornwaite, enfocado a la estimación a partir de datos mensuales.

Los datos climáticos proporcionados por el IMN son de carácter mensual, pero se disponía de las variables suficientes para utilizar el método de Penman-Monteith, por tanto, se priorizó el uso del método de Penman-Monteith. Los datos aportados por el IMN, que pueden ser consultados en el Anexo 9. Para el proyecto de riego por goteo en bancales de organopónicos dentro de ambiente protegido en la región de Hojancha se utilizaron los datos de la estación automática 72157 ubicada en la finca La Ceiba, en el caso del cultivo de hortalizas bajo la modalidad Casa Sombra en Llano Bonito de Alajuela sólo fue posible disponer de datos de la estación ubicada en Ciudad Quesada y, para el último proyecto de cítricos en Nicoya, se utilizaron los datos meteorológicos de la estación 72101 ubicada en Nicoya. De los conjuntos de datos anteriormente mencionados, únicamente el grupo de la estación de Ciudad Quesada no disponía de registro de radiación solar y viento, por lo que esta fue estimada con la fórmula de Angstrom (Ecuación 19) como se recomienda por FAO y la velocidad del viento fue establecida para el rango de vientos suaves a moderados con un valor de 2 m/s. Antes de establecer el método propuesto por FAO como el definitivo, se compararon los dos métodos, resultando el de Penman-Monteith aquél con resultados más altos y, por tanto, más propenso a brindar un factor de seguridad.

Esta evapotranspiración potencial debió ser ajustada al cultivo de evaluación. El cultivo de evaluación se eligió como: aquel cultivo que se desea sembrar en la casa sombra cuyo coeficiente de ajuste de cultivo sea el más alto de entre todos los demás cultivos que se prevé sembrar. En el caso de casa sombra se trata de la lechuga, cuyo  $K_c = 1,15$ , el cual es el más alto de las hortalizas que pueden ser sembradas en Casa Sombra, como puede observarse en el Anexo 2 proporcionado por FAO, 2006. Se eligió el  $K_c$  más alto ya que debe diseñarse para el cultivo de mayor consumo.

Posteriormente, debieron contemplarse las variaciones en la evaporación que ocasionan el área sombreada por el cultivo, para esto las ecuaciones: 29, 30, 31, 32 fueron calculadas y promediadas para obtener un único coeficiente de ajuste por localización y, seguidamente, la evapotranspiración real se ajustó como se indica en la Ecuación 33. La fracción de área

sombreada contemplada para la estimación del coeficiente de localización es de 0,75. Esto es estimado a partir de la densidad de siembra que puede producir el cultivo sembrado con un espaciamiento de 20 x 20 cm, pero esto puede variar de un cultivo a otro.

Concluida esta sección de cálculo meteorológico, se procedió con las estimaciones más directamente relacionados con el proceso de hidratación del suelo y la deposición de las láminas de riego.

#### 4.3.3 Lámina de riego

Debido a la alta frecuencia de riego propuesta para el sistema, no es necesario utilizar el suelo como reservorio y ocasionar un estrés hídrico sobre la planta, por lo que no se contempló un agotamiento permisible. Como menciona FAO (1988) el agua consumida será repuesta diariamente, con 3 tiempos de riego cuya acumulación diaria sea equivalente al ETr estimado, manteniendo así el suelo a capacidad de campo y el cultivo libre del estrés que ocasionaría el riego pautado en días, reduciendo el volumen de raíces por planta.

Para el caso de los cultivos que se desean trabajar en la casa sombra fue necesario estimar el porcentaje de área regada (PAR) a una profundidad de 20 cm, debido a que las hortalizas no profundizan tanto en el sustrato y, además de reducir el desperdicio de nutrientes en el desarrollo de sistemas radiculares extensos y pérdidas por percolación. Pizarro (1990) recomienda la realización de ensayos en campo, pero debido a la corta estadía en las zonas de evaluación, se propuso la revisión e implementación del trabajo realizado por Keller y Karmelli (1975); más precisamente, el cuadro de PAR para diferentes texturas, caudales de gotero y espaciamiento, que ellos desarrollaron.

Se propone, utilizando como insumo el cuadro original, obtener los parámetros constantes con los cuales el cuadro fue elaborado en un principio, generar un nuevo cuadro con un rango de trabajo más cercano a la distribución utilizada en campo y verificar el error de la propuesta. Cabe destacar que el cuadro de PAR está desarrollado para una profundidad de cultivo efectiva de 30 cm. En el presente trabajo se propuso y ejecutó el siguiente proceso:



- a. El diámetro del bulbo de humedecimiento se calcula a partir del porcentaje de área humedecida y el espaciamiento entre laterales.
- b. Después de que se ha estimado el diámetro del bulbo humedecido se invierte la ecuación de Schwartzmass (Ecuación 39) para estimar la conductividad hidráulica ( $K_{sat}$ ) que Karmelli y Keller utilizaron en un principio para elaborar el cuadro y que corresponde a la  $K_{sat}$  de un suelo con una textura media. Estos valores de  $K_{sat}$  obtenidos de cada PAR son promediados y posteriormente es evaluado el error de la desviación estándar contra la media para asegurarse que la obtención de los datos sea estadísticamente confiable con el proceso de confección del cuadro original.
- c. Conociendo el  $K_{sat}$  usado por los autores, se establece una profundidad radicular de 20 cm, se calcula el nuevo diámetro del bulbo húmedo y se estima el PAR para generar un nuevo cuadro conformado por los pares de espaciamiento entre laterales y PAR.

La lámina de riego neta fue ajustada tomando en cuenta la eficiencia de aplicación y la relación de transpiración utilizando como referencia el Cuadro 3.7 y la Ecuación 43. Al momento de realizar aplicaciones con fertilizantes se debe incluir las necesidades de lavado. Estas fueron calculadas a través de la Ecuación 44 . La lámina calculada debe ser multiplicada por el PAR estimado para ajustarse al comportamiento real del riego por goteo y evitar las pérdidas de agua por percolación.

Posteriormente se estimó la cantidad de goteros por metro cuadrado con la Ecuación 45 y el volumen que debía depositar cada emisor con la Ecuación 46. Es con este dato que, conociendo el caudal de descarga del gotero, se estimó el tiempo de riego para reponer la lámina perdida, como se muestra en la Ecuación 47.

Esta información permitió, primeramente, corroborar si la instalación actual es la adecuada para el cultivo y, segundo, aportar al productor datos de los tiempos de riego necesarios para reducir los desperdicios por percolación profunda.

#### 4.4 Diseño hidráulico

La tubería de conducción y la cinta de riego por goteo se distribuyó de manera que cumpliera con los siguientes parámetros propuestos para facilitar la implementación de los sistemas:

- a. Cada cama de siembra debe ser irrigada por al menos una cinta de gotero integrado.
- b. En caso de utilizar múltiples líneas de goteo por cama, estas deben estar espaciadas a 20 cm. Los cultivos más densos, como el culantro y la lechuga, se siembran en cuadrículas de 20 x 20 cm y es por esto que es necesario colocar cintas cada 20 cm dentro de la cama. Estos espaciamientos de siembra son los recomendados por el plan técnico de producción del proyecto Casa Sombra y están basados en criterios tanto técnicos como observados en campo.
- c. La distribución debe adaptarse a las camas ya conformadas y no de manera contraria, esto para reducir el movimiento de tierras para el cual los productores no disponen de maquinaria agrícola ni asistencia de otros colaboradores en campo. Las dimensiones de camas pueden variar entre un módulo y otro.

Las dimensiones de la Casa Sombra se mantienen como un factor constante, en donde se sabe que la longitud de los laterales de riego es de 24 metros y la conducción múltiple de 30 metros.

En el caso del apoyo técnico brindado al INDER fue necesario diseñar para la producción en Casa Sombra y en macro túneles. El cultivo dentro de los macro túneles se distribuyó tanto en bancales como en el suelo descubierto. Para el primero se tienen laterales de 4 metros y una múltiple de 12 metros con una distancia de tubería principal igual a 91,5 metros. Para el segundo se tienen laterales de 12 metros y múltiple de 4 metros, con una tubería principal de 92,5 metros.

El espaciamiento entre goteros de las cintas que se seleccionaron fue de 20 y 30 cm y el caudal de descarga de 1 y 1,6 L/h. El cálculo de las pérdidas de presión por fricción se desarrolló a través de la Ecuación 48. También es necesario considerar el factor de variación de la pérdida por fricción a lo largo de la tubería ocasionada por la disminución del caudal. Este factor fue estimado con la Ecuación 49, cuyo parámetro de cantidad de salidas fue la cantidad de emisores que se encontraban en un solo lateral de riego. Finalmente, se agregan las pérdidas en accesorios calculados con la Ecuación 53.

Las presiones de entrada y distal se calcularon, tanto para caracterizar el funcionamiento del sistema, como para verificar el correcto diseño del mismo. Estos dos parámetros se calcularon con la Ecuación 50 y la Ecuación 51.

Finalmente se estimó la potencia que debía entregar cada bomba para desplazar el caudal a la presión necesaria con la Ecuación 52.

Para el caso de los proyectos que requirieron la compra de nuevo equipo de bombeo, se investigó la disponibilidad de equipo en el mercado según el resultado que se obtuvo con la Ecuación 52 y posteriormente se evaluaron las curvas de operación de las opciones para elegir el equipo más idóneo.

## **5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### 5.1 Transmisión de conocimiento

Durante el desarrollo del proyecto se visitó a 13 productores para brindarles asesoría en el correcto uso del sistema de riego. Además, también se le brindó colaboración técnica al Instituto de Desarrollo Rural (INDER) durante las visitas en campo y la colaboración con el diseño de sistemas.

Para facilitar el proceso de divulgación técnica se elaboró un fragmento informativo, el cual puede ser consultado en el Anexo 1. Este material también fue utilizado para la conformación del informe técnico de labores.

En la Figura 5.1 se detalla el resultado de la elaboración de un nomograma para facilitar el cálculo de pérdidas de fricción en tuberías de polietileno.

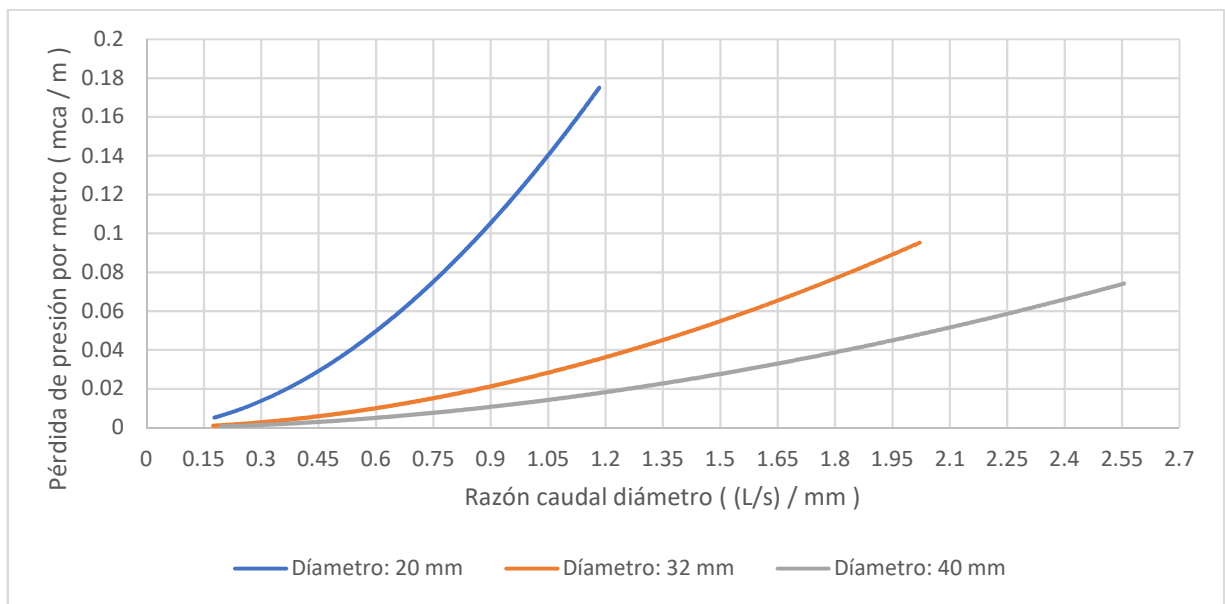


Figura 5.1. Nomograma para el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías de polietileno para 3 diámetros diferentes. Caudal en litros por segundo. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel.

Las ecuaciones de ajuste, observadas como líneas continuas, tienen un  $R^2 = 1$ , esto debido a la naturaleza potencial de la ecuación de Hazen – Williams con la que se generaron las muestras.

## 5.2 Evaluación de sistemas

### 5.2.1 Análisis de suelos

Los resultados de analizar las muestras procesadas en campo se muestran en el Cuadro 5.1

Cuadro 5.1. Resultados de análisis físicos 1.

<sup>1</sup> Pérdida de muestra por error humano durante proceso de análisis.

<i>Localidad</i>	<i>pH</i>	<i>Salinidad (mS/cm)</i>	<i>pH óptimo</i>	<i>Categoría de salinidad</i>
<i>Liberia</i>	6,39	0,13	6 – 6,7	Muy bajo
<i>Curubandé</i>	6,45	0,13		Muy bajo
<i>Upala</i>	— <sup>1</sup>	0,15		Muy bajo
<i>Liberia</i>	6,86	0,06		Muy bajo
<i>Bagaces</i>	6,72	0,21		Muy bajo
<i>Bagaces</i>	7,17	0,16		Muy bajo

Como se puede observar, los suelos muestreados se posicionan dentro del rango establecido como óptimo para los cultivos propuestos, exceptuando por los casos de Bagaces y Liberia. Esto puede resolverse ya sea, acidificando los suelos con agroquímicos, reduciendo la variedad de cultivos a producir o sacrificando la calidad de producción forzando cultivos a desarrollarse en un pH inadecuado. Por causas de error humano la muestra de pH tomada en Upala no pudo ser procesada en laboratorio.

Para el caso del análisis de salinidad, todas las muestras evaluadas se sitúan en una categoría de salinidad donde no se compromete el rendimiento de los cultivos.

En los anexos 6 y 7 se detallan los resultados del análisis textural de las muestras de suelo. Como se puede observar, los terrenos muestreados no presentan similitud entre sí, pero se concentran en una textura media y se detallan dos casos de texturas más pesadas que la media. Se destaca la frecuencia de suelos Arcillosos y Franco arcillo limosos.

### 5.2.2 Evaluación de eficiencia de goteo

Los resultados de la evaluación de los sistemas de riego se resumen en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Resumen de resultados de evaluación de uniformidad de riego.

<i>Lugar</i>	<i>CU (%)</i>	<i>Presión operación (mca)</i>	
<i>Bagaces</i>	66,4	6,1	
<i>San Vito 1</i>	80,9	7,7	
<i>San Vito 2</i>	81,2   75,9	0,7	8,4
<i>San Vito 3</i>	91,8	12,7	

Como es posible observar, el sistema de riego con mayor uniformidad es aquel que funciona cerca del punto de operación óptimo del gotero, que es 10 mca según dato proporcionado en la hoja técnica del fabricante. En el caso de la muestra San Vito 2, esta se trata de la muestra tomada en el proyecto con cultivos en terrazas. Particularmente, la uniformidad fue mayor para las camas cuya presión de operación era considerablemente menor a la presión de operación óptima del gotero. Este comportamiento puede deberse a tres situaciones:

- a. Error en el muestreo: La presencia de plástico cubre cama (Mulch) dificulta la identificación de goteros en la cinta y el posicionamiento de los recipientes colectores para la adquisición de las muestras.
- b. Obstrucción de goteros: Se observó en algunos módulos de Casa Sombra que el Mulch era instalado sobre la cama antes de situar las cintas de riego por goteo. Esto implicaba que, para colocar las cintas, era necesario desplazarlas debajo del plástico. Esta forma de instalación puede ocasionar el roce de los goteros con la superficie del suelo si la cinta no se introduce con cuidado, incrementando la probabilidad de que partículas de suelo se atoren en el orificio del gotero y lo obstruyan.
- c. Calidad del gotero: Las variaciones pueden deberse a desperfectos ocasionados durante la construcción del gotero y la cinta de gotero integrado. Es posible reemplazar la sección dañada con cinta nueva para solucionar el problema.

Este resultado de estimar los parámetros de riego para los sistemas evaluados puede ser observado en el Cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Corrección de tiempos de riego para los módulos evaluados.

<i>Lugar</i>	<i>EtrL (mm/día)</i>	<i>Tiempo de riego teórico (min) @ 2 L/h</i>	<i>Caudal (L/h)</i>	<i>Tiempo de riego corregido (min)</i>
<i>Bagaces</i>	6,7	22,1	0,3	170,7
<i>San Vito 1</i>	3,7	12,3	2,0	12,1
<i>San Vito 2</i>	3,7	12,3	0,4	67,6
<i>San Vito 3</i>	3,7	12,3	0,9	28,7

Como se evidencia, el ajuste necesario ocasionado por bajos caudales en los tiempos de riego es considerable. De estos resultados se extrae que el CU típico para los sistemas de riego instalados es de 80 %.

### 5.3 Diseño de nuevos proyectos

#### 5.3.1 Disposición de tuberías

Las características de las cintas de riego seleccionadas para los nuevos proyectos se pueden consultar en el Anexo 8. Las cintas de riego seleccionadas fueron la Netafin Streamline Plus con un caudal de 1 L/h y la AZUD Sprint con un caudal de 1,6 L/h. El criterio de selección fue el costo.

Las figuras 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 muestran un resumen de la disposición de tuberías para el sistema diseñado en la Finca Jilgueros de Nicoya.



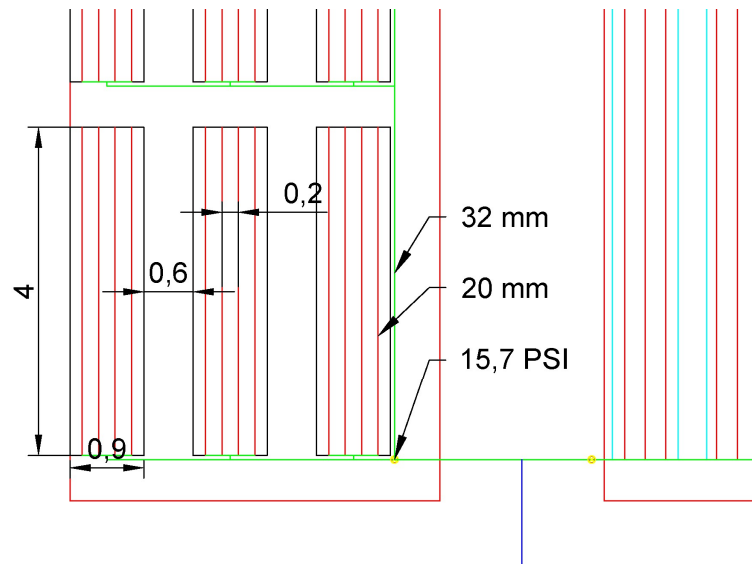


Figura 5.2. Disposición de cintas de riego en bancales. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD.

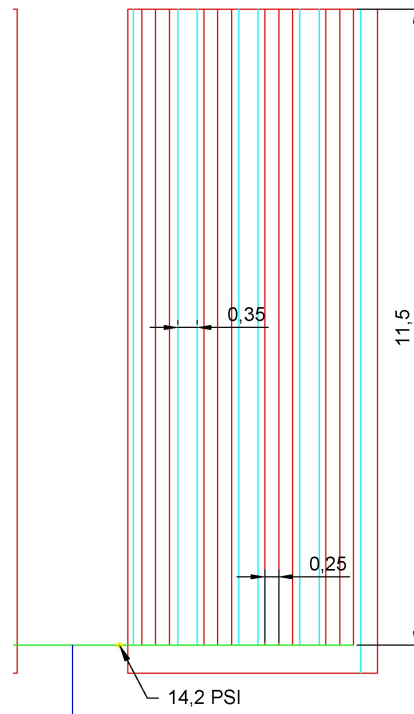


Figura 5.3. Disposición de cintas de riego en macro túnel. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD

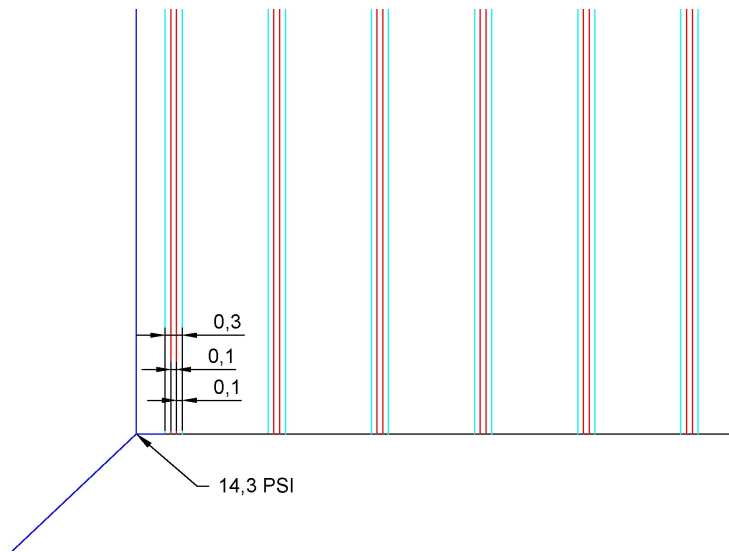


Figura 5.4. Disposición de cintas de riego en Casa Sombra. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD.

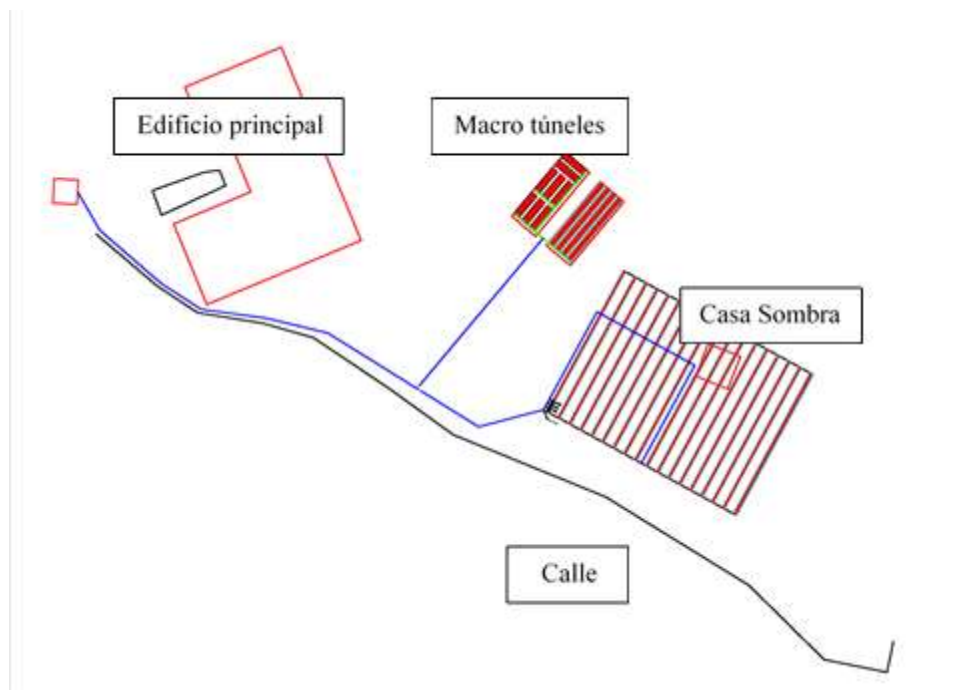


Figura 5.5. Croquis del sistema de riego diseñado en la Finca jilgueros. Fuente: elaboración propia con el software AutoCAD.

### 5.3.2 Evapotranspiración y riego

El Cuadro 5.4 detalla los resultados del proceso de diseño agronómico.

Cuadro 5.4. Resultados del diseño agronómico.

<i>Localización</i>	<i>Eto (mm/día)</i>	<i>Kc</i>	<i>Etc (mm/día)</i>	<i>EtrL (mm/día)</i>	<i>Lt (mm)</i>	<i>Sl (m)</i>	<i>Tr (min)</i>
<i>Llano bonito casa sombra</i>	3,1	1,2	3,6	3,3	4,8	0,4	10,9
<i>Jilgueros bancal</i>	7,5	1,2	8,7	7,9	11,6	0,2	15,7
<i>Jilgueros macro túnel</i>	7,5	1,2	8,7	7,9	11,6	0,4	25,5
<i>Jilgueros casa sombra</i>	7,5	1,2	8,7	7,9	11,6	0,9	125,4

Es importante observar que el resultado del tiempo de riego (Tr) muestra turnos muy cortos. Esto se debe a la alta densidad de goteros presente en las camas, dónde, aproximadamente, hay un gotero por planta.

Por otra parte, en el Cuadro 5.5 se encuentran tabulados los resultados obtenidos después de calcular el consumo hídrico para la producción frutal en Hojancha.

Cuadro 5.5. Resumen del consumo hídrico para el cultivo del Naranja

<i>Mes</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>	<i>J<sup>N</sup></i>	<i>Ji</i>	<i>A</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>Total</i>
<i>ETR mensual con cobertura</i>	83,2	82,8	98,8	95,2	78,9	66,9	73,5	73,6	63,4	63,0	81,5	88,0	948,9
<i>Precipitación</i>	3,9	7,2	22,0	65,7	263,4	308,8	245,3	312,8	386,7	398,7	120,1	20,1	2154,7
<i>Diferencia entre la Precipitación y la ETR mensual con cobertura vegetal sobre el suelo</i>	-79,3	-75,6	-76,8	-29,5	184,5	241,9	171,8	239,2	323,3	335,7	38,6	-67,9	1205,8

Se observa una marcada estación seca en los meses de Diciembre hasta Abril, los cuales, para suplir las necesidades del cultivo, requerirán de la implementación de sistemas de riego. Si no se dispone de fuentes de agua durante la época seca, también será necesaria la construcción de reservorios de agua que puedan abastecer el riego del área en producción.

El cálculo de la diferencia anual entre la precipitación y consumo hídrico es positivo, esto significa que la implementación de sistemas de cosecha de agua de lluvia para afrontar la época seca es una propuesta viable.

### 5.3.3 Porcentaje de área regada (PAR)

En el Cuadro 5.6 se presentan los resultados obtenidos al ajustar el método de Keller y Karmelli para otros valores de profundidad y espaciamiento.

Cuadro 5.6. Cálculo del PAR con ecuaciones de Schwartzmass.

Caudal menor a 1,5 L/h. Espaciamiento entre emisores de 30 cm.

<i>SL</i> (m)	<i>PAR</i>	<i>Área</i> <i>mojada</i> (m <sup>2</sup> )	<i>Diámetro</i> <i>bulbo</i> (m)	<i>Ksat</i> (m/s)	<i>Profundidad</i> (cm)	<i>Diámetro</i> <i>del bulbo</i> (m)	<i>Sl</i> (m)	<i>Área</i> <i>mojada</i> (m <sup>2</sup> )	<i>PAR</i>	<i>PAR</i> <i>corregido</i>
0.80	88	0,49	0,79	8,15E-07	20	0,69	0,10	0,03	1237,44	100,00
1.00	70	0,49	0,79	8,22E-07			0,20	0,06	618,72	100,00
1.20	58	0,49	0,79	8,29E-07			0,40	0,12	309,36	100,00
1.50	47	0,49	0,79	8,13E-07			0,60	0,18	206,24	100,00
2.00	35	0,49	0,79	8,22E-07			0,80	0,24	154,68	100,00
2.50	28	0,49	0,79	8,22E-07			1,00	0,30	123,74	100,00
3.00	23	0,48	0,78	8,40E-07			1,10	0,33	112,49	100,00
3.50	20	0,49	0,79	8,22E-07			1,20	0,36	103,12	100,00
4.00	18	0,50	0,80	7,88E-07			1,50	0,45	82,50	82,00
4.50	16	0,50	0,80	7,88E-07			2,00	0,60	61,87	62,00
5.00	14	0,49	0,79	8,22E-07			2,50	0,75	49,50	49,00
6.00	12	0,50	0,80	7,88E-07			3,00	0,90	41,25	41,00
			promedio	8,14E-07			2,00	0,60	61,87	62,00
							2,50	0,75	49,50	49,00
							3,00	0,90	41,25	41,00
							3,50	1,05	35,36	35,00

El error presente durante el cálculo de la  $K_{sat}$  es de un 2%, validando el procedimiento propuesto por El Autor. Este error se explica a través de un análisis de sensibilidad de la ecuación de Schwartzmass donde, para una variación de 2 decimales en el PAR se tiene que el  $K_{sat}$  varía en otros 2 decimales, pero un par de diámetros calculado con esas  $K_{sat}$  sólo difieren en 1 milésima. Es decir, el  $K_{sat}$  calculado es muy sensible, pero el cálculo del diámetro se ve poco afectado por dichas variaciones en el  $K_{sat}$ . Si se observa en el cuadro original los valores de PAR no tienen decimales, incurriendo esto en que un  $K_{sat}$  pueda tener  $\pm 5$  décimas de error.

En la Figura 5.6 se encuentra una representación gráfica de los  $K_{sat}$  calculados.

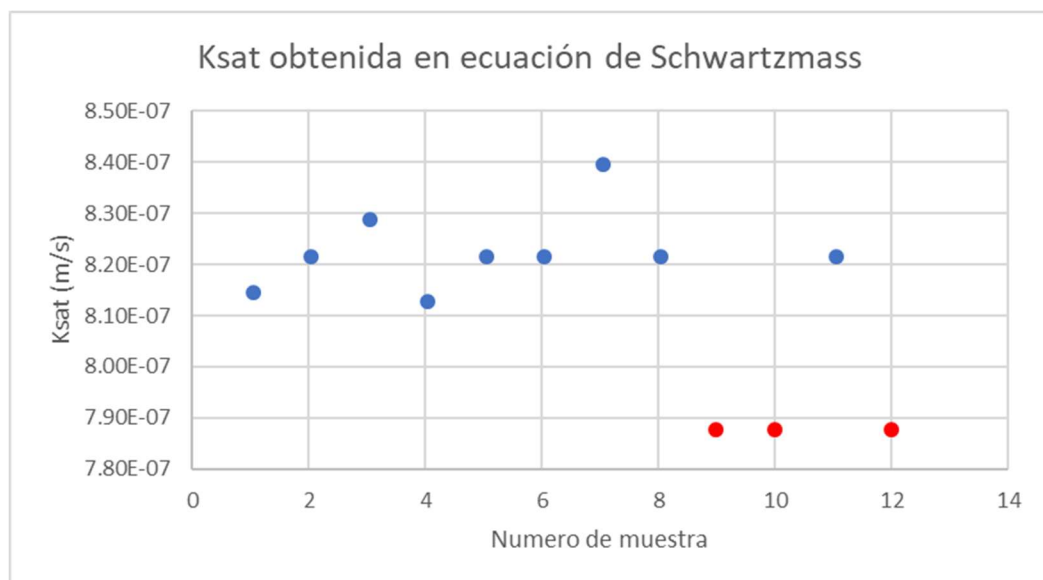


Figura 5.6. Representación gráfica de los  $K_{sat}$  calculados. Fuente: elaboración propia con el software Microsoft Excel 2017.

De las 12 muestras utilizadas en el cálculo, 3 se desvían de la tendencia. Aplicando el criterio de moda se retiran estos puntos y se genera el Cuadro 5.7.

Cuadro 5.7. Segundo cálculo del PAR con ecuaciones de Schwartzmass.

Caudal menor a 1,5 L/h. Espaciamiento entre emisores de 30 cm.

<i>SL (m)</i>	<i>PAR</i>	<i>Área mojada (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Diámetro bulbo (m)</i>	<i>Ksat (m/s)</i>	<i>Profundidad (cm)</i>	<i>Diámetro del bulbo (m)</i>	<i>Sl (m)</i>	<i>Área mojada (m<sup>2</sup>)</i>	<i>PAR</i>	<i>PAR corregido</i>
0,80	88	0,49	0,79	8,15E-07	20	0,69	0,10	0,03	1228,70	100,00
1,00	70	0,49	0,79	8,22E-07			0,20	0,06	614,35	100,00
1,20	58	0,49	0,79	8,29E-07			0,40	0,12	307,18	100,00
1,50	47	0,49	0,79	8,13E-07			0,60	0,18	204,78	100,00
2,00	35	0,49	0,79	8,22E-07			0,80	0,24	153,59	100,00
2,50	28	0,49	0,79	8,22E-07			1,00	0,30	122,87	100,00
3,00	23	0,48	0,78	8,40E-07			1,10	0,33	111,70	100,00
3,50	20	0,49	0,79	8,22E-07			1,20	0,36	102,39	100,00
4,00	18	0,50	0,80				1,50	0,45	81,91	82,00
4,50	16	0,50	0,80				2,00	0,60	61,44	61,00
5,00	14	0,49	0,79	8,22E-07			2,50	0,75	49,15	49,00
6,00	12	0,50	0,80				3,00	0,90	40,96	41,00
							2,00	0,60	61,44	61,00
							2,50	0,75	49,15	49,00
							3,00	0,90	40,96	41,00
							3,50	1,05	35,11	35,00

El error calculado para el nuevo conjunto de datos es del 0,96%.

### 5.3.4 Diseño hidráulico

Los caudales y diámetros de los diseños desarrollados están tabulados en el Cuadro 5.8, mientras que los resultados de pérdidas por fricción en el Cuadro 5.9. Las memorias de cálculo para cada proyecto pueden ser consultadas en los archivos digitales adjuntos en el CD que contiene este documento.

Cuadro 5.8. Diámetro y caudales de diseño.

<i>Lugar</i>	<i>Diámetro lateral (mm)</i>	<i>Caudal lateral (m<sup>3</sup>/h)</i>	<i>Diámetro múltiple (mm)</i>	<i>Caudal múltiple (m<sup>3</sup>/h)</i>	<i>Diámetro principal (mm)</i>	<i>Caudal principal (m<sup>3</sup>/h)</i>
<i>Llano bonito</i>	20	0,08	32	1,28	32	1,28
<i>Jilgueros banca</i>	20	0,01	32	1,71	32	1,71
<i>Jilgueros macro túnel</i>	20	0,04	32	2,40	32	2,40
<i>Jilgueros Casa Sombra</i>	20	0,15	32	2,45	32	2,45

Cuadro 5.9. Resumen de pérdidas de presión.

<i>Lugar</i>	<i>Pérdida lateral (mca)</i>	<i>Pérdida múltiple (mca)</i>	<i>Pérdida principal (mca)</i>	<i>Presión entrada lateral</i>	<i>Presión entrada múltiple</i>	<i>Presión entrada sistema (mca)</i>	<i>Presión distal (mca)</i>	<i>Porcentaje de variación</i>	<i>Potencia de bombeo (Hp)</i>
<i>Llano bonito</i>	0,01	0,21	0,75	10,01	10,17	10,92	9,95	0,5	0,07
<i>Jilgueros banca</i>	0,00	0,13	2,33	10,00	10,10	12,43	9,97	0,3	0,11
<i>Jilgueros macro túnel</i>	0,00	0,09	4,43	10,00	10,07	14,50	9,98	0,2	0,18
<i>Jilgueros Casa Sombra</i>	0,03	0,72	2,49	10,03	10,58	13,07	9,83	1,7	0,17



## **6. CONCLUSIONES**

- a. Los materiales de apoyo visual y técnico generados facilitaron la exposición del sistema de producción en ambiente protegido en charlas y reuniones con productores y agentes extensionistas. Se comprende que el desarrollo de este tipo de productos es de gran utilidad para proyectos técnicos donde se deban transmitir conocimientos a un público meta que no posee los mismos fundamentos técnicos que el profesional facilitador de la información.
- b. Los suelos de los terrenos utilizados para la producción agrícola cumplen con las propiedades de pH y salinidad adecuados para sostener una buena producción de hortalizas. De esta manera, se descarta que los rendimientos futuros se vean afectados por estos factores.
- c. Se expone una alta incidencia de bloqueos en los goteros, que repercute negativamente en la eficiencia de los sistemas.
- d. Los sistemas con bajos problemas de obstrucción presentan una buena uniformidad de riego, pero es necesario destacar el detrimento que ocasionan los goteros obstruidos en la uniformidad del sistema, que puede ser aún más alta.
- e. Debido a la alta densidad de goteros dispuestos para el riego de las camas de hortalizas, el PAR de diseño es del 100%.
- f. Los diseños generados para el INDER proveen a los productores de la información necesaria para la correcta operación del sistema de riego, comparado con el diseño original del cual, no se disponen datos técnicos como presiones de operación, láminas a depositar o tiempos de riego. Por situaciones ajenas al proyecto no fue posible acompañar la instalación del sistema diseñado.

## **7. RECOMENDACIONES**

- a. A través de la observación de los resultados obtenidos durante la evaluación de la uniformidad de riego de los módulos Casa Sombra se expone un problema generado por deficiencias en la presión de las fuentes de agua disponibles. Esto ocasiona que los sistemas actúen por debajo de su punto de operación y, además, obliga a compensar la reducción del caudal con un aumento en el tiempo de riego diario.
- b. Es necesario mejorar el proceso de selección de terrenos para la producción agrícola. No es posible desarrollar proyectos en zonas dónde no se dispone el acceso al agua o, que requieren transportarla a lo largo de varios kilómetros; en especial si estos proyectos están contemplados para el bienestar social, donde la capacidad adquisitiva de los beneficiarios no les permite procurarse sistemas de bombeo o almacenamiento de agua.
- c. Se observó que los productores encaran dificultades para adquirir los accesorios necesarios en la instalación y mantenimiento de los sistemas de riego, tanto en disponibilidad como en costo de adquisición. Esta carencia de materiales perjudica la operación de los sistemas de riego y adiciona un factor de vulnerabilidad durante la época seca por lo que es un factor que debe ser resuelto para asegurar una producción constante.
- d. Es necesario desarrollar una metodología social que permita la apropiación de los proyectos por parte de los beneficiarios. Además, ofrecer herramientas a los productores que les permitan no sólo empoderarse del proyecto, sino que también les sea posible establecer un sistema de desarrollo colaborativo en el cual los productores se apoyen mutuamente. Un buen ejemplo de este desarrollo social puede ser encontrado en el proyecto Casa Sombra de la Región Brunca donde los productores, además de recibir los módulos para la producción agrícola, también fueron capaces de organizar y mejorar el Centro Agrícola Cantonal, permitiéndoles así consolidar la colocación de sus productos en el mercado, beneficiándose a sí mismos y a la comunidad.
- e. Se debe implementar o mejorar el uso de canales de comunicación entre instituciones para facilitar el apoyo técnico de los beneficiarios.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- Autodesk © Inc. (2017). Autodesk © AutoCAD © (versión N° N.52.0.0). Autodesk ©, San Rafael, CA.
- British Columbia Ministry of Agriculture, C. (2015). *On-site testing of growing media and irrigation water*. British Columbia. Recuperado de [http://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/animal-and-crops/crop-production/on-site\\_testing\\_of\\_growing\\_media\\_and\\_irrigation\\_water\\_2015.pdf](http://www2.gov.bc.ca/assets/gov/farming-natural-resources-and-industry/agriculture-and-seafood/animal-and-crops/crop-production/on-site_testing_of_growing_media_and_irrigation_water_2015.pdf)
- Chavarría, A. (2013). *Apuntes de clase: Relación Suelo - Agua - Planta*. Cartago.
- Colegio de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica (CFIA). (2017). *Código de Instalaciones Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones*. Cartago: Editorial Tecnológica.
- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2015). Modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo en riego por goteo. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VI, 131-140.
- FAO. (1988). *Irrigation Water Management: Irrigation Methods*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Golberg, Gornat, & Rimon. (sf.). *Drip irrigation. Principles, design and practices*. na.: na.
- Havlin, J. (2005). *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education.
- Karmelli, D., & Keller, J. (1975). *Trickle irrigation design*. Glendora: Rain Bird Sprinkler.
- Keller, J. (1990). *Sprinkle and Trickle Irrigation*. Springer US.

- Medina San Juan, J. (1993). *Riego por goteo. Teoría y práctica*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Merriam, & Keller. (1973). *Irrigation system evaluation and improvement*. Logan: UTAH State University.
- Microsoft ©. (2016). Microsoft © Excel © 2016 MSO (version N° 16.0.9330.2124). [software PC]. Microsoft ©, Redmond, WA.
- Pizarro, F. (1990). *Riegos localizados de alta frecuencia*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Reddy, D. K. (2016, Febrero 17).
- Tomasella, J., & Hodnett, M. (1998). Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, 163, 190-202.
- Trimble Inc. (2016). SketchUp (version N° 17.0.18899). [software PC]. Trimble Inc, Sunnyvale, CA
- United States Department of Agriculture. (2010). *Multimodeling with Pedotransfer Functions. Documentation and User Manual for PTF Calculator*.
- United States Department of Agriculture. (s.f.). *Saturated Hydraulic Conductivity*. Recuperado de Natural Resources Conservation Service Soils: [https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2\\_074846](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/office/ssr10/tr/?cid=nrcs144p2_074846)
- Villalobos, M. (2001). *Fundamentos de Riego*. Cartago: Editorial Tecnológica.
- White, F. (1979). *Mecánica de Fluidos*. Madrid: Mcgraw-Hill/Interamericana de España.

## **9. ANEXOS**



## Anexo 1. Norma ASTM D-422

ASTM D-422-63 (R1998)

### METODO DE ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS DE SUELO

#### 1. ALCANCE

1.1 Esta guía cubre la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de las partículas en suelos. La distribución de tamaños de las partículas mayores a 75  $\mu$  m (retenidas en la malla 200) es determinado por tamizado, mientras que la distribución de tamaños de partículas menores a 75  $\mu$  m es determinado por un proceso de sedimentación usando un hidrómetro para obtener los datos necesarios (Notas 1 y 2).

*Nota 1: La separación puede ser hecha en la malla N°4 (4.75 mm), N°40 (425  $\mu$  m) o en la N° 200, en lugar de la N° 10. Cualquiera que se escoja debe indicarse en el reporte.*

*Nota 2: Se dispone de dos tipos de aparato para lograr la dispersión del suelo 1-el agitador mecánico de alta velocidad y 2-el de dispersión por aire. Investigaciones extensivas indican que la dispersión por aire produce resultados más positivos en suelos plásticos de tamaño menor que 20  $\mu$  m y una apreciable menor degradación en todos los tamaños en el caso de suelos arenosos. Debido a estas ventajas se recomienda el uso de dispersión por aire. Los resultados de ambos tipos de aparatos, difieren en magnitud, dependiendo del tipo de suelo, llegando a marcadas diferencias en la distribución de tamaños de partículas, especialmente para tamaños más finos que 20  $\mu$  m.*

#### 2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA

##### 2.1 Normas ASTM

D421 Preparación en seco, de muestras de suelo para Análisis del tamaño de las partículas y para la Determinación de las constantes del suelo.

E11 Especificación para mallas de tela y alambre para propósitos de ensayo.

E100 Especificación para hidrómetros según ASTM

#### 3. APARATOS

3.1 Balanzas. Una balanza con una precisión de 0.01 g para pesar el material pasando la malla N°10 (2.0 mm) y una balanza con precisión del 0.1% de la masa de la muestra para pesar la parte que quedó retenida en la malla N° 10.

3.2 Aparatos de agitación. Cualquiera de los aparatos A o B pueden ser usados.

3.2.1 El aparato A consiste en agitador operado mecánicamente donde un motor eléctrico gira un eje vertical a una velocidad no menor de 10000 rpm sin carga. El eje está equipado con un agitador de metal, plástico o goma como se muestra en la figura 1. El eje debe ser suficientemente largo para que el agitador no opere a menos de 19 mm. ni más de 38.1 mm del fondo de la copa de dispersión. Se debe disponer de una copa especial (conforme

cualquiera de los diseños mostrados en la figura 2) que contenga la muestra mientras está siendo dispersada, puede usar cualquiera de los dos tipos de copa de dispersión.

3.2.2 El aparato B consiste en una copa de dispersión con aire conforme los detalles generales mostrados en la figura 3 (Notas 4 y 5).

*Nota 3. La cantidad de aire requerido es del orden de 2 pie<sup>3</sup>/min. Algunos compresores de aire pequeños no son capaces de suplir suficiente cantidad de aire para operar el equipo.*

*Nota 4. Otro aparato de dispersión con aire, conocido como tubo de dispersión, desarrollado por Chu y Davidson en la Universidad Estatal de Iowa, ha demostrado dar resultados equivalentes a los del equipo tradicional de aire. Cuando se usa este aparato la saturación de la muestra puede ser realizada en el cilindro de sedimentación sin necesidad de transferir el espécimen. Cuando se use el tubo de dispersión debe indicarse así en el reporte.*

*Nota 5. Se puede condensar agua en las líneas de aire cuando no se usan. Esta agua debe ser removida de alguna forma antes de usar el aire para dispersión.*

3.3 Hidrómetro. Un hidrómetro ASTM, graduado para leer gravedad específica de la suspensión o gramos por litro de suspensión, y conforme los requerimientos para hidrómetros 151H o 152H en la especificación E100. Las dimensiones de ambos son iguales. La escala es la única diferencia.

3.4 Cilindro de sedimentación. Un cilindro de vidrio de 457 mm de altura y 63.5 mm. de diámetro y marcado para un volumen de 1000 ml. El diámetro interno debe ser tal que la marca de los 1000 ml esté a 36± 2 cm. del fondo.

3.5 Termómetro. Un termómetro con precisión de 0.5°C.

3.6 Mallas. Una serie de mallas de trama cuadrada, conforme los requerimientos de la especificación E11. Un set completo incluye lo siguiente (Nota 6):

3" (75 mm)	Nº 10 (2.00 mm)
2" (50 mm)	Nº 20 (850 µm)
1.5" (37.5 mm)	Nº 40 (425 µm)
1" (25.0mm)	Nº 60 (250 µm)
¾" (19.0 mm)	Nº 140 (106 µm)
3/8" (9.5 mm)	Nº 200 (75 µm)
Nº 4 (4.75 mm)	

*Nota 6. Una serie de mallas con puntos uniformemente espaciados para el gráfico, como se requiere en la sección 17, puede ser usado si se desea. Esta serie consiste en las siguientes mallas:*

3" (75 mm)	Nº 16 (1.18 mm)
1.5" (37.5 mm)	Nº 30 (600 µm)

¾" (19.0 mm)	Nº 50 (300 µm)
3/8" (9.5 mm)	Nº 100(150 µm)
Nº 4 (4.75 mm)	Nº 200 (75 µm)
Nº 8 (2.36 mm)	

3.7 Baño María o Sala de temperatura constante. Un baño María o sala de temperatura constante para mantener la suspensión de suelo a temperatura constante durante el análisis del hidrómetro. Un tanque de agua satisfactorio es un tanque aislado el cual mantiene la suspensión a una temperatura constante conveniente cercana a 20°C. Como el dispositivo que se ilustra en fig. 4. En casos donde el trabajo es realizado en un cuarto a temperatura constante controlado automáticamente, el baño maría no es necesario.

3.8. Beaker (capacidad de 250ml).

3.9. Dispositivo de la sincronización. Reloj o cronómetro.

#### 4. AGENTE DE DISPERSIÓN

4.1. Debe usarse una solución de metafosfato de sodio en agua destilada o desmineralizada, en una proporción de 40 g de metafosfato de sodio por litro de solución (Nota 7).

*Nota 7. Soluciones con esta sal, si es ácida, puede revertir lentamente o hidrolizar de vuelta a la forma de ortofosfato, con la disminución resultante de la acción dispersiva. Las soluciones deben ser preparadas frecuentemente (al menos una vez al mes) o ajustar el PH a 8 o 9 por medio de carbonato de sodio. Las botellas que contienen la solución deben estar marcadas con la fecha de preparación.*

4.2. Toda el agua a utilizar será destilada o desmineralizada. El agua para la prueba con el hidrómetro será traída a la temperatura que se espera que prevalezca durante la prueba del hidrómetro. Por ejemplo si el cilindro de sedimentación es colocado en un baño maría, el agua destilada o desmineralizada será traída a la temperatura controlada del baño maría; o si el cilindro de sedimentación es usado en un cuarto con control de temperatura, el agua para la prueba puede estar a la temperatura del cuarto. La temperatura básica para la prueba del hidrómetro es 20°C. Variaciones pequeñas de temperatura no introducen diferencias de gran significado en la práctica y no prevén el uso de las correcciones derivadas según lo establecido.

#### 5. MUESTRA DE PRUEBA

5.1. Prepare la muestra de la prueba para el análisis mecánico conforme a la práctica D 421. Durante el procedimiento de preparación la muestra se divide en dos porciones Una porción contiene solamente las partículas retenidas en la malla Nº 10, mientras que la otra porción contiene solamente las partículas que pasan la malla Nº 10. La masa de suelo secado al aire seleccionada para propósito de pruebas, como se indica en la práctica D 421, será suficiente para rendir las cantidades para el análisis mecánico como sigue:

5.1.1 El tamaño de la porción que retenida en la malla N° 10 dependerá del tamaño máximo de la partícula, según la siguiente tabla:

Diámetro nominal de las Partículas más grandes	Masa aproximada mínima de la porción (g)
3/8" (9,5)	500
3/4" (19,0)	1000
1" (25,4)	2000
1 1/2" (38,1)	3000
2" (50,8)	4000
3" (76,2)	5000

5.1.2. El tamaño de la porción que pasa la malla N° 10 deberá ser aproximadamente 115 g para suelos arenosos y aproximadamente 65 g para limos y arcilla.

5.2. Se hace una provisión en la Sección 5 de la Práctica D 421, para pesaje de suelos secados al aire para propósito de ensayos, la separación del suelo sobre la malla N° 10, por tamizaje en seco y prueba de lavado, y el pesado de la fracción lavada y secada que es retenida en la malla N° 10. De estas dos masas pueden ser calculados los porcentajes retenidos y pasando la malla N° 10 de acuerdo con 12.1.

Nota 8. Se puede asegurar una verificación de los valores de masa y una pulverización minuciosa de los terrones, pesando la porción pasando la malla N° 10 y sumando este valor a la masa de la porción lavada y secada al horno de la porción retenida en esa misma malla.

#### ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LA PORCIÓN RETENIDA EN LA MALLA N° 10 (2 MM)

### 6. PROCEDIMIENTO

6.1. Separe la porción retenida en la malla N°10 (2mm), en una serie de fracciones usando las mallas: 3" (75mm), 2" (50mm), 1 1/2" (37.5mm), 1" (25mm), 3/4" (19mm), 3/8" (9.5mm), N°4 (4.75mm) y N° 10, o tantas como se necesiten dependiendo de la muestra o especificaciones para el material bajo prueba.

6.2. Conduzca la operación de tamizaje por medio de un movimiento lateral y vertical de la malla acompañado de sacudidas con el fin de mantener la muestra continuamente en movimiento sobre la superficie de la malla. En ningún caso voltee o manipule fragmentos de la muestra a través de la malla con la mano. Continúe tamizando hasta que no más del 1 % de la masa del residuo de la malla pase a través de ella durante 1 minuto de tamizaje. Cuando se utiliza el tamizador mecánico, pruebe la minuciosidad del tamizaje usando el método manual según lo descrito anteriormente.

6.3. Determine la masa de cada fracción en una balanza conforme a los requerimientos de 3.1. Al final del pesado, la suma de las masas retenida en todas las mallas usadas debe ser aproximadamente igual a la masa original de la cantidad tamizada.

#### ANÁLISIS CON HIDRÓMETRO Y TAMIZADO DE LA FRACCIÓN PASANDO LA MALLA N° 10 (2.0 MM)

### 7. DETERMINACIÓN DE LA CORRECCIÓN COMPUESTA PARA LA LECTURA DEL HIDRÓMETRO

7.1. Las ecuaciones para porcentajes de suelo que permanece en suspensión, según lo dado en 14.3 se basan en el uso del agua destilada o desmineralizada. Se utiliza un agente de dispersión en el agua, sin embargo, y la gravedad específica del líquido resultante es apreciablemente mayor a la del agua destilada o desmineralizada.

7.1.1. Ambos hidrómetros están calibrados a 20° C, y las variaciones de la temperatura estándar producen inexactitudes en las lecturas actuales del hidrómetro. La cantidad de la inexactitud aumenta mientras que la variación de la temperatura estándar aumenta.

7.1.2. Los hidrómetros son graduados por el fabricante para leerse bajo el menisco formado por el líquido en el vástago. Puesto que no es posible asegurar lecturas de las suspensiones del suelo en el fondo del menisco, las lecturas se deben tomar en la parte superior y aplicar la corrección.

7.1.3. La cantidad neta de las correcciones para los tres artículos enumerados se señala como la corrección compuesta, y puede ser determinada experimentalmente

7.2. Para conveniencia, un gráfico o una tabla de las correcciones compuestas para una serie de diferencias de temperatura de 1° para el rango de temperaturas previstas de la prueba se puede preparar y utilizar según lo necesitado. La medida de las correcciones compuestas pueden ser hechas a dos temperaturas que cubran el rango de las temperaturas previstas de la prueba, y las correcciones para las temperaturas intermedias, calculadas asumiendo una relación de línea recta entre los dos valores observados.

7.3. Prepare 1000 ml de líquido compuesto de agua destilada o desmineralizada y el agente de dispersión en la misma proporción que prevalecerá en la prueba de la sedimentación (hidrómetro). Coloque el líquido en el cilindro de sedimentación y el cilindro en el baño maría a temperatura constante, fije una temperatura de las dos a utilizar. Cuando la temperatura del líquido llega a ser constante, inserte el hidrómetro, y, después de un intervalo corto para permitir que el hidrómetro alcance la temperatura del líquido, lea el hidrómetro en la parte superior del menisco formado en el vástago. Para el hidrómetro 151H la corrección compuesta es la diferencia entre ésta lectura y uno; para el hidrómetro 152H es la diferencia entre la lectura y cero. Lleve el líquido y el hidrómetro a la otra temperatura a utilizar, y asegure la corrección compuesta como antes.

### 8. HUMEDAD HIGROSCÓPICA

8.1. Cuando la muestra se pesa para la prueba del hidrómetro, se pesa una porción auxiliar de 10 a 15 g en un envase pequeño metálico o de cristal, seque la muestra a una masa constante en horno  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , y pesa otra vez. Registre las masas.

## 9. DISPERSIÓN DE LA MUESTRA DE SUELO

9.1. Cuando el suelo es sobre todo de tamaños de arcilla y limo, pese una muestra del suelo seco al aire de aproximadamente 50 g. Cuando el suelo es sobre todo arena la muestra debe ser aproximadamente 100 g.

9.2. Coloque la muestra en el beaker de 250 mL y agregue 125 ml de solución de metafosfato de sodio ( 40 g/L). Revuelva hasta que el suelo se moje a fondo. Permita saturar por lo menos 16 h.

9.3. Al final del período de saturación, disperse la muestra usando cualquier aparato para revolver A o B. Si el aparato A es utilizado, transfiera el suelo del beaker a la taza especial de la dispersión mostrada en fig. 2, lavando cualquier residuo del beaker en la taza con agua destilada o desmineralizada (Nota 9). Agregue agua destilada o desmineralizada, en caso de necesidad, de modo que la taza esté más de la mitad llena. Revuelva por un período de 1 min.

*Nota 9. Una jeringa de tamaño grande es conveniente para manipular el agua en la operación de lavado. Otros aparatos incluyen una botella de lavado y una manguera con boquilla conectada a un tanque de agua destilada presurizado.*

9.4. Si se utiliza el aparato B (la fig. 3), quite el casquillo de la cubierta y conecte la copa al supridor de aire comprimido por medio de una manguera de goma. Un indicador de aire debe estar en la línea entre la taza y la válvula de control. Abra la válvula de control de modo que el medidor indique 1psi (7 kPa ) de presión manométrica (Nota 10). Transfiera la mezcla de agua-suelo del beaker a la taza de la dispersión lavando con agua destilada o desmineralizada. Agregue el agua destilada o desmineralizada, en caso de necesidad, de modo que el volumen total en la taza sea 250 ml, pero no más.

*Nota 10. Se requiere de una presión inicial de 1 psi para prevenir que la mezcla de de agua-suelo entre en la cámara de inyección de aire, cuando la mezcla es transferida a la copa de dispersión.*

9.5. Coloque la tapa sobre la taza y abra la válvula de control del aire hasta la presión manométrica sea 20 psi (kPa 140). Disperse el suelo según siguiente tabla:

Índice de la plasticidad	Periodo de dispersión (min)
Debajo de 5	5
6 a 20	10
Sobre 20	15

Los suelos que contienen grandes porcentajes de mica necesitan ser dispersados por solamente 1 min. Después del período dispersión, reduzca la presión manométrica a 1 psi preparado para trasladar la mezcla agua-suelo al cilindro de la sedimentación.

## 10. PRUEBA DEL HIDRÓMETRO

10.1. Inmediatamente después de la dispersión, transfiera la mezcla de agua-suelo al cilindro de vidrio de sedimentación y agregue agua destilada o desmineralizada hasta que el volumen total sea 1000 mL.

10.2. Coloque la palma de la mano, sobre el extremo abierto del cilindro (o un tapón de goma en el extremo abierto), Vuélva el cilindro al revés y de nuevo a su posición original por un periodo de 1 min para completar la agitación de la mezcla (Nota 11). Al terminar el minuto coloque el cilindro en una posición conveniente y tome lecturas del hidrómetro en los siguientes intervalos de tiempo (medido desde el principio de la sedimentación), o tantas como puede ser necesario, dependiendo de la muestra o de la especificación para el material bajo prueba: 2, 5, 15, 30, 60, 250, y 1440 min. Si se utiliza el baño maría, el cilindro de sedimentación se debe colocar en el baño entre las lecturas de 2 y 5 min.

*Nota 11. El número de vueltas durante este minuto debería ser aproximadamente 60, contando como dos vueltas volver hacia abajo y volver a la posición normal. Cualquier suelo que quede en el fondo del cilindro durante las primeras vueltas, debe ser soltado mediante agitado vigoroso del cilindro mientras este está en la posición invertida.*

10.3. Cuando se desea tomar una lectura del hidrómetro, inserte cuidadosamente el hidrómetro cerca de 20 a 25 s antes de leer hasta aproximadamente la profundidad que tendrá cuando se tome la lectura. Tan pronto como se toma la lectura, quite cuidadosamente el hidrómetro y colóquelo con un movimiento de rotación en agua graduada, limpia, destilada o desmineralizada .

*Nota 12. Es importante remover el hidrómetro inmediatamente después de cada lectura. Las lecturas son tomadas en la parte superior del menisco formado por la suspensión alrededor del bástago, no es posible asegurar lecturas en el fondo del menisco.*

10.4. Después de cada lectura, tome la temperatura de la suspensión insertando el termómetro en la suspensión.

## 11. ANÁLISIS POR TAMIZAJE

11.1. Después de tomar la lectura final del hidrómetro, pase la suspensión a la malla N° 200 y se lava con agua hasta que el agua de lavado esté clara. Transfiera el material del tamiz N° 200 a un envase conveniente, seque en un horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  y haga un análisis de mallas de la porción retenida, usando tantas mallas como se desee o requiera el material o según la especificación del material bajo prueba.

## CÁLCULOS E INFORME

### 12. VALORES PARA EL ANÁLISIS DE MALLAS PARA LA PORCIÓN MÁS GRUESA QUE LA MALLA N° 10 (2.00 MM)

12.1. Calcule el porcentaje pasando la malla N° 10, dividiendo la masa pasando la malla N° 10 por la masa de suelo que originalmente se dividió en la malla N°10 y multiplicando el resultado por 100. Para obtener la masa pasando la malla N° 10, reste la masa retenida en el tamiz N° 10 de la masa original.

12.2. Para obtener la masa total del suelo que pasa el tamiz del N° 4 (4.75mm), sume a la masa de material que pasa el tamiz N° 10 la fracción de material que pasa el tamiz N° 4 y retenida en el tamiz N° 10. Para obtener la masa total de suelo pasando malla 3/8" (9.5 mm), sume a la masa total de suelo que pasa el tamiz N° 4, la masa de la fracción que pasa el tamiz de 3/8" y retenida en el tamiz N° 4. Para los tamices restantes, continúe los cálculos de manera semejante.

12.3 Para determinar el porcentaje total que pasa por cada tamiz, divida la masa total que pasa (ver 12.2), por el total de la masa de la muestra y multiplique el resultado por 100.

### 13. FACTOR DE CORRECCIÓN POR HUMEDAD HIGROSCÓPICA

13.1 El factor de corrección por humedad higroscópica es el cociente entre la masa de la muestra seca al horno y la masa seca al aire antes de secarse. Es un número menor que uno, a menos que no haya humedad higroscópica.

### 14. PORCENTAJES DEL SUELO EN SUSPENSIÓN

14.1. Calcule la masa seca al horno del suelo usado en el análisis del hidrómetro, multiplicando la masa seca al aire por el factor de corrección por humedad higroscópica.

14.2. Calcule el masa de muestra total representada por la masa del suelo que se utilizó en prueba del hidrómetro, dividiendo la masa seca al horno usada, por el porcentaje pasando la malla N° 10 y multiplicando el resultado por 100. Este valor es el peso W en la ecuación para el porcentaje que permanece en suspensión.

14.3. El porcentaje de suelo que permanece en suspensión al nivel en el cual el hidrómetro está midiendo la densidad de la suspensión puede ser calculado como sigue (Nota13):

Para el hidrómetro 151 H:

$$P = [(100 \text{ OOO} / W) \times G / (G - G_1)] (R - G_1)$$



*Nota 13. La porción entre paréntesis cuadrados de la ecuación para el hidrómetro 151 H es constante para una serie de lecturas y puede ser calculada primero y luego multiplicada por la parte entre paréntesis.*

Para el hidrómetro 152H:

$$P = (Ra/W) \times 100$$

donde:

a = factor de corrección a ser aplicado a la lectura del hidrómetro 152H. (Los valores mostrados en la escala son calculados usando una gravedad específica de 2.65. Los factores de corrección son dados en la Tabla 1).

P = porcentaje del suelo que permanece en suspensión al nivel en el cual el hidrómetro mide la densidad de la suspensión

R = la lectura del hidrómetro con la corrección compuesta aplicada (Sección 7)

W = masa de suelo seca al horno en una muestra total de prueba representada por la masa del suelo dispersada (ver 14.2),g.

G = gravedad específica de las partículas del suelo

G<sub>l</sub> = gravedad específica del líquido en el cual se suspenden las partículas del suelo. Utilice el valor numérico de uno en ambos casos en la ecuación. En el primer caso cualquier variación posible no produce ningún efecto significativo, y en el segundo caso, la corrección compuesta para R se basa en un valor de uno para G<sub>l</sub>.

Tabla 1. Valores de factor de corrección, a, para diferentes gravedades específicas de las partículas de suelo

Gravedad específica	Factor de corrección
2.95	0.94
2.90	0.95
2.85	0.96
2.80	0.97
2.75	0.98
2.70	0.99
2.65	1.00
2.60	1.01
2.55	1.02
2.50	1.03
2.45	1.05

Para ser utilizados para el porcentaje de suelo que permanece en suspensión usando el hidrómetro 152H.

## 15. DIÁMETRO DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO

15.1. El diámetro de una partícula que corresponde al porcentaje indicado por una lectura dada del hidrómetro será calculado según la ley de Stokes (Nota 14), sobre la base que una partícula de este diámetro estaba en la superficie de la suspensión al principio de la sedimentación y se había colocado al nivel en el cual el hidrómetro está midiendo la densidad de la suspensión. Ver Tabla 2

Según ley Stokes:

$$D = \sqrt{\frac{30n}{980(G - G_1)}} \times L/T$$

donde:

D = diámetro de la partícula, mm

n = coeficiente de la viscosidad del medio de suspensión (en este caso agua) en poises (varía con los cambios en la temperatura del medio de suspensión),

L = distancia de la superficie de la suspensión al nivel en el cual la densidad de la suspensión está siendo medida cm. (Para un hidrómetro y cilindro sedimentador dados, los valores varían según las lecturas del hidrómetro. Esta distancia se conoce como profundidad efectiva (ver Tabla 2)

T = intervalo de tiempo desde el principio de la sedimentación hasta la toma de la lectura, min

G = gravedad específica de las partículas del suelo

G<sub>1</sub> = gravedad específica (densidad relativa) del medio de suspensión (el valor puede ser 1,000 para todos los propósitos prácticos).

*Nota 14. Dado que la ley de Stokes considera la velocidad final de una esfera simple cayendo en un líquido infinito, el tamaño calculado representa el diámetro de esferas que caerían a la misma velocidad que las partículas de suelo.*

15.2. Por conveniencia en los cálculos la ecuación anterior puede ser escrita como sigue (ver Tabla 3):

$$D = K(L/T)^{1/2}$$

donde:

K = constante que depende de la temperatura de la suspensión y la gravedad específica de las partículas del suelo. Valores de K para un rango de temperaturas y gravedades específicas se muestran en la Tabla 3. El valor de K no cambia para una serie de lecturas que constituyen una prueba, mientras valores de L y T varían.

## 16. VALORES PARA EL ANÁLISIS DE MALLAS PARA LA PORCIÓN MÁS FINA QUE LA MALLA N° 10 (2MM)

16.1 El cálculo de los porcentajes que pasan de varias mallas usadas para tamizar la porción de la muestra de la prueba del hidrómetro, implica varios pasos. El primer paso es calcular la masa de la fracción que habría sido retenida en el tamiz N° 10 si no hubiera sido removida. Esta masa es igual al porcentaje total retenido en la malla N° 10 (100 menos el porcentaje pasando total) veces la masa de la muestra total representada por la masa del suelo usada (según lo calculado en 14.2), y el resultado dividido por 100.

16.2. Calcule después la masa total que pasa el tamiz N° 200. Agregue juntas las masas fraccionarias retenidas en todas las mallas, incluyendo la malla N° 10 y reste esta suma a la masa total de la muestra (como se calculó en 14.2).

16.3. Calcule después las masas totales que pasan cada una de las mallas, de una manera similar a la dada en 12.2.

16.4. Calcule por último los porcentajes totales que pasan, dividiendo la masa total que pasa (según lo calculado en 16,3) por la masa total de la muestra (según lo calculado en 14,2), y multiplique el resultado por 100.

## 17. GRAFICO

17.1. Cuando se realiza el análisis del hidrómetro, debe hacerse un gráfico de los resultados de la prueba, ploteando los diámetros de las partículas en una escala logarítmica como abscisa y los porcentajes más pequeños que los diámetros correspondientes en una escala aritmética en la ordenada. Cuando no se hace el análisis del hidrómetro en una porción del suelo, la preparación del gráfico es opcional, puesto que los valores se pueden obtener directamente de datos tabulados.

## 18. INFORME

18.1. El informe debe incluir lo siguiente:

18.1.1. Tamaño máximo de partículas,

18.1.2. Porcentaje que pasa (o retenido sobre) cada malla, puede ser tabulado o representado en un gráfico (Nota 16),

18.1.3. Descripción de las partículas de la arena y de la grava:

18.1.3.1. Forma: redondeada o angular,

18.1.3.2. Dureza-duros y durables, suaves, o meteorizada y friable,

18.1.4. Gravedad específica, si es inusualmente alta o baja,

18.1.5. Cualquier dificultad en la dispersión de la fracción que pasa la malla N° 10, indicando cualquier cambio en tipo y cantidad de agente de dispersión y

18.1.6. El dispositivo de la dispersión usado y la longitud del periodo dispersión.

*Nota 16. La tabulación o gráfico representa la graduación del material ensayado. Si se removieron partículas más grandes de la muestra antes del ensayo, el informe debe indicar la cantidad y el tamaño máximo.*

18.2. Para los materiales probados para la conformidad con especificaciones definidas, las fracciones exigidas para tales especificaciones serán reportadas. Las fracciones más pequeñas que el tamiz N°10 serán leídas en el gráfico.

18.3. Para los materiales para los cuales no se indica especificaciones definidas y cuando el suelo se compone casi completamente por partículas que pasan tamiz N° 4 (4.75 mm), los resultados leídos en el gráfico serán reportados como sigue:

1. Grava, pasando 75 mm y retenida en la malla N°4 .....

2. Arena, pasando la N° 4 y retenida en la malla N° 200.....

a-Arena gruesa, pasando la N°o 4 y retenido en la N° 10

- b-Arena mediana, pasando la N° 10 y retenido en la N° 40
- c-Arena fina, pasando la N° 40 y retenido en la N° 200
- 3.Tamaño limo, 0.074 a 0.005mm
- 4.Tamaño arcilla más pequeña que 0.005mm  
Coloides, más pequeños que 0.001 mm

18.4. Para los materiales para los cuales no se indica especificaciones definidas y cuando el suelo contiene el material retenido en el tamiz N° 4 suficiente para requerir un análisis de mallas de esa porción, los resultados deben ser reportados como sigue (Nota 17):

ANALISIS DE MALLAS	
TAMAÑO DE MALLA	PORCENTAJE PASANDO
3"	.....
2"	.....
1.5"	.....
1"	.....
3/4"	.....
3/8"	.....
N°4	.....
N° 10	.....
N°40	.....
N°200	.....

ANALISIS CON HIDROMETRO	
0.074 mm	.....
0.005 mm	.....
0.001 mm	.....

*Nota 17. Las mallas N°8 y N°50 pueden ser sustituidas por la N°10 y la N°40.*

TABLA 2  
Valores de profundidad efectiva basados en el hidrómetro y cilindro de sedimentación del tamaño especificado (A)

HIDROMETRO 151H		HIDROMETRO 152H			
Lectura Actual	Profundidad	Lectura Actual	Profundidad	Lectura Actual	Profundidad
Hidrómetro	Efectiva L, cm	Hidrómetro	Efectiva L, cm	Hidrómetro	Efectiva L, cm
1,000	16,3	0	16,3	31	11,2
1,001	16	1	16,1	32	11,1
1,002	15,8	2	0,2	33	10,9
1,003	15,5	3	15,8	34	10,7
1,004	15,2	4	15,6	35	10,6
1,005	15	5	15,5	36	10,4
1,006	14,7	6	15,3	37	10,2
1,007	14,4	7	15,2	38	10,1
1,008	14,2	8	15,0	39	9,9
1,009	13,9	9	14,8	40	9,7
1,010	13,7	10	14,7	41	9,6
1,011	13,4	11	14,5	42	9,4
1,012	13,1	12	14,3	43	9,2
1,013	12,9	13	14,2	44	9,1
1,014	12,6	14	14,0	45	8,9
1,015	12,3	15	13,8	46	8,8
1,016	12,1	16	13,7	47	8,6
1,017	11,8	17	13,5	48	8,4
1,018	11,5	18	13,3	49	8,3
1,019	11,3	19	13,2	50	8,1
1,020	11	20	13,0	51	7,9
1,021	10,7	21	12,9	52	7,8
1,022	10,5	22	12,7	53	7,6
1,023	10,2	23	12,5	54	7,4
1,024	10	24	132,4	55	7,3
1,025	9,7	25	12,2	56	7,1
1,026	9,4	26	12,0	57	7,0
1,027	9,2	27	11,9	58	6,8
1,028	8,9	28	11,7	59	6,6
1,029	8,6	29	11,5	60	6,5
1,030	8,4	30	11,4		
1,031	8,1				
1,032	7,8				
1,033	7,6				
1,034	7,3				
1,035	7				
1,036	6,8				
1,037	6,5				
1,038	6,2				

A- Los valores de profundidad efectiva se calculan de la ecuación

$$L=L_1+1/2(L_2-(V_B/A))$$

Donde:

L= profundidad efectiva, cm

$L_1$ = distancia a lo largo del bástago del hidrómetro, desde la parte superior del bulbo, hasta la marca de una lectura del hidrómetro, cm  
 $L_2$ =longitud total del bulbo del hidrómetro, cm  
 $V_B$ =volumen del bulbo, cm<sup>3</sup>  
 $A$ =área seccional del cilindro de sedimentación, cm<sup>2</sup>

Los valores usados en la Tabla 2 son los siguientes:  
 Para ambos hidrómetros 151H y 152H

$L_2$ = 14.0 cm  
 $V_B$ =67.0 cm<sup>3</sup>  
 $A$ = 27.8 cm<sup>2</sup>

Para el hidrómetro 151H:

$L_1$ = 10.5 cm para una lectura de 1.000  
 2.3 cm para una lectura de 1.031

Para el hidrómetro 152H:

$L_1$ = 10.5 cm para una lectura de 0g/litro  
 2.3 cm para una lectura de 50g/litro

**TABLA 3**  
 Valores de K para usar en la ecuación para calcular diámetro de partículas en Análisis con Hidrómetro

Temperatura °C	Gravedad específica de las partículas de suelo								
	2,45	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,80	2,85
16	0,01510	0,01505	0,01481	0,01457	0,01435	0,01414	0,01394	0,01374	0,01356
17	0,01511	0,01486	0,01462	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
18	0,01492	0,01467	0,01443	0,01421	0,01399	0,01378	0,01359	0,01339	0,01321
19	0,01474	0,01449	0,01425	0,01403	0,01382	0,01361	0,01342	0,01323	0,01305
20	0,01456	0,01431	0,01408	0,01386	0,01365	0,01344	0,01325	0,01307	0,01289
21	0,01438	0,01414	0,01391	0,01369	0,01348	0,01328	0,01309	0,01291	0,01273
22	0,01421	0,01397	0,01374	0,01353	0,01332	0,01312	0,01294	0,01276	0,01258
23	0,01404	0,01381	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261	0,01243
24	0,01388	0,01365	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246	0,01229
25	0,01372	0,01349	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232	0,01215
26	0,01357	0,01334	0,01312	0,01291	0,01272	0,01253	0,01235	0,01218	0,01201
27	0,01342	0,01319	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204	0,01188
28	0,01327	0,01304	0,01283	0,01264	0,01244	0,01225	0,01208	0,01191	0,01175
29	0,01312	0,0129	0,01269	0,01249	0,01230	0,01212	0,01195	0,01178	0,01162
30	0,01298	0,01276	0,01256		0,01217	0,01199	0,01182	0,01165	0,01149

## Anexo 2. Coeficientes de cultivo proporcionados por FAO (2006).

CUADRO 17  
Coeficiente basal del cultivo  $K_{cb}$  para cultivos no estresados y bien manejados en climas sub-húmedos ( $HR_{min} \approx 45\%$ ,  $u_2 \approx 2 \text{ m s}^{-1}$ ) para ser usados con la  $E_c$ , FAO Penman-Monteith  $ET_c$ .

Cultivo	$K_{cb \text{ ini}}^1$	$K_{cb \text{ med}}^1$	$K_{cb \text{ fin}}^1$
<b>a. Hortalizas Pequeñas</b>	<b>0,15</b>	<b>0,95</b>	<b>0,85</b>
Brócoli		0,95	0,85
Col de Bruselas		0,95	0,85
Repollo		0,95	0,85
Zanahoria		0,95	0,85
Coliflor		0,95	0,85
Apio (Céleri)		0,95	0,90
Ajo		0,90	0,60
Lechuga		0,90	0,90
Cebolla - seca		0,95	0,65
- verde		0,90	0,90
- semilla		1,05	0,70
Espinaca		0,90	0,85
Rábano		0,85	0,75
<b>b. Hortalizas – Familia de la Solanáceas</b>	<b>0,15</b>	<b>1,10</b>	<b>0,70</b>
Berenjena		1,00	0,80
Pimiento Dulce (campana)		1,00 <sup>2</sup>	0,80
Tomate		1,10 <sup>2</sup>	0,60-0,80
<b>c. Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas</b>	<b>0,15</b>	<b>0,95</b>	<b>0,70</b>
Melón		0,75	0,50
Pepino – Cosechado Fresco		0,95 <sup>2</sup>	0,70
– Cosechado a Máquina		0,95	0,80
Calabaza de Invierno		0,95	0,70
Calabacín (zucchini)		0,90	0,70
Melón dulce		1,00	0,70
Sandia		0,95	0,70
<b>d. Raíces y Tubérculos</b>	<b>0,15</b>	<b>1,00</b>	<b>0,85</b>
Remolacha, mesa		0,95	0,85
Yuca o Mandioca – año 1		0,70 <sup>3</sup>	0,20
– año 2		1,00	0,45
Chirivía		0,95	0,85
Papa o patata		1,10	0,65 <sup>4</sup>
Camote o Batata		1,10	0,55
Nabos (Rutabaga)		1,00	0,85
Remolacha Azucarera		1,15	0,50 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Estos son valores de  $K_{cb}$  que representan condiciones estándar con una superficie seca del suelo. Estos valores deberán ser utilizados únicamente para la metodología del coeficiente dual  $K_{cb} + K_e$ . Los valores de la altura máxima del cultivo, para el ajuste climático de  $K_{cb}$ , están incluidos en el Cuadro 12.

<sup>2</sup> En algunas oportunidades, los frijoles (judías), guisantes, leguminosas, tomates, pimientos y pepinos se cultivan utilizando empalizadas que alcanzan los 1,5 a 2 metros de altura. En estos casos es necesario incrementar los valores de  $K_{cb}$ . Para frijoles (judías) verdes, pimentones y pepinos se puede asumir un valor de 1,10 y en el caso de los tomates, frijoles (judías) secos y los guisantes, de 1,15. Bajo esas condiciones también debe aumentarse el valor de  $h$ .

<sup>3</sup> Los valores correspondientes a la etapa de mediados de temporada para la mandioca, asumen condiciones de no-estrés durante o después de la temporada lluviosa. Los valores de  $K_{cb \text{ fin}}$  toman en cuenta la dormancia (letargo) durante la estación seca.

<sup>4</sup> El valor de  $K_{cb \text{ ini}}$  para las papas (patatas) es de alrededor 0,35 para papas (patatas) de ciclo largo con rotura de los estolones.

<sup>5</sup> El valor de  $K_{cb \text{ fin}}$  corresponde a condiciones sin riego durante el último mes de la temporada productiva. El valor de  $K_{cb \text{ ini}}$  para al remolacha azucarera será mayor, hasta 0,9, cuando ocurra riego o lluvias significativas durante el último mes.

Anexo 3. Porcentaje de suelo humedecido por varios grados de descarga y espaciamiento para un único lateral en línea recta con emisores uniformemente espaciados depositando 40 mm de agua por cada ciclo sobre el área humedecida. Fuente: Keller y Karmelli, 1973.

Espacio efectivo entre laterales SI	Descarga del emisor														
	Menos de 1,5 l/h			2 l/h			4 l/h			8 l/h			Más de 12 l/h		
	Espaciamiento recomendado entre emisores a lo largo del lateral para texturas Gruesas, Medias y Finas														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1,0	0,6	1,0	1,3	1,0	1,3	1,7	1,3	1,6	2,0
Porcentaje de suelo humedecido															
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,0	<u>33</u>	70	<u>100</u>	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	<u>33</u>	67	<u>100</u>	67	<u>100</u>	100	<u>100</u>	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	<u>100</u>	80	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	100	100
2,0	15	<u>35</u>	55	20	<u>40</u>	60	<u>40</u>	60	80	60	80	100	80	<u>100</u>	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	<u>100</u>
3,0	10	23	<u>37</u>	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	<u>34</u>	23	<u>34</u>	46	<u>34</u>	46	57	46	57	68
4,0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	<u>36</u>	26	<u>36</u>	44	36	44	53
5,0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,0	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	<u>34</u>	27	<u>34</u>	40



Anexo 4. Fragmento aportado para la conformación de material didáctico e informe de proyecto. Recopilación de literatura y elaboración propia.

#### a. Introducción

El riego, en general, consiste en la aplicación de agua de una manera artificial con el fin de suplir las necesidades hídricas de un cultivo. En el caso del riego por goteo, este consiste en la utilización de dispositivos especiales para la aplicación de agua en forma localizada, enfocándose en humedecer la zona del suelo donde se desarrolle la mayor densidad radicular. Es, esto último, la diferencia entre los sistemas de riego por aspersión y los sistemas de riego por goteo que, junto con otros métodos como la microaspersión y la exudación, forma parte de los riegos localizados de alta frecuencia (RLAF).

La característica principal del riego por goteo consiste en que, a diferencia de los demás sistemas que aplican agua en forma de una precipitación artificial mojando toda la zona donde se encuentra el cultivo, el agua es depositada en un único punto. Esto genera un fenómeno particular que se conoce como “bulbo de humedecimiento” y se puede comparar de la siguiente forma:

Si tomamos una toalla o servilleta de papel, inclusive de tela, y humedecemos cuidadosamente una punta, podremos observar que a pesar de que sólo una pequeña parte de la punta está en contacto con el agua, esta se extiende por la toalla por una corta distancia.

Este fenómeno es conocido como **capilaridad** y se trata de uno de los fenómenos más importantes para la existencia de la vida, ya que es por capilaridad que el agua asciende a través de la xilema de los árboles o se extiende desde un canal de riego hasta las raíces del cultivo en la parte más alta de la cama. En el caso del riego por goteo, el agua depositada en ese único punto se extiende tanto a lo ancho como a lo bajo gracias a la capilaridad del agua y a la capacidad de **infiltración** del suelo.

La forma que tendrá el bulbo de humedecimiento debajo del gotero dependerá directamente del tipo de suelo en el que se encuentra, el grado de compactación y la presencia de irregularidades

como rocas, horizontes y franjas de distinto material. En la siguiente figura puede observarse como varía la forma del bulbo para los tres tipos de suelos más generales.

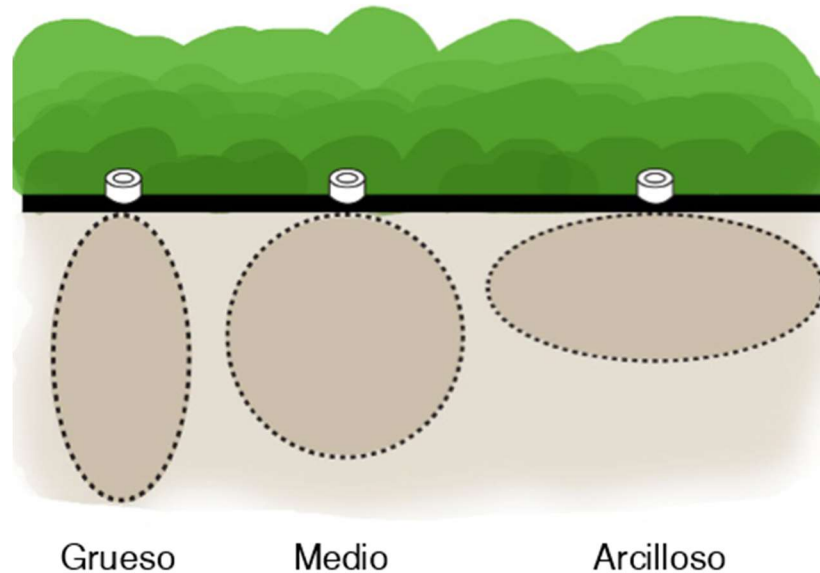


Figura 1. Bulbos de humedecimiento. Fuente: Reddy, 2016

En las texturas gruesas, el agua no es capaz de desplazarse mucho a lo ancho, por lo que el diámetro del bulbo se ve reducido, en contraparte, la conductividad hidráulica de un suelo arenoso es muy alta, por lo que el bulbo profundiza mucho más, tanto así, que puede causar, con mayor facilidad, problemas de pérdidas por percolación excesiva en comparación con otras texturas.

En los suelos de textura media el desplazamiento horizontal es muy parecido al movimiento de infiltración, es por esto por lo que se forman bulbos con formas más redondeadas.

Finalmente, en los suelos arcillosos, la capacidad de infiltración es muy limitada, por lo que es más fácil para el agua desplazarse horizontalmente que verticalmente, produciendo así un bulbo ensanchado y poco profundo.

Es necesario recalcar que a simple vista desde la superficie no se puede estimar la forma del bulbo de humedecimiento. Para esto existen tanto métodos numéricos como prácticos. Entre estos se destaca el uso del cuadro propuesto por Karmelli y Keller (1973) en el libro *Trickle*

*Irrigation Design*, pero siempre se recomienda la realización de pruebas en campo para conocer la forma exacta de los bulbos que se desarrollarán bajo el sistema.

En el caso de la producción en casa sombra donde los espaciamientos entre goteros con cortos (menores a los 60 cm) y las camas se encuentran muy cerca lo que se observa es un bloque húmedo, en algunos casos, más ancho que la misma cama de siembra.

En la siguiente figura se observan bulbos de humedecimiento tintados.



Figura 2. Bulbos de humedecimiento en campo. Fuente: England y Hochmuth, 2016.

## b. Diseño

### pruebas y estudio técnico

Antes de comenzar el diseño de cualquier sistema de riego, ya sea por goteo, aspersión etc.; es necesario llevar a cabo un conjunto de evaluaciones que dictarán la viabilidad del proyecto mismo. Es por esto por lo que es un requerimiento indispensable conocer:

- Topografía del terreno
- Textura del suelo, pH, salinidad, capacidad de infiltración básica, enfermedades
- Disponibilidad y calidad del agua
- Registros de precipitación, horas luz, radiación solar, temperatura, velocidad del viento, humedad, etc.
- Requerimientos del cultivo en nutrición, riego, luz.

Es razonable que en muchos casos no se disponga de toda la información mencionada anteriormente, es por esto por lo que en ocasiones es necesario modificar algunos métodos y utilizar el criterio técnico para resolver el diseño implicando la existencia de una posibilidad de error que crecerá conforme falte más información.

### Consumo del agua por cultivos

Las plantas necesitan del agua a diario para poder realizar sus funciones fisiológicas, además, al igual que los humanos, las plantas también “sudan”. Esto es conocido como el fenómeno de la transpiración y se trata de la pérdida de agua que tienen las plantas al respirar y realizar sus funciones fisiológicas. También el agua alrededor de la planta puede perderse por evaporación, es por esto que el consumo del agua dentro de una plantación debe contemplar tanto la transpiración como la evaporación, conformando así la evapotranspiración.

Para el cálculo de la evapotranspiración la FAO recomienda el método de Penman-Monteith, ya que este es uno de lo más precisos tanto en climas secos como húmedos. En algunas ocasiones será necesario utilizar el método de Thornthwaite u otros debido a que la escasez de datos climáticos impide la utilización del método de Penman-Monteith, sin embargo, estos no son métodos tan precisos como el recomendado. La evapotranspiración debe ser ajustada para cada

cultivo multiplicándola por una constante  $K_c$  y luego multiplicada por un coeficiente de localización  $K_l$ , el cual depende únicamente del área sombreada por el cultivo y se calcula a partir del promedio de las siguientes cinco ecuaciones:

$$KL = 1,34 * A$$

Ecuación 1.  $KL$  según Aljibury et al.

$$KL = 0,1 + A$$

Ecuación 2.  $KL$  según Decroix.

$$KL = 0,5 * (1 + A)$$

Ecuación 3.  $KL$  según Hoare et al.

$$KL = 0,15 * (1 + 5.67A)$$

Ecuación 4.  $KL$  según Keller.

Donde:

$KL$  = Coeficiente de localización

$A$  = Fracción de área sombreada

Generalmente los sistemas de riego se trabajan de manera que se aplica el agua consumida por día, pero si se desea regar por ciclos que se repiten cada cierta cantidad de días, es necesario estimar el tamaño del “depósito” de agua que el suelo es capaz de soportar, para lo cual se utiliza la ecuación:

$$Ln = \frac{CC - PMP}{100} * \rho_{ap} * Prof * Agot * PAR$$

## Ecuación 6

Donde:

$L_n$  = Lámina neta, en mm

$CC$  = Capacidad de campo, en porcentaje

$PMP$  = Punto de marchitez permanente, en porcentaje

$\rho_{ap}$  = Peso específico aparente, en g/cm<sup>3</sup>

$Prof$  = Profundidad de raíces, en cm

$Agot$  = Fracción de agotamiento

$PAR$  = Fracción de área humedecida

La profundidad de raíces depende de cada cultivo y es la profundidad a la que se concentran la mayor cantidad de raíces absorbentes. La fracción de agotamiento representa el estrés que será aplicado a la planta. En hortalizas se utiliza entre un 10 y 30 % de agotamiento. Finalmente, el PAR depende directamente del bulbo de humedecimiento, el mismo del que anteriormente se habló. Para estimar este parámetro se debe conocer la disposición de las camas y de las tuberías de riego por goteo. La manera más simple es utilizando el siguiente cuadro, pero la manera más exacta es a través de pruebas en campo. En el cuadro, primero se entra desde arriba con el caudal del gotero, luego el cuadro nos recomienda el espaciamiento entre goteros según la textura y en el lado izquierdo se selecciona el espaciamiento entre laterales de riego y con esto se tiene el porcentaje de área humedecida. Se recomienda no humedecer menos del 30 % del área, es decir, que el PAR no sea menor a 30.

Cuadro 1. PAR para diversas condiciones del sistema. Fuente: Keller y Karmelli, 1973.

Espacio efectivo entre laterales SI	Descarga del emisor														
	Menos de 1,5 l/h			2 l/h			4 l/h			8 l/h			Más de 12 l/h		
	Espaciamiento recomendado entre emisores a lo largo del lateral para texturas Gruesas, Medias y Finas														
	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
	0,2	0,5	0,9	0,3	0,7	1,0	0,6	1,0	1,3	1,0	1,3	1,7	1,3	1,6	2,0
	Porcentaje de suelo humedecido														
0,8	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1,0	<u>33</u>	70	<u>100</u>	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	100
1,2	25	58	92	<u>33</u>	67	<u>100</u>	67	<u>100</u>	100	<u>100</u>	100	100	100	100	100
1,5	20	47	73	26	53	80	53	80	<u>100</u>	80	<u>100</u>	<u>100</u>	<u>100</u>	100	100
2,0	15	<u>35</u>	55	20	<u>40</u>	60	<u>40</u>	60	80	60	80	100	80	<u>100</u>	100
2,5	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	<u>100</u>
3,0	10	23	<u>37</u>	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	80
3,5	9	20	31	11	23	<u>34</u>	23	<u>34</u>	46	<u>34</u>	46	57	46	57	68
4,0	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	60
4,5	7	16	24	9	18	26	18	26	<u>36</u>	26	<u>36</u>	44	36	44	53
5,0	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	48
6,0	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	<u>34</u>	27	<u>34</u>	40

Conociendo todos los datos se debe calcular la lámina de riego neta y dividirla por la eficiencia de riego, la cual se espera que ronde cerca del 85 al 95 % dando una lámina de riego mayor que contempla las pérdidas de agua por en el sistema y por diferencia de presiones. De igual manera, cuando se desea reponer el agua diariamente, será necesario multiplicar la evapotranspiración diaria por el PAR y luego dividirla por la eficiencia de aplicación. Pizarro (1990) recomienda las siguientes uniformidades según clima, pendiente y tipo de emisores elegidos.

Cuadro 2. Coeficiente de uniformidad. Fuente: Pizarro 1990

Emisores	Pendiente (i)	CU	
		Clima árido	Clima húmedo
Emisores espaciados más de 4 m en cultivos permanentes	Uniforme (i < 2 %)	0,90 - 0,95	0,80 - 0,85
	Uniforme u ondulada (i > 2 %)	0,85 - 0,90	0,75 - 0,80
Emisores espaciados menos de 2,5 m en cultivos permanentes o semi permanentes	Uniforme (i < 2 %)	0,85 - 0,90	0,75 - 0,80
	Uniforme u ondulada (i > 2 %)	0,80 - 0,90	0,70 - 0,80

Esta lámina que contempla la eficiencia se divide por la relación de transpiración (TR) para conocer la cantidad de agua que debe aplicarse. La relación de transpiración describe cuánta del agua aplicada se aprovecha en la planta y cuánta agua se pierde en percolación. Pizarro (1990) recomienda el siguiente cuadro para la selección del TR.

Cuadro 3. Coeficiente de transpiración. Fuente: Pizarro 1990

Profundidad de raíces (m)	Textura			
	Muy porosa (grava)	Arenosa	Media	Fina
< 0,75	0,65	0,75	0,85	0,90
0,75 - 1,50	0,75	0,80	0,90	0,95
> 1,50	0,80	0,90	0,95	1,00

### Selección de goteros

Los goteros deben seleccionarse de manera que operen correctamente según las condiciones del terreno. Por ejemplo, si la pendiente es muy fuerte deben utilizarse goteros autocompensados o si el suelo es muy pesado (arcilloso) no pueden utilizarse goteros de caudales altos que puedan ocasionar pérdidas de agua por escorrentía. Escorrentía es el nombre con el que se llama al agua



que no es absorbida por el suelo y, por el contrario, se mueve sobre el suelo hasta perderse por los drenes. En el cultivo de hortalizas se utilizan franjas húmedas, las cuales consisten en líneas de humedad y no necesitan que las plantas se cultiven obligatoriamente debajo de un gotero debido a que, como se observó anteriormente, existe un diámetro de humedecimiento en el que la planta estará inmersa. Inclusive, es posible colocar una única línea de goteo entre dos líneas de plantas si la textura del suelo lo permite.

Un criterio muy importante para el éxito del sistema de riego por goteo es evitar que existan parches con deficiencias de riego. Esto se debe muchas veces a pérdidas de presión excesivas, para evitar esto deben calcularse previamente las pérdidas. Los métodos más usados para calcularlas son los métodos de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, pero muchos fabricantes especifican cuales son las pérdidas de presión para la tubería según la distancia y el caudal. Así que sólo es necesario saber la distancia del lateral de gotero y la distancia que hay en tubería desde el principio del bloque de riego hasta el último lateral, cabe destacar que el método de diseño hidráulico es más complejo y representa el uso de múltiples ecuaciones no mencionadas aquí, por lo que siempre se recomienda encargar a un experto el diseño del sistema.

Las pérdidas por fricción en el último lateral del bloque no deben ser mayores al 20 % de la presión que debe operar el gotero. Esto generalmente es equivalente a 2 mca o 2,8 psi ya que los goteros suelen operar a 10 mca o 14,2 psi.

#### Trazado y selección de tubería

El sistema debe trazarse de la forma más eficiente posible. Este puede ser enterrado dejando únicamente las conexiones para los laterales o puede dejarse sobre el terreno. El polietileno no presenta problemas por exposición al sol, pero la tubería en PVC debe pintarse para asegurarse que su vida útil sea mayor. La tubería debe seleccionarse de manera que la pérdida de presión no afecte al sistema y que soporte la presión de operación sin romperse. En el riego por goteo, por las bajas presiones a las que se opera, este segundo punto no es un factor de gran peso.

El siguiente nomograma permite estimar las pérdidas de presión por metro de tubería según caudal y diámetro, para ello, se divide el caudal (l/s) entre el diámetro de tubería (mm) y con ese dato se entra en el eje horizontal trazando una línea recta hacia arriba y leyendo el punto en

el eje vertical dónde se toca la curva del diámetro utilizado. Luego este valor de pérdidas por metro se multiplica por la longitud de la tubería y con ello se estima la pérdida total de esa sección.

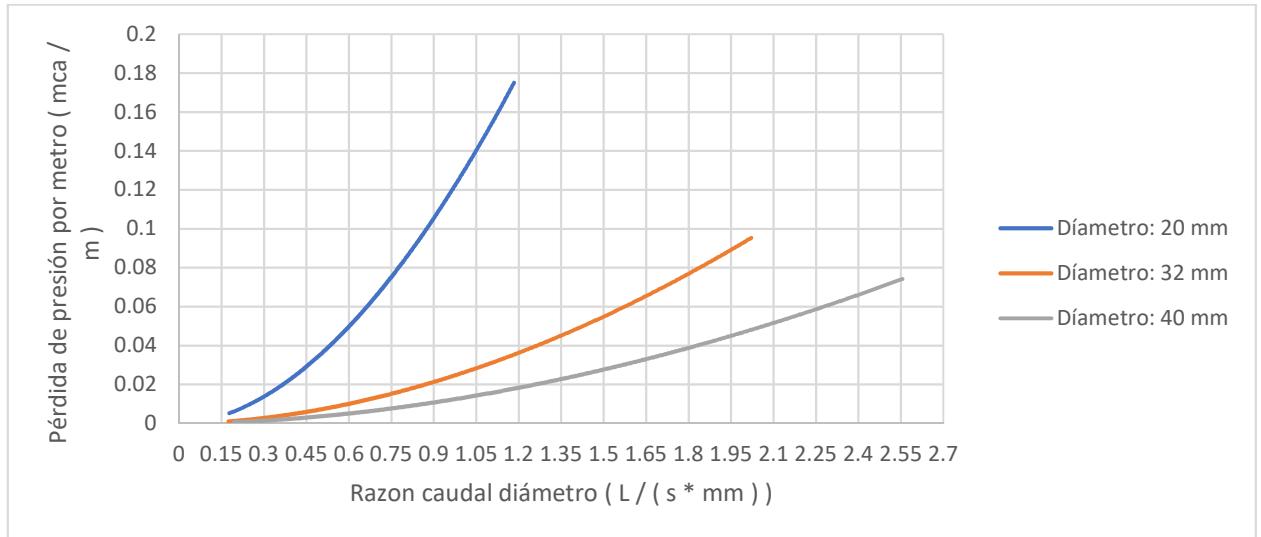


Figura 3. Pérdidas por fricción. Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel 2017.

### Sistema de fertirriego

Generalmente el sistema de fertirriego se observa únicamente como un equipo que se encarga de regar e inyectar los agroquímicos en el sistema. Esta concepción, aunque acertada, carece de un elemento de suma importancia para la “vida” del sistema de riego por goteo: el filtro.

El sistema de filtrado es la sección encargada de eliminar cualquier agente sólido que arrastre el agua y que pueda ocasionar la obstrucción de los emisores del sistema de riego. Es por esto que, sin estos dispositivos, el éxito de un sistema de riego por goteo se ve seriamente amenazado.

Existen diversos tipos de filtros, de los cuales se detallará únicamente los más comunes en instalaciones de riego de tamaño mediano. Primeramente, el filtro de arena. Este filtro consiste en un recipiente sellado que contiene arenas de diferentes diámetros con lo cual posee espacios pequeños para el paso del agua. Esta clase de filtro es un poco costoso y debe ser lavado

constantemente. Para lavarlo sólo es necesario hacer que el agua fluya en dirección contraria a la del flujo normal.

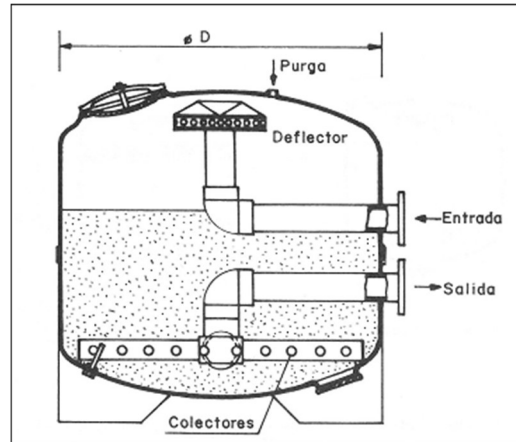


Figura 4. Filtro de arena. Fuente: Barpool, s.f.

Otro tipo de filtros son los filtros de malla o anillos. Estos filtros realizan su función al hacer pasar el agua a través de mallas o anillos con un tamaño de agujero que se selecciona en función de la recomendación del fabricante de los goteros. Estos filtros deben colocarse antes y después del sistema de inyección de fertilizante para evitar que un problema en la mezcla de químicos, como la precipitación de sólidos, no ocasione un daño en el sistema de riego por obstrucciones en los emisores.

La cantidad de filtros necesarios dependerá del caudal del sistema, ya que la capacidad de caudal depende directamente del área filtrante. De igual forma, en casos en que los filtros se ensucian muy rápido (varias veces por día o ciclo de riego) es aceptable añadir filtros en paralelo para repartir la carga de filtrado. Si el agua que ingresa a la bomba lleva muchas partículas, también debe colocarse un filtro o una trampa de sedimento para evitar que el impulsor de la bomba se desgaste prematuramente y represente un gasto en mantenimiento mayor que el esperado en condiciones normales.



Figura 5. Filtro de anillos. Fuente: Insumos de Riego, s.f.

La incorporación de las disoluciones químicas se lleva a cabo a través de un inyector. Existen muchos tipos y modelos de inyectores, pero, al igual que los filtros, se abordará uno de los más económicos y comunes de observar en pequeñas áreas de producción como las casas sombra, el inyector Venturi.

Este inyector opera utilizando como fuente de energía la misma presión y caudal del sistema de riego, es por esto que su operación no requiere de energía eléctrica. Su principio de funcionamiento consiste en colocar un estrechamiento muy pronunciado en la línea de conducción, el cual ocasiona un aumento en la velocidad del fluido y seguido de esto una sección de expansión, pero menos abrupta. De esta forma, debido al aumento de velocidad, en el punto inmediatamente después de la reducción se observa una presión menor a la de la entrada al Venturi. Esta diferencia de presión negativa, o succión, es la que se encarga de inyectar los productos químicos en el sistema de riego. En la siguiente imagen se muestra una de las formas en que se puede instalar un inyector Venturi. Su operación es muy simple. Primeramente, se arranca el sistema de riego con las válvulas Venturi cerradas (azul y blanco) y la válvula principal abierta (amarilla). Se coloca la mezcla en la entrada del Venturi y se abren las válvulas del Venturi (azul y blanco), seguido de esto se debe cerrar poco a poco la válvula principal

(amarilla) hasta tener la succión requerida o no dejar caer excesivamente la presión del sistema. La calibración de un Venturi se lleva a cabo poniéndolo a funcionar con un recipiente graduado y succionando únicamente agua. Se debe cerrar la válvula principal (amarilla) como en cualquier aplicación de fertilizante y medir el volumen que succiona el Venturi en un determinado tiempo. Es decir, se pone a funcionar el Venturi y se mide cuantos litros de agua succiona por minuto. Una vez conocido esto es posible calcular las concentraciones de las disoluciones basándose en que el fertirriego debe durar un 80 % del tiempo que toma el riego normal, debido a que el restante 20 % se necesita para lavar los productos del sistema.

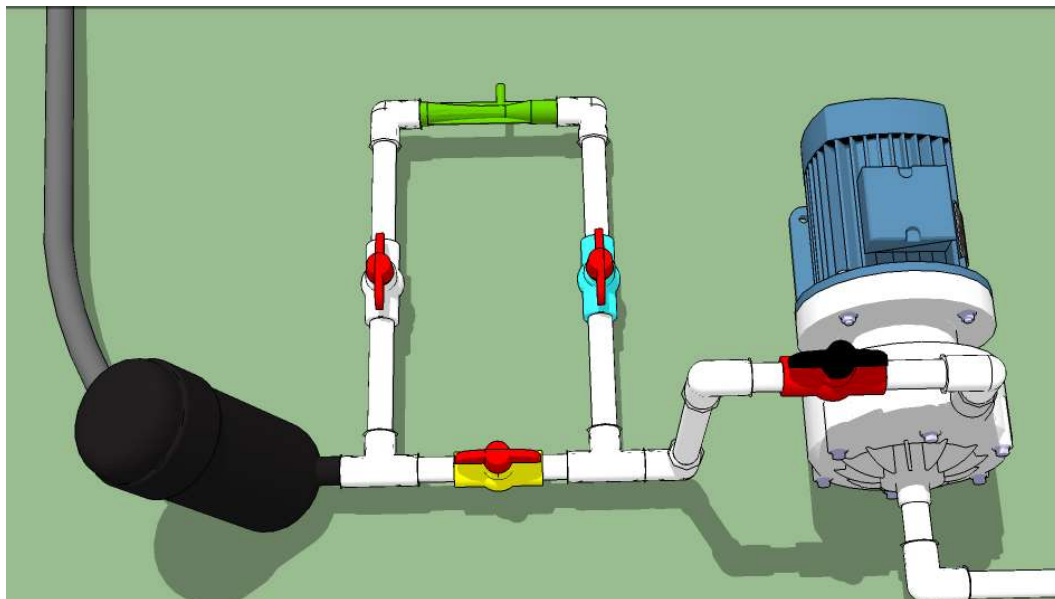


Figura 6. Inyector Venturi. Fuente: Elaboración propia con Sketch Up.

### Sistema de bombeo y almacenamiento

Para adquirir el sistema de bombeo es necesario conocer el punto de operación del sistema. Este punto consiste en la presión más alta y más baja a la que debe operar el sistema junto con el caudal que debe entregar. Normalmente en parcelas pequeñas como la casa sombra las pérdidas de presión son muy bajas, por lo que la bomba debe únicamente entregar la presión que necesitan los goteros. Generalmente esta presión es de 10 mca o 14,2 PSI. El caudal puede calcularse multiplicando la cantidad de goteros por el caudal de cada gotero. Conociendo estos parámetros

se debe buscar la bomba cuya curva de trabajo se ajuste a las condiciones del proyecto. Generalmente se entregan los valores de caudal (GPM) y presión (PSI) al vendedor y este se encarga de buscar en catálogo el equipo que mejor se adapte a ello, pero siempre es necesario verificar que el equipo es el adecuado para el proyecto antes de realizar la compra.

El almacenamiento depende del espacio que se tenga disponible y el presupuesto para el mismo. Un sistema de almacenamiento puede ir desde un tanque hidroneumático de 30 litros hasta un reservorio 8 000 m<sup>3</sup>. Antes de adquirir un sistema de estos debe conocerse la calidad y continuidad del agua disponible en el área de trabajo y conocer la duración de la época seca en la zona, ya que podría ser necesario la construcción de un reservorio para albergar el agua necesaria durante la sequía.

## Compra

### Lista de materiales

En algunas ocasiones la formulación de la lista de materiales se convierte en una dificultad debido a que se deben tomar en cuenta todas las piezas que podrían ser necesarias durante la instalación. Esto se debe a que piezas tan pequeñas pero importante como un codo no puede faltar durante la instalación del proyecto. A continuación, se detallarán algunas recomendaciones de equipo que puede ser necesario o la forma de estimar un porcentaje extra para evitar faltantes.

- La bomba debe ser comprada tomando en cuenta el punto de operación, pero también debe conocerse la corriente que consume (amperes), el voltaje (voltios), la frecuencia de operación (Hertz) y la cantidad de fases. Todo esto porque también es necesario adquirir el cableado y las protecciones necesarias para el equipo. La manera de estimar el diámetro del cable AWG y la capacidad de las protecciones puede ser encontrada en el Código Eléctrico Nacional 2008 de los Estados Unidos (NEC 2008), este código es la base en la que se sustenta el Código Eléctrico de Costa Rica, a excepción de algunas modificaciones que se han publicado en el periódico La Gaceta y que no se detallan en este documento.
- En ocasiones para los tanques es necesario la creación de tarimas, por lo que se debe contemplar la compra de perfiles de acero y madera para la confección de la misma. El tanque necesita de un piso estable y continuo, sino el plástico se deformará por el peso.
- La tubería de PVC sólo puede comprarse en segmentos de 6 metros (3 metros en algunas ferreterías), por lo tanto se recomienda estimar la longitud total de PVC, dividirla por 6 y redondearla al número superior. Después de esto multiplicarla por 1,10 y redondearla de nuevo al superior. Esto es para asegurarse que no haga falta tubería, estimando que pueda haber un 10% de pérdidas por juntas y recortes. Cabe destacar que para distancias pequeñas como 12 metros no es necesario agregar el 10% de material extra.
- Las tuberías de polietileno de gotero integrado y de conducción sólo se venden en rollos de ciertas longitudes, por lo que es necesario estimar cuantas uniones son necesarias y

también cuantos acoples de lateral se necesitan. Se recomienda adquirir una perforadora de tubería para maximizar el uso del tiempo y reducir las pérdidas por malas perforaciones.

- Debe tomarse en cuenta cada codo, Tee, Yee, unión, acople rápido, pegamento, etc. Si es posible, comprar uno o dos más de estos objetos puede evitar problemas durante la instalación.
- Cotizar con diferentes distribuidores los productos.
- Revisar el producto durante la entrega, ya que en ocasiones el equipo no será usado en un lapso grande de tiempo y podría tener desperfectos que a futuro no podrán ser cubiertos por la garantía.



## Instalación, operación y mantenimiento

No existe una forma específica de instalar un sistema de riego. Una metodología ordenada corresponde a primeramente trazar en campo la guía de la tubería principal para identificar posibles obstáculos como calles, pasillos o equipos. Sí es recomendado primero colocar los laterales y después perforar la tubería de salidas múltiples al igual que revisar al menos dos veces la longitud de una pieza que vaya a ser cortada. Para la casa sombra es de gran utilidad formar secciones que permitan riegos y fertilización diferenciada.

Una vez que sea ha finalizado la instalación se debe realizar la primera operación del sistema. Es indispensable que antes de encender la bomba se cierren todas las líneas de goteo y se abra por completo el tapón al final de la línea de conducción. Esto para que sea lavada cualquier basura o rastros de suelo que quedaran dentro de la tubería y que podrían bloquear los goteros. Después de lavar el sistema entonces se procede a abrir todas las líneas de goteros y colocar los tapones de línea para encender el equipo de bombeo. Una vez el sistema alcance la presión de operación se debe proceder a examinar toda la instalación en busca de fugas.

Para los sistemas automatizados es recomendable apuntar en un documento los parámetros del plan de riego o solicitar esta información al encargado de la instalación del equipo automático. Es preferible que esta información quede almacenada en un lugar lejos del campo y condiciones que puedan dañarla, además de solicitar esta información desde el día de la entrega del sistema. Esta información será de gran utilidad en un futuro y también es un respaldo en caso de garantías.

Cada vez que se va a realizar un riego se debe comenzar con las válvulas del sector a regar abiertas y luego ir regulando la presión con la válvula principal. Si se trata de encender el bombeo con las llaves cerradas existe la posibilidad de que la presión estropee el sistema o inclusive se dañe el equipo de bombeo.

Si por alguna razón los fusibles del bombeo se disparan, debe revisarse el cableado eléctrico y no forzar la operación del mismo. Un sobrecalentamiento del cableado es un gran riesgo para el sistema y el personal.

Cada sesión de fertirriego siempre debe ir acompañada por un lavado del sistema. Si esta práctica no se lleva a cabo el sistema de riego estará atascado en muy poco tiempo y será necesario un gran trabajo para repararlo o inclusive comprarlo de nuevo.

## Evaluación del sistema

El coeficiente de uniformidad evalúa la cantidad de agua que ha recibido la parcela en cada una de las partes medidas. La falta de uniformidad hace que unas zonas reciban más agua que otras, por lo que es necesario depositar más agua para alcanzar la lámina mínima en las zonas desfavorecidas (Villalobos, 2001). El método más popular es el propuesto por Christiansen en 1942 para la evaluación de riego por aspersión (como cita Pizarro, 1990) el cual consiste en la medición del volumen depositado por los emisores de la instalación y estimándose como se observa en la Ecuación 1. Merriam y Keller (1973) recomiendan la medición de 16 emisores, es decir, 4 laterales con 4 puntos cada uno, siendo estos los localizados al principio, al final, a 1/3 y a 2/3 del total de distancia tanto en la múltiple como en el lateral.

$$CU = \frac{q_{25}}{q_a}$$

Ecuación 1

Donde:

$CU$  = Coeficiente de uniformidad

$q_{25}$  = Caudal medio de los emisores que constituyen el 25 % de más bajo caudal (para 16 mediciones, los cuatro más bajos), en mililitros

$q_a$  = Caudal medio de todos los emisores medidos, en mililitros

Esta ecuación únicamente contempla los factores hidráulicos que afectan el gotero, es decir, variaciones de presión. Pizarro (1990) recomienda que se compare el resultado del coeficiente de uniformidad medido contra el coeficiente de uniformidad de diseño, el cual se calcula con la Ecuación 2 o que generalmente se asume como un 90 %, esta ecuación es aprobada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (NRCS) y la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE).

$$CU = 100 \left( 1 - 1,27 * \frac{CV}{\sqrt{e}} \right) * \left( \frac{Q_{mi}}{Q_m} \right) \dots$$

Ecuación 2

Donde:

$CU$  = Coeficiente de uniformidad en porcentaje

$CV$  = Coeficiente de variación de los goteros

$e$  = Número de goteros de los que recibe agua cada planta

$Q_{mi}$  = Caudal mínimo del gotero que corresponde a la presión mínima, en ml

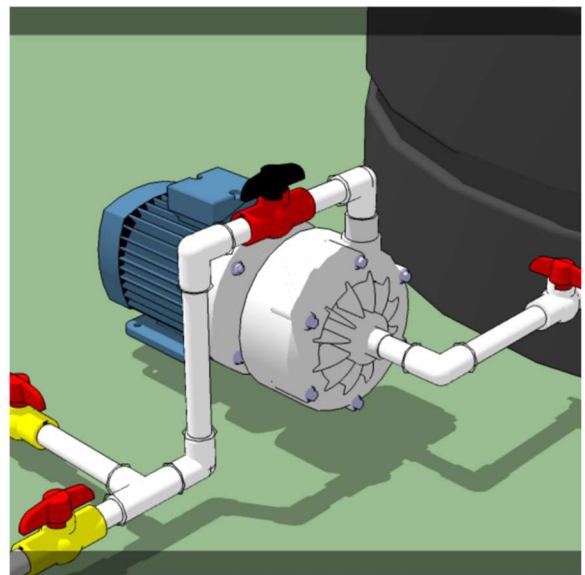
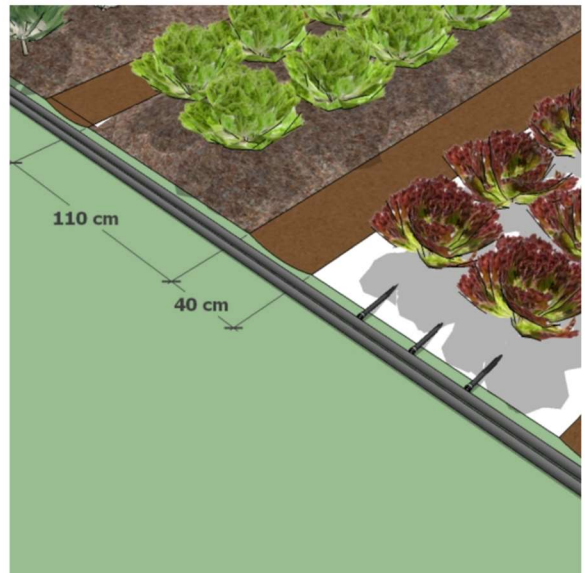
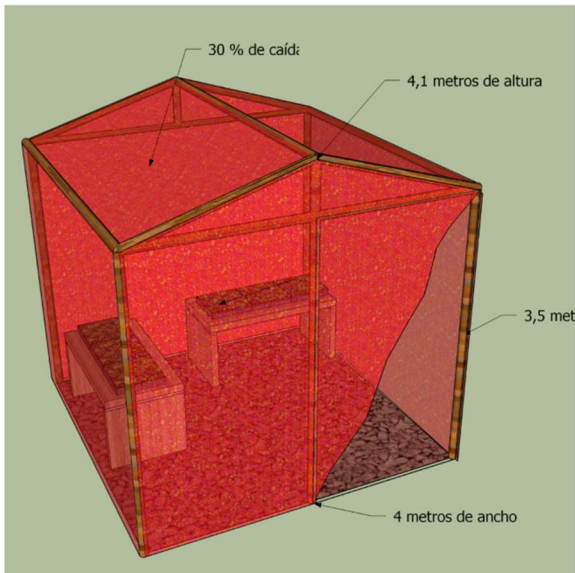
$Q_m$  = Caudal medio de todos lo goteros considerados, en ml

En resumen, una evaluación de riego por goteo se realiza de la siguiente manera:

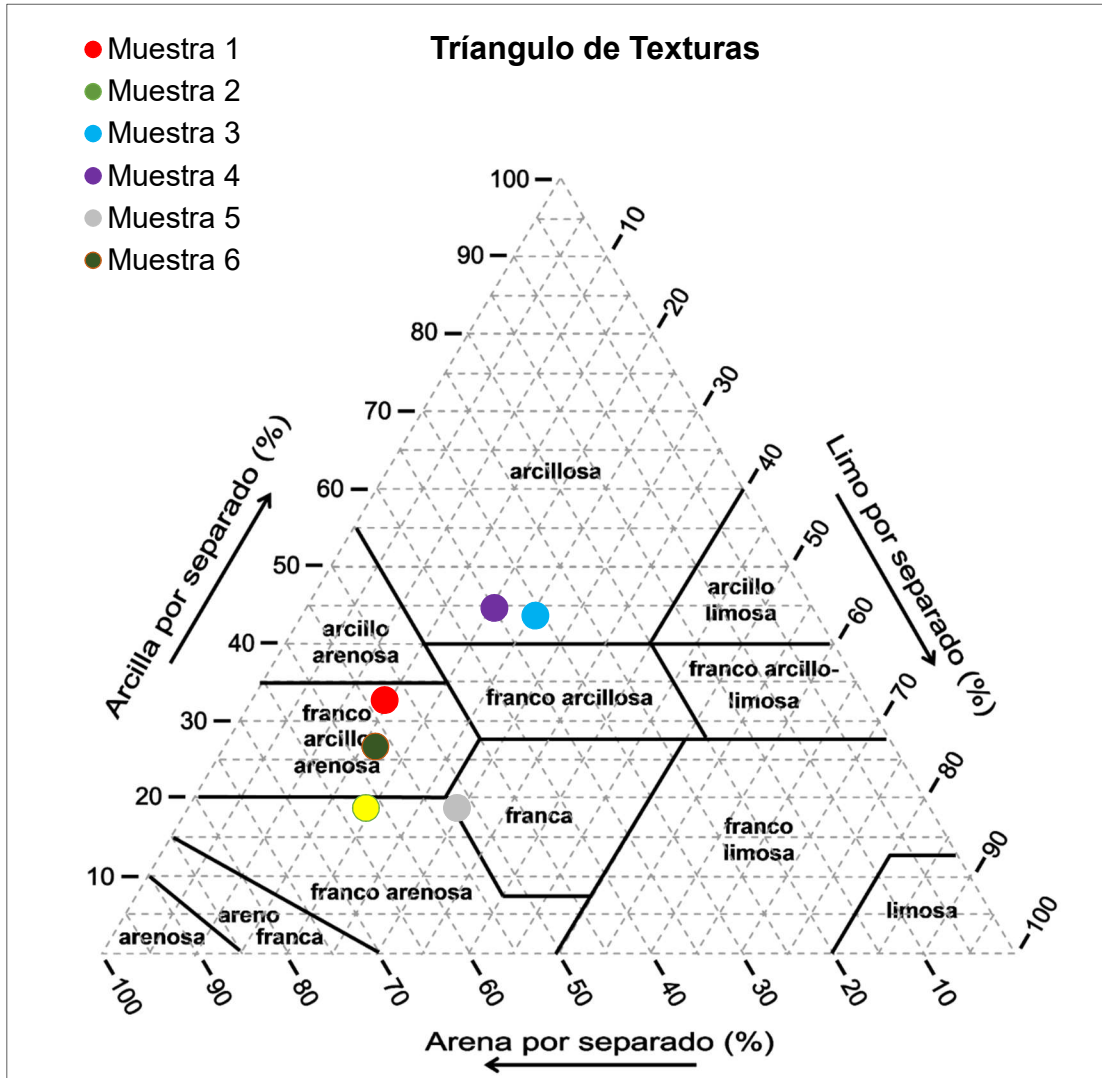
1. Adquisición de datos del fabricante, tiempos de riego utilizados y láminas a depositar
2. Encendido del sistema y medición de presiones en puntos críticos como salida de la bomba, entrada y salida de filtros, entrada y salida de sistemas de inyección, primer y último lateral de riego.
3. Toma de presiones, si es posible, en el lateral 1, 1/3, 2/3 y 4 así como las mismas posiciones en 4 goteros por cada uno de los laterales anteriormente mencionados.
4. Colocación de recipientes en los goteros a evaluar. Estos son los goteros en las posiciones 1, 1/3, 2/3 y 4. Es decir, el primer gotero, el gotero a 1/3 de la longitud total del lateral, el gotero a 2/3 de la longitud total del lateral y el último gotero. Estos para los cuatro laterales del bloque que se está evaluando. Estos cuatro laterales también cumplen con el criterio de 1, 1/3, 2/3 y 4 en las posiciones a lo largo de la línea de conducción principal.
5. Operación del riego ya sea por el tiempo de riego normal o por un tiempo extendido que permita depositar en los recipientes una lámina considerable.
6. Cierre del sistema y medición de los volúmenes depositados para el posterior manejo y análisis de los resultados de vuelta en el escritorio de trabajo.

7. Entrega de informe con resultados importantes como coeficiente de uniformidad, presencia de goteros obstruidos, fugas y cualquier desperfecto del sistema que pueda afectar su funcionamiento correcto y eficiente.
8. Con los datos de la evaluación debe recalcularse el tiempo de riego necesario para depositar la lámina calculada al principio del diseño agronómico.

Anexo 5. Muestra de imágenes generadas con el software SketchUp. Fuente: elaboración propia.



Anexo 6. Triángulo de texturas y muestras en campo. Fuente: USDA y elaboración propia.



Anexo 7. Resumen de análisis de textura para las muestras tomadas en campo.

<i>Localidad</i>	<i>Arcilla (%)</i>	<i>Arena (%)</i>	<i>Limo (%)</i>	<i>Textura del suelo</i>
<i>Liberia</i>	32.3	52.6	15.1	Franco arcillo arenoso
<i>Curubandé</i>	18.5	62.2	19.3	Franco arenoso
<i>Upala</i>	43.1	30.7	26.2	Arcilloso
<i>Liberia</i>	43.5	34.7	21.8	Arcilloso
<i>Bagaces</i>	17.9	51.8	30.3	Franco
<i>Bagaces</i>	25.5	56.7	17.8	Franco arcillo arenoso

Anexo 8. Resumen de características de las cintas de riego seleccionadas.

<i>Localización</i>	<i>Se (cm)</i>	<i>Sl (m)</i>	<i>Caudal (L/h)</i>
<i>Llano bonito casa sombra</i>	20	0,4	1,6
<i>Jilgueros bancal</i>	30	0,2	1
<i>Jilgueros macro túnel</i>	30	0,4	1
<i>Jilgueros casa sombra</i>	20	0,9	1,6



Anexo 9. Datos de estaciones meteorológicas proporcionados por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica.

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INFORMACION  
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS  
(estaciones automáticas)

ESTACION : 72 157 FINCA LA CEIBA Latitud: 10 ° 06 ' N Longitud: 85 ° 19 ' O Altitud. 58 m.s.n.m

Elementos	Periodos	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1999	8	4.8	5.9	33.1	205.0	236.9	172.5	238.4	350.2	344.1	117.8	16.4	143.8	1726.0
TEM.MAX.	1999	33.9	35.3	36.4	36.8	34.7	33.2	33.1	33.1	32.4	31.5	31.8	32.8	33.8	
TEM.MIN.	1999	22.5	22.7	23.4	24.2	24.1	23.6	23.4	23.3	23.1	23.1	22.9	22.6	23.2	
TEM.MED.	1999	28.2	29.0	29.9	30.5	29.4	28.4	28.3	28.2	27.7	27.3	27.3	27.7	28.5	
HUMEDAD	1999	63.4	58.4	57.7	61.8	75.5	82.1	80.3	82.9	86.5	87.2	80.5	72.0	74.0	
VIENTO VEL.	1999	5.3	5.1	4.5	4.2	3.0	2.6	2.8	2.6	2.1	2.1	3.3	4.3	3.5	
RADIACION	1999	17.2	19.4	21.0	19.0	14.6	14.8	13.4	16.0	15.3	14.2	14.0	15.0	16.2	
PRESION	2012	1004.2	1003.8	1004.1	1003.3	1004.2	1004.0	1004.4	1004.2	1004.3	1004.2	1004.0	1003.9	1004.1	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE	2	1	1	1	2	2	5	18	9	1	6	9	2	6	Total
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.	2	2	2	2	5	18	22	19	21	25	14	4	158		

Lluvia en milímetros: lmm = 1 litro de agua por m<sup>2</sup>. Radiación Solar global en Megajulios (MJ/m<sup>2</sup>)  
Temperatura en Grados Celsius (°C). Evaporación en mm. Viento en km/h. Humedad Relativa en Porcentaje (%).  
VIENTO DIR PREDOM : 1 Norte, 2 Noreste, 3 Este, 4 Sureste, 5 Sur, 6 Suroeste, 7 Oeste, 8 Noreste, 9 Variable  
Brillo Solar en horas y décimas de horas. Presión hPa.

**INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMACION**  
**PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS**  
 (estaciones automáticas)

**ESTACION : 98 75 LAS BRISAS, SABALITO**      **Latitud: 08 ° 52 ' N Longitud: 82 ° 53 ' O**      **Altitud. 1040 m.s.n.m**

Elementos	Periodos	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
		1997	2016	1997	2016	1997	2016	1997	2016	1997	2016	1997	2016	1997	2016
LLUVIA		32.7	49.5	68.9	167.5	365.3	273.6	202.7	267.9	380.7	439.1	374.3	98.7	<b>226.7</b>	<b>2720.8</b>
TEM.MAX.		27.1	28.0	28.1	27.7	26.8	26.4	26.3	26.5	26.4	25.9	25.7	26.1	<b>26.8</b>	
TEM.MIN.		16.3	16.6	17.1	17.4	17.7	17.5	17.4	17.3	17.1	17.2	17.3	16.8	<b>17.1</b>	
TEM.MED.		21.7	22.3	22.6	22.6	22.2	22.0	21.9	21.9	21.7	21.5	21.5	21.4	<b>21.9</b>	
HUMEDAD		81.0	76.0	75.7	82.8	88.7	89.5	89.4	89.5	89.8	91.5	91.6	88.0	<b>86.1</b>	
VIENTO VEL.		6.5	7.5	7.7	6.8	6.0	6.0	5.9	6.0	5.8	5.6	5.2	5.4	<b>6.2</b>	
RADIACION		15.6	17.0	17.6	15.0	11.7	11.0	11.9	11.7	12.6	11.7	11.0	11.9	<b>13.2</b>	
PRESION														<b>895.7</b>	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE														Total	
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.														249	
1	1	2	2	5	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	9	12	18	27	24	24	24	24	25	28	29	27	17	17	17

Lluvia en milímetros: lmm = 1 litro de agua por m<sup>2</sup>. Radiación Solar global en Megajulios (MJ/m<sup>2</sup>)  
 Temperatura en Grados Celsius (°C). Evaporación en mm. Viento en km/h. Humedad Relativa en Porcentaje (%).  
 VIENTO DIR PREDOM : 1 Norte, 2 Noreste , 3 Este, 4 Sureste, 5 Sur, 6 Suroeste, 7 Oeste, 8 Noreste, 9 Variable  
 Brillo Solar en horas y décimas de horas. Presión hPa.

**INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMACION**  
**PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS**  
 (estaciones mecánicas)

**ESTACION : 72 101 NICOYA EXTENSION AGRICOLA      Latitude: 10 ° 08 ' N    Longitud: 85 ° 27 ' O    Altitud. 120 m.s.n.m**

Elementos	Periodos												Total		
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.		Prom.	
LLUVIA	2013	3.9	7.2	22.0	65.7	263.4	308.8	245.3	312.8	386.7	398.7	120.1	20.1	<b>179.6</b>	<b>2154.7</b>
TEM.MAX.	1938	32.6	33.8	35.3	35.5	33.7	32.3	32.1	32.5	32.2	31.5	31.4	31.9	<b>32.9</b>	
TEM.MIN.	1938	20.3	21.1	21.7	22.1	22.0	21.7	21.9	21.5	21.6	21.4	20.8	20.1	<b>21.4</b>	
TEM.MED.	1938	26.5	27.5	28.5	28.8	27.9	27.0	27.0	27.0	26.9	26.4	26.1	26.0	<b>27.1</b>	
HUMEDAD	1970	67.9	63.3	61.9	64.6	78.4	84.7	80.8	82.4	86.5	86.5	81.3	73.5	<b>76.0</b>	
VIENTO VEL.	1970	10.0	11.0	9.3	8.1	4.7	3.6	4.7	4.1	3.2	3.2	4.9	7.5	<b>6.2</b>	
BRILLO SOLAR	1970	8.7	9.1	8.4	7.9	6.0	4.8	5.8	5.8	4.7	4.9	6.0	7.9	<b>6.7</b>	
RADIACION	1970	19.0	20.4	20.9	20.7	18.1	17.1	17.8	18.1	16.4	16.1	16.5	17.2	<b>18.2</b>	
EVAPORACION TANQUE	1971	6.6	8.0	8.3	7.7	5.0	3.9	4.4	4.3	3.8	3.5	4.0	5.2	<b>5.4</b>	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Promedio dias con lluvia >= 0.1 mm.	1	1	2	2	5	15	18	15	17	21	20	9	2	125.1	Total.

Lluvia en milímetros: 1mm = 1 litro de agua por m<sup>2</sup>. Radiación Solar global en Megajulios(MJ/m<sup>2</sup>)  
 Temperatura en Grados Celsius (°C). Evaporación en mm. Viento en km/h. Humedad Relativa en Porcentaje (%).  
 VIENTO DIR PREDOM : 1 Norte, 2 Noreste , 3 Este, 4 Sureste, 5 Sur, 6 Suroeste, 7 Oeste, 8 Noroeste, 9 Variable  
 Brillo Solar en horas y décimas de horas.