



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE RIEGO EN

Vanilla planifolia G. Jackson

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

ANITA QUIAHUA SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. DELFINO REYES LÓPEZ

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Noviembre 2020



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE RIEGO EN

Vanilla planifolia G. Jackson

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

PRESENTA

ANITA QUIAHUA SÀNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. DELFINO REYES LÓPEZ

CODIRECTOR

DR. FERMÍN PASCUAL RAMÍREZ

ASESORES

M.C. FABIEL VÁZQUEZ CRUZ

DR. LUIS ANTONIO DOMÍNGUEZ PERALES

San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Noviembre 2020

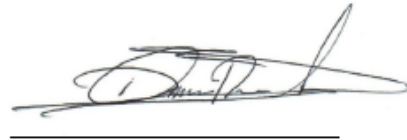
La presente tesis titulada: **DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE RIEGO EN *Vanilla planifolia* G. Jackson** realizada por **Anita Quiahua Sánchez**. Ha sido revisada y aprobada por el siguiente consejo particular, para obtener el título de:

LICENCIADA EN INGENIERÍA AGROHIDRÁULICA

Facultad de Ingeniería Agrohidráulica

Consejo particular integrado por:

Director interno: Dr. Delfino Reyes López



Codirector: Dr. Fermín Pascual Ramírez



Asesor: DR. Luis Antonio Domínguez Perales



Asesor: M.C. Fabiel Vázquez Cruz



San Juan Acateno, Teziutlán, Puebla, México. Noviembre 2020

La tesis: **DISEÑO Y ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE RIEGO EN *Vanilla planifolia*** G. Jackson, forma parte de grupo de investigación: **Agrobiotecnología y Recursos Naturales** y de la línea de investigación: **Biología, Conservación y Protección Vegetal**. Contó con financiamiento por parte del Proyecto **PDCPN-2015-640 “Bases para mejorar el aprovechamiento sustentable del agua de uso agrícola en México”** de la convocatoria para ‘Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales 2015’ de los Fondos Institucionales CONACYT.

DEDICATORIA

¡Ya estamos aquí! lo logre y nada me hace más feliz que saber que ustedes lograron verlo, esta tesis está dedicada a ustedes, mi adorada familia, los amo infinitamente y les agradezco por mantenerse a mi lado siempre, apoyándome, dándome palabras de aliento, enseñándome a no rendirme y demostrarme que aun contra las adversidades que llegaron a presentarse, se podía seguir adelante.

Angel Vázquez gracias por apoyarme en todas mis decisiones, por nunca desanimarme en esto y por darme tu paciencia.

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Delfino Reyes López por su confianza, amistad, enseñanzas, consejos y por la oportunidad que me brindo para trabajar bajo su dirección y realizar la presente investigación en el cultivo de *Vanilla planifolia* G. Jackson.

Al Doctor Fermín Pascual Ramírez por ser un gran investigador, por la confianza, apoyo, consejos, enseñanzas y dedicación de tiempo para la elaboración e investigación de la presente tesis.

Al Maestro en Ciencias Fabiel Vázquez Cruz por ser un gran maestro, amigo y la confianza para realizar mi investigación.

A Don Angel por compartirnos conocimientos, anécdotas y experiencias.

A los maestros de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica por haber sido un hogar durante todo este tiempo.

A mis amigos Abigail, Citlaly, José, Joel, Lorena, Mariela, Roberto gracias por hacer tan disfrutable mi estadía en Teziutlán y mi carrera de licenciatura, ustedes fueron mis compañeros, amigos y un hogar.

Al gran equipo de la vainilla conformado por el Sr. Ángel Reyes propietario del terreno, Omar Gonzales Lara, Nahúm Méndez Olmos, Alfredo Pérez Rojas.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	PÁGINA
ÍNDICE DE CUADROS	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general	3
2.2 Objetivos específicos	3
III. HIPÓTESIS	4
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
4.1 Generalidades de la vainilla.....	5
4.2 Clasificación botánica.....	5
4.3 Organografía de la vainilla	6
4.4 Sistema radicular	7
4.5 Etapas de crecimiento del cultivo de vainilla	7
4.6 Coeficiente de desarrollo Kc	8

4.7 Riego por microaspersión.....	9
4.8 Riego por goteo	9
4.9 Riego por goteo tipo cola de cochino	9
4.10 Hidrogeles de poliacrilamida.....	9
 V. MATERIALES Y MÉTODOS.....	 11
5.1 Localización.....	11
5.2 Material biológico utilizado.....	11
5.3 Establecimiento del sistema de riego.....	12
5.3.1 Sistema de riego por microaspersión.....	12
5.3.2 Sistema de riego por goteo	12
5.3.3 Sistema de riego tipo cola de cochino	12
5.3.4 Tubería de conducción	12
5.4 Programación del riego.....	12
5.4.1 Demanda hídrica.....	12
5.4.2 Evapotranspiración potencial o de referencia (Eto)	13
5.4.3 Lámina de agua a una profundidad radicular efectiva.....	13
5.4.4 Tiempo de riego.....	14
5.4.5 Intervalo de riego en días.....	14
5.5 Aplicación de hidrogel.....	14
5.6 Instalación de sensores	15
5.7 Tratamientos evaluados	15
5.8 Variables evaluadas	15
5.8.1 Longitud de rebrotes	15
5.8.2 Longitud de raíz.....	17
5.8.3 Área foliar.....	17
5.8.4 Peso fresco, peso seco y contenido de agua	18

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
6.1 Longitud de rebrotes.....	20
6.2 Número de rebrotes	22
6.3 Grosor de tallo de los rebrotes.....	23
6.4 Área de distribución de raíz.....	24
6.5 Número de hojas por metro lineal	26
6.6 Área foliar.....	27
6.7 Peso fresco, peso seco y contenido de agua	29
6.8 Etapa II	31
6.8.1 Longitud de rebrotes.....	31
6.8.2 Número de rebrotes	32
6.8.3 Grosor de rebrotes	33
6.8.4 Área de distribución de raíces	34
6.8.5 Número de hojas por metro lineal	35
6.8.6 Área foliar.....	36
6.8.7 Peso fresco, peso seco y contenido de agua	37
6.9 Análisis del sistema de riego en la etapa 1	39
6.10 Análisis del sistema de riego en la etapa 2	42
VII. CONCLUSIONES	47
VIII. BIBLIOGRAFÍA	48

ÍNDICE DE CUADROS

Contenido	Página
Cuadro 1. Clasificación botánica de la vainilla.....	6
Cuadro 2. Arreglo de tratamientos por unidad experimental	15
Cuadro 3. Prueba de medias de las variables de desarrollo	28
Cuadro 4. Peso fresco, peso seco y contenido de agua	30
Cuadro 5. Prueba de medias de las variables de desarrollo vegetativo.....	37
Cuadro 6. Peso fresco, peso seco y contenido de agua	38
Cuadro 7. Prueba de medias de los componentes de la materia seca	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Ubicación del sitio experimental.	11
Figura 2. A) Rebrote de 30 DDS; B) Rebrote a 200 DDS.....	16
Figura 3. Raíces a los 200 DDS.	17
Figura 4. A) hojas para escanear; B) márgenes de hoja para escanear.	18
Figura 5. A) Obtención de la muestra. B) Obtención del peso fresco (PF).C) Obtención de datos de la muestra) Obtención del peso seco (PS).	19
Figura 6. Longitud de rebrotes: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	21
Figura 7. Número de rebrotes por tratamiento 200 DDS: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4 =goteo con hidrogel.	22
Figura 8. Longitud de rebrotes.....	23
Figura 9. Grosor de tallo: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión.T4 =goteo con hidrogel.	24
Figura 10. Área de distribución de raíz: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3= microaspersión. T4 =goteo con hidrogel.	25
Figura 11. Distribución de raíces: A) T1=goteo lineal. B) T2= cola de cochino. C) T3=microaspersión. D) T4=goteo con hidrogel.....	25
Figura 12. Profundidad de raíces.....	26
Figura 13. Número de hoja por metro cuadrado. T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3= microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	27
Figura 14. Área foliar: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	28
Figura 15. Longitud de rebrotes: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	31
Figura 16. Longitud de rebrotes: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	32
Figura 17. Número de brotes: T1=goteo lineal. T2= cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	33

Figura18. Grosor de tallo: T1=goteo lineal. T2= cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	34
Figura 19. Área de distribución de raíces cm²: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	34
Figura 20. Distribución de raíces: A) T1=goteo lineal. B) T2=cola de cochino C) T3=microaspersión) D) T4= goteo con hidrogel.	35
Figura 21. Número de hojas por metro lineal: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.	36
Figura 22. Área foliar cm²: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión.T4=goteo con hidrogel.	37
Figura 23. Monitoreo de la humedad.....	40
Figura 24. Comportamiento de los sensores de humedad en el periodo 162-200 DDS. ..	41
Figura 25. Comportamiento de la humedad en la etapa 2.....	43
Figura 26. Segundo periodo de análisis de la etapa 2.....	44
Figura 27. Tercer periodo de análisis en etapa 2.....	45
Figura 28. Periodo de riego en etapa 2.....	46

RESUMEN

Con el objetivo de conocer el mejor sistema de riego para el cultivo de vainilla, se diseñaron y establecieron los sistemas de riego por goteo lineal (T1), cola de cochino (T2), microaspersión (T3), y goteo lineal con hidrogel (T4), considerando la etapa I 0 a 200 DDS (días después de siembra) y II 200 a 600 DDS de desarrollo vegetativo en *V. planifolia*. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. El experimento se llevó a cabo en el municipio de Tenampulco, ubicado en la Sierra Nororiental del estado de Puebla, México. Se registraron variables de desarrollo vegetativo como longitud de rebrotes, grosor de rebrotes, número de rebrotes, área foliar, número de hojas por metro lineal, área de distribución de raíces, así como el peso fresco, peso seco, contenido de agua tanto en la planta completa como en hoja, tallo y raíz. Considerando los datos de desarrollo vegetativo y la distribución del peso seco tanto en planta completa como en hoja, tallo y raíz se infiere que el mejor sistema de riego es el de cola de cochino (T2), ya que permitió mejor desarrollo vegetativo y mayor acumulación de peso seco, además se adaptó al comportamiento de desarrollo radical de las plantas, (T2) presentó mayor demanda hídrica y para eficientar el uso y manejo del agua de riego en vainilla debe considerarse la lámina de riego que es variable de acuerdo a las etapas fenológicas y condiciones climáticas de la zona.

Palabras clave: Sistemas de riego, *Vanilla planifolia*, distribución de raíces, lamina de riego, materia seca

ABSTRACT

In order to know the best irrigation system for vanilla cultivation, linear drip irrigation systems (T1), pig tail (T2), micros pray (T3), and linear dripping with hydrogel (T4), considering stages I 0 to 200 DDS and II 200 to 600 DDS of vegetative development in *V. planifolia*. Treatments were distributed in a randomized complete block experimental design with three replications. The experiment was carried out in the municipality of Tenampulco, located in the northeastern highlands of the state of Puebla, Mexico. Vegetative development variables were recorded such as sprout length, sprout thickness, number of sprouts, foliar area, number of leaves per linear meter, root distribution area, as well as fresh weight, dry weight, water content both in the complete plant as leaf, stem and root. Considering the vegetative development data and the dry weight distribution both in the complete plant and in the leaf, stem and root, it is inferred that the best irrigation system is the pig tail (T2), since better vegetative development and greater accumulation will come. dry weight, it also adapted to the radical development behavior of the plants (T2), presented greater water demand and to make the use and management of irrigation water more efficient, in vain should consider the irrigation sheet that is variable according to the phenological stages and climatic conditions of the area.

Keywords: Irrigation systems, *Vanilla planifolia*, root distribution, irrigation sheet, dry matter

I. INTRODUCCIÓN

Vanilla planifolia G. Jackson es una orquídea trepadora, originaria de las selvas tropicales de México (desde el norte de la faja volcánica hasta el sureste del país) y América Central. Se desarrolla en selvas altas perennifolias y medianas subperennifolias contiguas a sabanas inundables, generalmente sobre terrenos cársticos muy accidentados (Soto, *et al.* 2009). Está compuesto por 110 especies distribuidas en las zonas tropicales de México y el mundo (Bory *et al.*, 2008). Dentro de este género, *Vanilla planifolia*, *Vanilla pompona* y *Vanilla tahitensis* son las especies más importantes en el mundo, por ser productoras de vainillina natural (Bory, *et al.*, 2008).

La vainillina es considerada la sustancia aromatizante y saborizante más importante, con mayor valor económico en el mercado (Divakaran, *et al.* 2006). A pesar de su importancia, muchas de las especies del género no se consideran domesticadas, las especies cultivadas son similares a sus parientes silvestres donde solo existe una selección empírica por parte de los productores. En el cultivo de vainilla, su diversidad genética es limitada en las plantaciones comerciales, debido a la extensa propagación vegetativa del germoplasma (Besse, *et al.* 2004). Se han realizado muy pocos esfuerzos y estudios en sus poblaciones silvestres para conocer componentes de su historia de vida, así como también ha habido poco fomento a favor de su conservación para un manejo ulterior, siendo esta especie de gran importancia económica a nivel mundial, por lo que se encuentra en la NOM-059-SEMARNAT-2010 bajo protección especial (Viramontes, S. 2014).

El agua es el elemento fundamental para el desarrollo de la actividad agrícola, la agricultura consume más del 70 por ciento del agua disponible a nivel mundial (WWAP, 2014). En México se utiliza 77%, con 6.3 millones de agua bajo riego con eficiencias globales menores al 50% (Sánchez, *et al.* 2006). El riego es la mejor opción para la producción de alimentos (Geerts y Raes, 2009). A pesar de su enorme importancia, la mala distribución y la contaminación hacen que este recurso sea cada día más escaso y costoso (Castro, *tal.* 2008). La mayoría de los trabajos referentes a la estimación de las necesidades hídricas de la vainilla han sido generados de manera empírica por los propios productores. Este desconocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos no tradicionales, como la *Vanilla*, es una de las principales preocupaciones y limitantes para quienes se dedican a su producción (Kelso, *et al.* 2012). Algunos referentes como Bouriquet

(1954), Curti (1995) y Damirón (2004), reconocen la importancia de contar con un sistema de riego en el establecimiento del cultivo en cualquier época del año, para evitar el estrés hídrico en las plantas, ya que su impacto causa pérdidas económicas (Pereira, 2007). Sin embargo, Sánchez (1997) es más específico, recomendando aplicar una lámina de riego de 45.97 mm, distribuidos en 2 riegos de 4 horas mediante aspersión a 4 m de altura, el primero en la mañana y el segundo en la tarde durante la temporada de sequía. Mientras que Castro-Bobadilla (2008), aplicó riegos localizados a las 18:00 h con intervalos diarios durante la temporada seca (mayo-junio) en cuatro tratamientos que van de 0 hasta 1.0 L m⁻², donde reconoce que la combinación de humedad de suelo y el manejo de los vainillales parece tener una fuerte influencia sobre la retención de frutos y mejora la condición del cultivo.

La programación del riego en los cultivos normalmente se ejecuta sin soporte técnico y se requiere una mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada (Catalán *et al.*, 2007).

En la actualidad no hay trabajos sobre el diseño de un sistema de riego en *Vanilla* considerando los coeficientes de cultivo (Kc) por etapas de desarrollo vegetativo es por eso que el propósito de la presente investigación es diseñar y establecer un sistema de riego en el cultivo de *Vanilla planifolia* considerando sus necesidades hídricas de la etapa 1 y 2 de desarrollo vegetativo.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar y establecer un sistema de riego en el cultivo de *Vainilla planifolia* G. Jackson considerando sus necesidades hídricas de las etapas uno y dos de su desarrollo vegetativo.

2.2 Objetivos específicos

- Calcular la lámina y frecuencia de riego considerando el Kc de las etapas 1 y 2 del desarrollo vegetativo del cultivo de *Vainilla planifolia*.
- Diseñar y establecer los sistemas de riego por goteo, micro aspersion y riego tipo cola de cochino para el cultivo de *Vainilla planifolia*.
- Evaluar la retención de humedad de hidrogel en un sistema de riego por goteo para eficientizar el uso del agua
- Evaluar el desarrollo vegetativo y de raíces en plantas de vainilla con riego por goteo, micro aspersion y riego tipo cola de cochino.

III. HIPÓTESIS

El mejor sistema de riego para el cultivo de *Vainilla* considerando el Kc en sus etapas 1 y 2 de desarrollo vegetativo y la fisiología de la planta es el riego por goteo tipo cola de cochino.

IV. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Generalidades de la vainilla

La *Vainilla* es un género perteneciente a la familia Orchidaceae; se originó en América tropical hace 70 millones de años (Ramírez, *et al.*, y Pierce, 2007; Bouétard *et al.*, 2010); está compuesto por 110 especies distribuidas en las zonas tropicales de México y el mundo (Bory *et al.*, 2008). Dentro de este género, *Vanilla planifolia*, *Vanilla pomponay* *Vanilla tahitensis* son las especies más importantes en el mundo, por ser productoras de vainillina natural (Bory *et al.*, 2008).

La *Vainillina* es considerada la sustancia aromatizante y saborizante más importante, con mayor valor económico en el mercado (Divakaran, *et al.*, 2006). A pesar de su importancia, muchas de las especies del género no se consideran domesticadas, las especies cultivadas son similares a sus parientes silvestres donde solo existe una selección empírica por parte de los productores. En el cultivo de vainilla, su diversidad genética es limitada en las plantaciones comerciales, debido a la extensa propagación vegetativa del germoplasma (Besse *et al.*, 2004). Una revisión de las especies del género *Vanilla* determinó la existencia de 15 especies de México y Centroamérica (Soto y Dressler, 2010).

4.2 Clasificación botánica

La vainilla es una planta trepadora de la familia de las orquídeas, considerada una planta epífita no parásita, es decir, que utiliza un tutor para sostenerse y así crecer, pero su fuente de nutrientes es la materia orgánica que se encuentra en la superficie terrestre. La clasificación botánica se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro1. Clasificación botánica de la vainilla

Taxonomía	
Reino	Vegetal
Grupo	Espermatofita
Clase	Angiosperma
Subclase	Monocotiledónea
Serie	Dialipétalas
Orden	Ginandrales
Suborden	Neociacneas
Familia	Orquidácea
Subfamilia	Pleonandras
Genero	Vainilla

Fuente: Montoya (1963).

4.3 Organografía de la vainilla

Damirón (2004) describe la organografía de la vainilla de la siguiente manera: Sus raíces son adventicias opuestas, aéreas y terrestres, longitud hasta 1.5 m. Poseen un tejido parenquimatoso especial con gran cantidad de perforaciones que permiten la entrada de agua que escurre. Las terrestres forman micorrizas constituidas por micelios de hongos que forman una envoltura. Las hay endótropas o externas y ectótropas que penetran en el tejido.

El tallo puede ser simple o ramificado simpódico, cilíndrico con un diámetro de 1 a 2 cm, flexible, verde, suculento, contiene haces fibrovasculares esparcidos desordenadamente en el cilindro central, sobre todo en la región periférica, sin cambium, crecimiento terminal rápido. Poco crecimiento intercalar. Las hojas son carnosas, opuestas alternas, filotaxia de subsésiles, forma oblonga-elíptica lanceolada, ápice agudo o acuminado, paralelinervas, bordes lisos o enteros, superficie cutinizada.

Las flores se agrupan en inflorescencias en racimo. (Un eje principal alrededor del cual se desarrollan las flores). Se dan de 15 a 20 desarrollando en orden ascendente. Son flores completas. El cáliz y la corola cuyo conjunto constituye el perianto en la vainilla forman un perigonio petaloide para formar una envoltura en la cual no se distingue el cáliz. Las piezas se

denominan Tépalos. Están dispuestos en dos verticilos. Uno de los tépalos del verticilo interior recibe el nombre de labelo, el cual envuelve el ginostemo (el estigma soldado con el androceo). Gineceo sincárpico, o sea con carpelos unidos. Son flores irregulares o cigomorfas con simetría bilateral.

En la vainilla como en las demás orquídeas, el polen se encuentra en un conglomerado mañoso denominado polinia el cual a su vez está contenido en el llamado polinario equivalente a las anteras.

El fruto es una cápsula trivalva que forma una vaina con costados, mide de 15 a 20 mm, de grueso cuando alcanza su desarrollo completo, peso de hasta 25 gramos. El crecimiento en longitud se alcanza en aproximadamente mes y medio. El desarrollo en grosor es más prolongado, cuando madura se produce una dehiscencia longitudinal o se cae. Contiene millares de semillas muy pequeñas (0.4 mm).

Al madurar las semillas son de color oscuro están cubiertas por una testa sólida y un tegumento muy delgado. Como en las demás orquídeas casi no contiene ninguna reserva nutritiva, son diminutas sin endospermo. La pequeña cantidad de alimento del embrión solo le permite crecer durante breve tiempo. En condiciones naturales, los compuestos orgánicos necesarios para el crecimiento son facilitados por los hongos del suelo que convierten los carbohidratos y los compuestos proteínicos insolubles en solubles. De este modo se genera una simbiosis hongo-semilla.

4.4 Sistema radicular

La vainilla, carente de una raíz pivotante, genera sus raíces en los entrenudos, donde se encuentran los meristemas axilares; debido a que se desarrolla sobre la materia orgánica, posee un sistema radical fasciculado, con amplitud exploratoria menor a 30 cm de profundidad. Además, desarrolla raíces adventicias con funciones de soporte y absorción de nutrientes al penetrar el suelo (Reyes *et al.*, 2008).

4.5 Etapas de crecimiento del cultivo de vainilla

Las etapas de crecimiento del cultivo de *Vainilla planifolia* G. Jackson y su determinación dependen del manejo cultural y del tipo de encauzamiento de las guías en crecimiento. Por lo que la longevidad del cultivo depende del mantenimiento y puede ser de 3 a 10 años, las

plantaciones comerciales en México tienen una vida promedio de 5 años, de los cuales los primeros tres son para el desarrollo vegetativo y el resto para la producción (Kelso *et al.*, 2012)

En las plantaciones de vainilla hay una alta incidencia de problemas fitosanitarios. Por lo tanto, cada año se resiembra aproximadamente 30 % de la plantación para mantener la densidad de población de 2,280 a 10,000 plantas ha⁻¹ (Curti, 1995; Sánchez, 1992).

De acuerdo con la descripción realizada por Allen, Pereira, Raes y Smith. (1998) las diversas etapas de desarrollo vegetativo en los cultivos y en este caso adaptadas para la vainilla por Kelso, Sánchez y Reyes (2012) son las siguientes: Etapa inicial (Kcini). Comprende de la fecha de siembra hasta los 200 días después de la siembra DDS y es el tiempo necesario para que la planta tenga una elongación mínima de 1.5 m, representa aproximadamente 10 % del ciclo de cultivo.

Etapa de desarrollo del cultivo (Kcdes). Comprende desde el momento en que la planta tiene 200 DDS hasta el inicio de floración o hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa.

Etapa de mediados de temporada (Kcmed). Comprende el periodo entre el inicio de la floración y el comienzo de la madurez del fruto que está indicado generalmente por la aparición del amarillamiento en el extremo distal del fruto.

Etapa final (Kcfin). Comprende el período entre el comienzo de la madurez de los frutos hasta el momento de cosecha o dehiscencia de los mismos.

4.6 Coeficiente de desarrollo Kc

Cuando el factor de disponibilidad de agua del suelo no es un factor limitante, entonces la tasa evapotranspirativa es afectada principalmente por los factores climáticos y de la planta. Los factores de la planta pueden englobarse en el coeficiente de desarrollo del cultivo (Kc) que depende de las características del cultivo como grado de cobertura, altura y rugosidad de la planta, control estomático de la transpiración, fecha de siembra, longitud de la estación de crecimiento y condiciones climáticas (Doorenbos y Pruitt, 1977).

El coeficiente de cultivo (Kc) es el factor que relaciona el uso actual del agua de un cultivo con la evapotranspiración del cultivo de referencia. La variación del Kc durante el periodo de desarrollo del cultivo expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo

y está representada por la curva del coeficiente del cultivo, la cual está formada por K_{cini} , K_{cmed} y K_{cfin} , Kelso, Sánchez y Reyes (2012).

4.7 Riego por microaspersión

El riego por aspersión es un sistema que consiste principalmente en la distribución del agua en forma de lluvia sobre el suelo agrícola, para esto se utilizan dispositivos emisores de agua, también conocidos como aspersores, los cuales generan un chorro de agua pulverizada que llega al terreno de forma uniforme y en círculos. Estas superficies mojadas dependen de los tamaños de los diámetros de los aspersores que se utilicen en el sistema de riego. El agua puede ser expulsada por medio de los aspersores debido a que está dotada de presión, gracias a un sistema de bombeo Villacís, M(2012).

4.8 Riego por goteo

Los sistemas de riego por goteo permiten conducir el agua mediante una red de tuberías y aplicarla a los cultivos a través de emisores que entregan pequeños volúmenes de agua en forma periódica. El agua se aplica en forma de gota por medio de goteros (Lliota, M.*et al.*, 2015).

Tiene una capacidad de reducir tanto el consumo de agua como los costos, el agua se aplica localmente, solo allí donde las raíces del cultivo se desarrollan, por lo que puede regar cultivos con una cantidad de agua inferior a la que necesitarían cuando se recurre a otros métodos de riego (Pereira *et al.*, 2010).

4.9 Riego por goteo tipo cola de cochino

Esta disposición se utiliza más en riego de árboles y consiste en colocar la línea lateral alrededor de la planta con los goteros necesarios para aplicar la cantidad de agua requerida. Para la disposición en cola de cochino es derivar de la línea lateral un pedazo de manguera del mismo diámetro con los goteros necesarios espaciados.

4.10 Hidrogeles de poliacrilamida

El término hidrogel se utiliza para denominar a un tipo de material de base polimérica caracterizado por su extraordinaria capacidad para absorber agua y diferentes fluidos.

En relación a los mejoradores del suelo y retenedores de humedad, se han explorado tanto los de origen natural como los sintéticos. Entre los primeros está el composteo orgánico; entre

los segundos destaca el uso de hidrogeles de poliacrilamida, los cuales son copolímeros que absorben y retienen grandes cantidades de humedad y nutrientes del suelo, y los mantienen disponibles para la planta. Los hidrogeles comerciales son granulados, tienen un contenido de materia seca de 85 a 90 %, densidad aparente de 0.85 g ml^{-1} , peso específico de 1.10 g cm^{-3} , y pH de 8.1 (Ramírez et al., 2016)

Los hidrogeles absorben hasta 150 veces su propio volumen, con una capacidad de retención de $980 \text{ ml de agua L}^{-1}$, una disponibilidad de 95 % y una vida productiva de 5 años. Las dosis recomendadas varían de 5 a 25 kg ha^{-1} , en función del tipo de suelo, cultivo y clima, según el fabricante (Ramírez et al., 2016).

V. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Localización

La presente investigación se realizó en el banco de germoplasma de vainilla de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. El cual está ubicado en la comunidad de Caracoles, Municipio de Tenampulco, en la zona nororiental del Estado de Puebla Figura 1, situado a 283 msnm. Sus coordenadas son 20° 12' 06" N y 97° 21' 60" W. Predomina un suelo tipo andosol, y un clima AM (f) cálido húmedo con lluvias en verano (INEGI, 2009). Una precipitación anual de 2,394.8 mm y una temperatura promedio anual de 22° 26°. (Servicio meteorológico nacional, 2014).

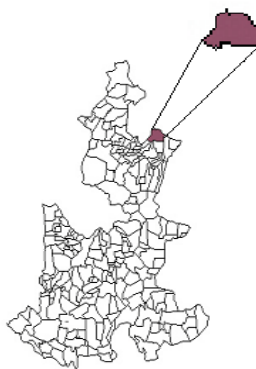


Figura1. Ubicación del sitio experimental.

5.2 Material biológico utilizado

El material biológico utilizado fue *Vainilla planifolia* en etapa uno 200, DDS y dos 200, DDS a 643 DDS de desarrollo vegetativo, establecido en un módulo sembrado con tutores de cocuite *Gliricidia sepium* a una distancia de dos metros entre plantas y dos entre surcos.

5.3 Establecimiento del sistema de riego

Se establecieron los sistemas de riego microaspersión con aspersores, goteo en forma lineal, goteo en forma de cola de cochino e hidrogel con un sistema de riego por goteo en forma lineal. Cada sistema de riego se estableció en dos módulos en la etapa uno de desarrollo vegetativo 200, DDS y etapa dos de desarrollo vegetativo 200 DDS a 643 DDS. Cada sistema de riego consistió en siete tutores cada tutor tuvo dos plantas de vainilla, los tutores fueron sembrados en dos por dos metros.

5.3.1 Sistema de riego por microaspersión

Se utilizó un sistema de riego por microaspersión utilizando aspersores auto compensados marca Rivulis modelo S2000 con un caudal de 53lph (litros por hora) con una separación de dos metros entre microaspersores instalados en una manguera de polietileno de 16 mm.

5.3.2 Sistema de riego por goteo

el un sistema de riego consistió en goteros auto compensado instalados en una manguera de polietileno de 16 mm colocando tres goteros por tutor con un caudal de descarga de cuatro lph y una separación entre ellos de 20 cm entre goteros.

5.3.3 Sistema de riego tipo cola de cochino

Se instaló la manguera de polietileno de 16 mm alrededor de cada tutor, colocando 6 goteros para cada tutor con una descarga de cuatro lph y a una separación de 28 cm entre goteros.

5.3.4 Tubería de conducción

La tubería de conducción instalada fue de 19 mm clase A-5 con una presión de trabajo máxima de 11 kgf cm⁻², la fuente de abastecimiento fue de un depósito tipo cisterna con una capacidad de 2 m³, situado en la parte alta del experimento para operar el sistema por gravedad.

5.4 Programación del riego

5.4.1 Demanda hídrica

Según Fuentes (2003), el método recomendable y más utilizado para calcular las pérdidas de agua por evapotranspiración (ETC) es el recomendado por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1997), la Etc se calculó con la ecuación 1:

$$Etc = Eto * Kc \dots \dots \dots (1)$$

Etc: Evapotranspiración máxima del cultivo mm/día

Eto: Evapotranspiración potencial o de referencia mm/día

Kc: coeficiente de cultivo (adimensional)

5.4.2 Evapotranspiración potencial o de referencia (Eto)

Para determinar la Eto se utilizó el método de Penman-Monteith considerando la ecuación 2:

$$ETO = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \frac{\gamma 900T}{+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

ETo: evapotranspiración de referencia [mm día-1]

Rn: radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m-2 día-1]

G: flujo del calor del suelo [MJ m-2 día-1]

T: temperatura media del aire a 2 m de altura [°C]

u₂: velocidad del viento a 2 m de altura [m s-1]

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]

Δ: pendiente de la curva de presión de vapor [kPa°C-1]

γ: constante psicrométrica [kPa°C-1]

5.4.3 Lámina de agua a una profundidad radicular efectiva

Para la lámina de agua en la zona radicular efectiva, se determinó con la ecuación 3

$$Lagua = (CC - PMP) * Da * Pr * 10 \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

Lagua: Lámina de agua a una profundidad radicular efectiva, mm

CC: Capacidad de campo, %

PMP: Punto de marchitez permanente, %

Da: Densidad aparente del suelo, grs cm³⁻¹

Pr: Profundidad radicular, m

5.4.4 Tiempo de riego

Para el tiempo de riego y abastecer la demanda hídrica del cultivo, se determinó con la ecuación 4

$$Tr = VBLR / (Ne * Qe) \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

Tr: Tiempo de riego

VBLR: Volumen bruto de la línea regante (m)

Ne: Número de emisores por línea regante

Qe: Gasto del emisor (lph)

5.4.5 Intervalo de riego en días

El intervalo de riego en días se obtiene con la siguiente ecuación 5

$$IR = DPH / Etc \dots \dots \dots (5)$$

Donde:

IR: Intervalo de riego (días)

DPH: Déficit Permisible de Humedad (mm)

ETC: Evapotranspiración máxima del cultivo (mm/día⁻¹)

5.5 Aplicación de hidrogel

Con el objetivo de eficientar el uso del agua se utilizó hidrogel de la marca silos de agua (silos de agua S.A. de C.V.) en un arreglo de los sistemas de riego, determinando la dosis con la ecuación 6:

$$\text{Ancho del surco (m)} * \text{largo del surco (m)} = \text{área del surco m}^2 \dots\dots\dots (6)$$

5.6 Instalación de sensores

Con el objetivo de mantener la humedad, se instalaron sensores de humedad de suelo marca WATERMARK-MODELO 200SS se colocó un sensor por cada tratamiento obteniendo así ocho sensores.

5.7 Tratamientos evaluados

Los tratamientos fueron aplicados a dos módulos experimentales los tratamientos fueron: T1 riego por goteo tipo lineal, T2 riego por goteo tipo cola de cochino, T3 riego por microaspersión y T4 riego por goteo con hidrogel de forma lineal Cuadro 2. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones las cuales comprendieron dos tutores y cada tutor tuvo dos plantas, dando un total de 96 unidades experimentales

Cuadro 2. Arreglo de tratamientos por unidad experimental

Número de tratamiento	Número de repetición	Número de tutores	Unidades experimentales
T1	3	6	12
T2	3	6	12
T3	3	6	12
T4	3	6	12
Total			48

5.8 Variables evaluadas

5.8.1 Longitud de rebrotes

Se realizó la medición de los rebrotes de las plantas con ayuda de una cinta métrica graduada en centímetros, después de un mes de aplicación de riego. Dichas medidas se realizaron cada 15 días hasta finalizar la etapa uno 0-200 DDS y la etapa dos 200-650 DDS (Figura 2).



Figura 2. A) Rebrote de 30 DDS; B) Rebrote a 200 DDS

5.8.2 Longitud de raíz

Para obtener la longitud de raíz se tomó en cuenta dos tutores por tratamiento de las cuales se descubrió la raíz y se tomó medidas con ayuda de una cinta métrica graduada en cm, después de un mes de aplicación de riego y así consecutivamente cada 15 días hasta finalizar las etapas ya comprendidas, en la Figura 3 se puede observar raíces descubiertas a los 200 DDS.



Figura 3. Raíces a los 200 DDS.

5.8.3 Área foliar

Para el cálculo de área foliar se eligieron tres hojas de la parte media de la planta, jóvenes maduras por cada tratamiento, se cortaron y se escanearon, (Figura 4 A), considerando una escala graduada en cm. El área foliar se estimó utilizando el programa de Image J, en el caso de algunas unidades experimentales por falta de material vegetativo, se obtuvo la forma de los márgenes de dichas hojas en un papel tipo cartulina, estos márgenes se recortaron, (Figura 4 B). Y se escanearon considerando una escala graduada en cm.

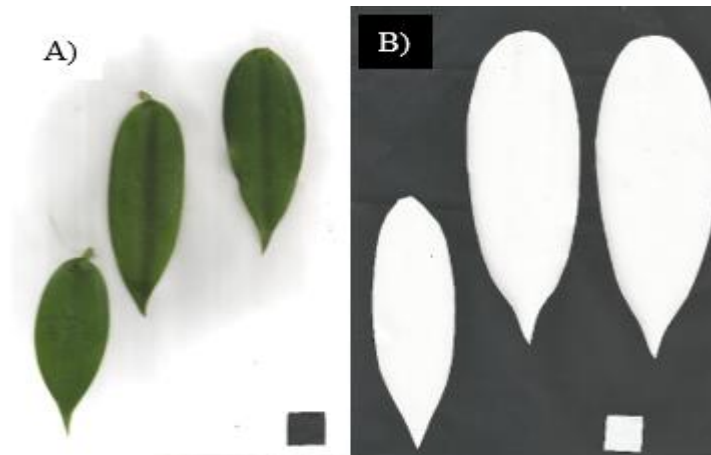


Figura4. A) hojas para escanear; B) márgenes de hoja para escanear.

5.8.4 Peso fresco, peso seco y contenido de agua

Para la determinación de peso fresco se pesó la planta completa y por secciones (Raíz, hoja y tallo) inmediatamente después del desplante, con una báscula digital y se trasladaron en bolsas de papel de 1kg al laboratorio de usos múltiples de la Facultad de Ingeniería Agrohidráulica. Para llevar a cabo el secado de la planta, (Figura 5) y se obtuvo su peso seco de cada parte de la planta. El contenido de agua se determinó con la siguiente ecuación 6.

$$CA = PF - PS \dots \dots \dots (6)$$

CA= Contenido de agua

PF= Peso fresco

PS= Peso seo



Figura 5. A) Obtención de la muestra. B) Obtención del peso fresco (PF).C) Obtención de datos de la muestra) Obtención del peso seco (PS).

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Longitud de rebrotes

El comportamiento del crecimiento de los rebrotes considerando los sistemas de riego fue variable (Figura 6), los tratamientos T3 y T1, que corresponden al sistema de riego por microaspersión y goteo en forma lineal, respectivamente, tuvieron un comportamiento semejante, debido a que registraron un crecimiento acelerado con una tasa de crecimiento de (1.2 cm.día^{-1} para T3, mientras que para el T1 fue de 0.8 cm.día^{-1}) de los 56 a los 150 DDS (días después de la siembra), posterior a los 150 a 200 DDS, se observó un crecimiento menos acelerado (0 cm/día para el T3 y 0.33 cm/día para T1). Por otro lado, los tratamientos T4 y T2, que corresponden a los sistemas de riego de goteo lineal con hidrogel y cola de cochino, respectivamente, presentaron tres etapas marcadas de crecimiento, de los 56 a los 107 DDS, crecieron 0.61 cm/día y 0.85 cm/día para T4 y T2, respectivamente, una segunda etapa fue de los 107 a los 163 DDS, con una tasa de crecimiento de 0.5 cm/día y 0.3 cm/día para T4 y T2, respectivamente, y la tercera etapa, de los 163 a los 200 DDS con 1.2 cm/día y 0.3 cm/día para los tratamientos T4 y T2, respectivamente. En general los tres tratamientos presentaron una tendencia lineal positiva, ya que se registró un R^2 por arriba de 90%.

En el periodo de 0 a 200 DDS considerada como la etapa I, es donde se establecen los esquejes de siembra y se diferencian vegetativamente las yemas laterales del esqueje y crecen de manera continúa estableciendo su sistema radical y aéreo (hojas y tallos). Sin embargo, como se puede observar en la Figura 6, este comportamiento es variable, debido posiblemente a la edad y tipo de clon utilizado como esqueje en la siembra, factores no considerados en el presente trabajo. Sin embargo, se observa que a partir de los 200 DDS, el crecimiento de dichos rebrotes tiende a uniformizarse, lo que puede deberse a que no se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3).

Los días considerados en esta etapa I correspondieron a los meses de agosto de 2019 a enero de 2020, donde las temperaturas promedio de agosto a noviembre de 2019 149 DDS fue de 23.6°C y de diciembre de 2019 a febrero de 2020 el promedio de la temperatura bajo a 19.54°C . Sin embargo, como se puede observar en la Figura 6 no se detuvo el crecimiento, solo se observa un crecimiento menos acelerado para T3 y T1. Así mismo, dichos rangos de temperatura son los requeridos para un buen desarrollo de la planta, ya que Childers *et al.*, (1948); Ranadive,

(2005), mencionan que la vainilla requiere temperaturas de 20 a 30°C, e incluso hasta los 32°C (Purseglove *et al.*, 1981; Anandarajet *et al.*, 2005), para su buen desarrollo.

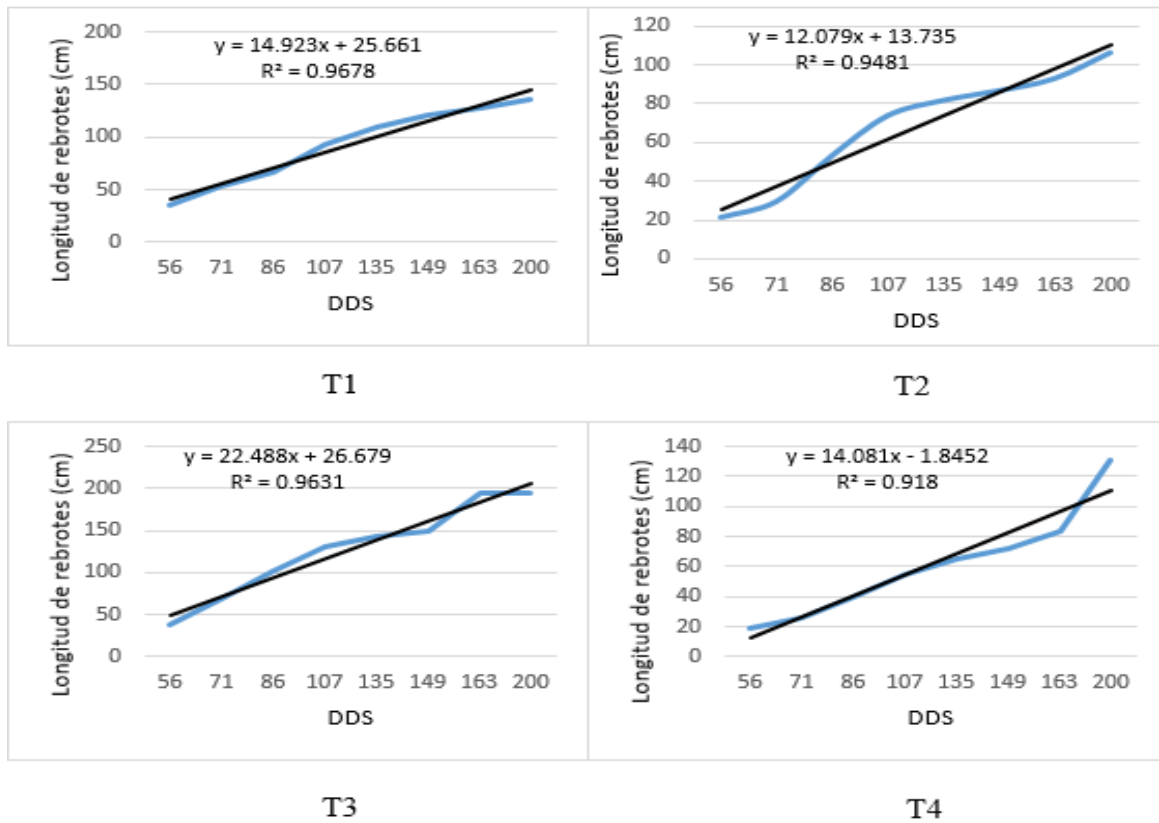


Figura 6. Longitud de rebrotes: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4= goteo con hidrogel.

Son pocos los trabajos donde se analiza la dinámica de crecimiento de los rebrotes de vainilla en México, López (2020) en un trabajo sobre coeficiente de cultivo en *V.planifolia* Jackson, reporta que obtuvo un crecimiento promedio de 1.94 cm/día. Sin embargo, dichas mediciones no se realizaron en la misma etapa de crecimiento vegetativo de las plantas. En un experimento con vainilla bajo riego, Sujatha & Bhat, (2010), reporta un crecimiento de 2.43 m de longitud en 10 meses de crecimiento. Por otro lado, Palacios (2014), al inocular diferentes bacterias promotoras del crecimiento en esquejes de vainilla, reportan longitudes aproximados de 0.5 m a 1.3 m a los 162 días después de la siembra.

6.2 Número de rebrotes

Los rebrotes se consideraron por la reactivación vegetativa de las yemas contenidas en el segmento de tallo que se establecieron en campo. Los rebrotes fueron apareciendo en diferente tiempo en cada esqueje establecido y su número a los 200 DDS por tratamiento fue variable (Figura 7). El tratamiento T2 fue el que presentó una mayor cantidad de 3 rebrotes seguido por los tratamientos T3 y T4 respectivamente, mientras que el T1 fue el que presentó un menor número de rebrotes T1. Sin embargo, a los 200 DDS, dichas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3).

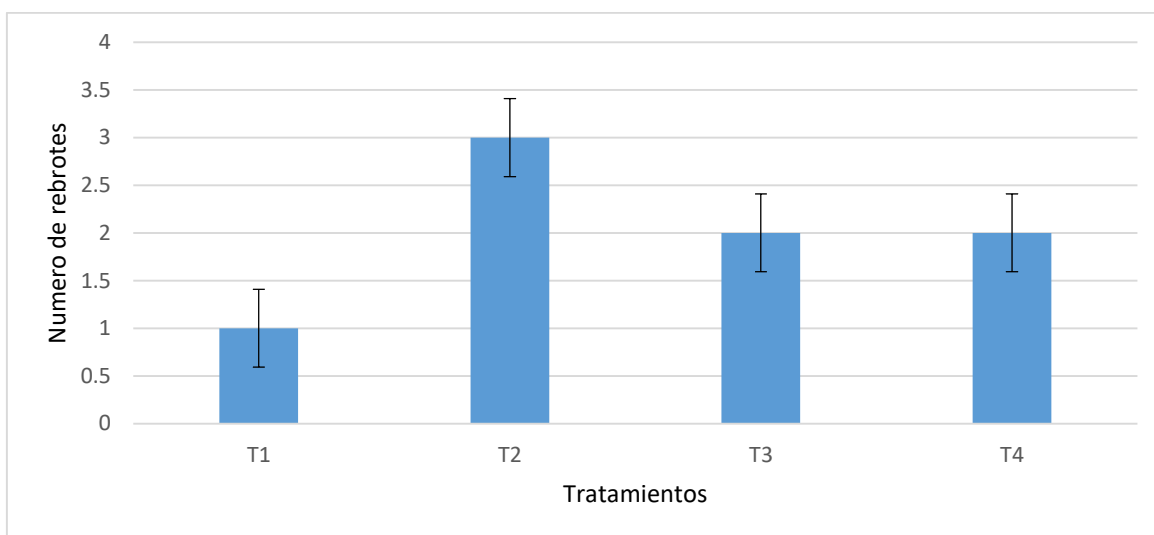


Figura 7. Número de rebrotes por tratamiento 200 DDS: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4 =goteo con hidrogel.

El número de rebrotes que se presentan son muy importantes debido a que estos constituirán en el futuro la arquitectura de la planta, mientras que el área foliar es importante para la fotosíntesis y que se reflejara en el rendimiento por planta (Figura 8). No encontrar diferencias significativas en el número de rebrotes a los 200 DDS, se debe a que en esta etapa la planta se encuentra en el establecimiento de la parte aérea y radical por lo que la energía se enfoca en mayor cantidad al crecimiento del primer brote de dicha planta.



Figura 8. Longitud de rebrotes

6.3 Grosor de tallo de los rebrotes

Para el grosor de tallo se consideraron las mediciones en la parte media de los rebrotes y al final de la etapa I 200 DDS, considerando que en este tiempo los tallos alcanzaron suficiente madurez. El engrosamiento de los tallos en los 4 tratamientos vario de 5.1 a 6.63 mm, siendo el tratamiento T3 (6.63 cm) el que presento tallos de mayor diámetro seguidos por los tratamientos T1 y T2 con 6.08 mm y 5.51 mm respectivamente. Sin embargo, dichas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3) por lo que el sistema de riego no influyo para el engrosamiento de los tallos. En este sentido, López (2020), menciona que el crecimiento radial de los esquejes en *V. planifolia*, detiene a los 140 días después de su aparición llegando a un máximo de 5.0 mm, resultados que coinciden en lo encontrado en el presente trabajo. Por otro lado, Castillo y Engleman (1993), reportan un diámetro promedio de tallo en vainilla mansa de 11 mm. Sin embargo, estas mediciones se realizaron en plantas adultas, es por ello la variación de los resultados por las diferentes etapas de estudio.

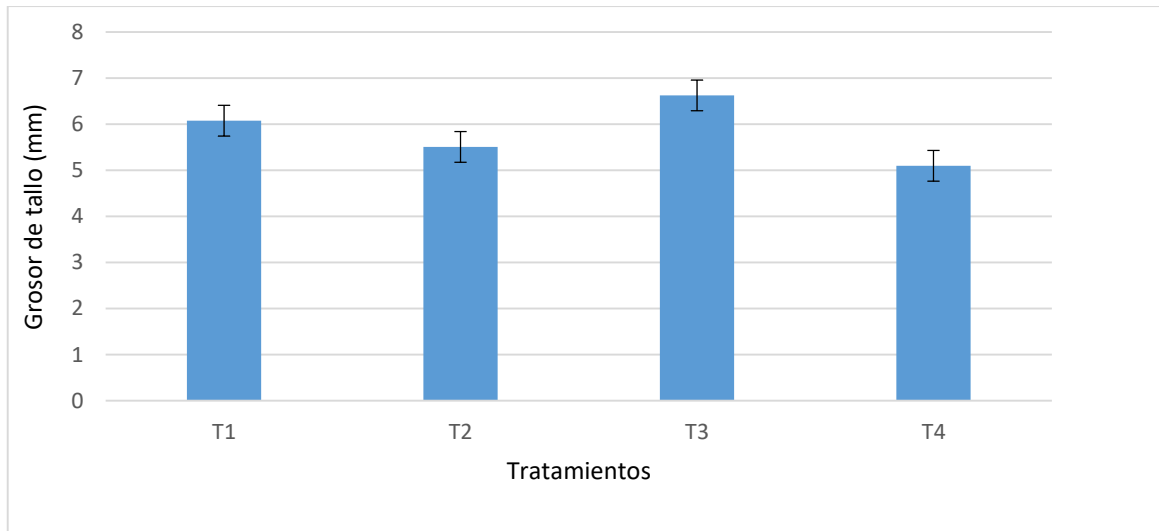


Figura 9. Grosor de tallo: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión.T4 =goteo con hidrogel.

6.4 Área de distribución de raíz

El área de distribución de las raíces considerando los sistemas de riego fue variable. En T1, las raíces se distribuyeron en un área 613 cm², que fue el que registró la menor área, por otro lado los tratamientos T3 y T4, fueron los que presentaron una mayor área de distribución de raíces con 1775 cm², T2 fue el que presento una distribución intermedia con 1106 cm² (Figura 10). Las diferencias encontradas fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3).

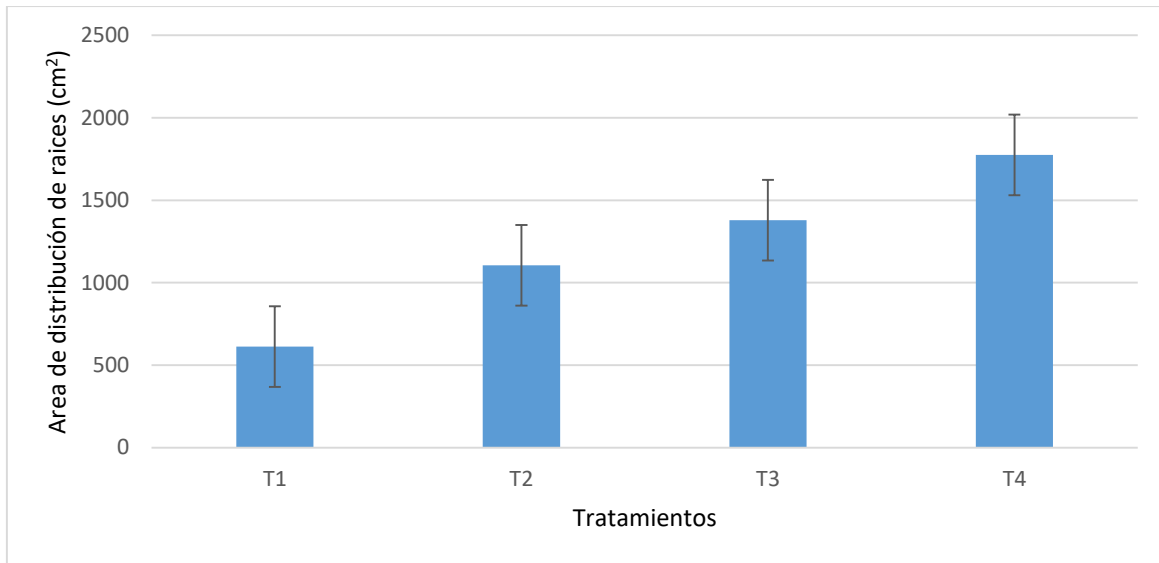


Figura 10. Área de distribución de raíz: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3= microaspersión. T4 =goteo con hidrogel.

Se observó, que la raíz se distribuyó según el área de mojado de los sistemas de riego Figura 11, T1 y T4, correspondiente a goteo lineal, las raíces se concentraron cerca del tutor y del lado de donde pasaba la línea de riego, así mismo el sistema por microaspersión las raíces siguieron el área de mojado, fue T2 (cola de cochino), donde las raíces se distribuyeron alrededor de tutor debido a que su área de mojado se distribuye de manera uniforme en forma radial respecto al tutor.



Figura11. Distribución de raíces: A) T1=goteo lineal. B) T2= cola de cochino. C) T3=microaspersión. D) T4= goteo con hidrogel

La mayor cantidad de raíces se concentró en los 10 cm de profundidad. Sin embargo, de manera independiente al sistema de riego, se observó dos raíces que profundizaron hasta los 26 cm, en el caso de T2, en general presentó mayor profundidad de sus raíces, concentrándose entre los 5 y 16 cm Figura 12.



Figura 12. Profundidad de raíces

6.5 Número de hojas por metro lineal

El tratamiento T2, fue el tratamiento que presentó un mayor número de hojas por metro lineal (Figura 13), con 17 hojas, mientras que los tratamientos T1, T3 y T4, presentaron 13 hojas, sin embargo, dichas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$). El número de hojas depende de la distancia entre nudos debido a que encada nudo se emite una hoja y su distancia varía según el material genético utilizado y el manejo de la planta. En este sentido, Lepiz –Ildefonso, et al., (2018), mencionan que el crecimiento de una planta puede medirse a través de la elongación de los tallos, número de ramas, número de nudos, área foliar, producción de materia seca. Para *V.planifolia*, se reportan una distancia entre nudos de 10 a 15 cm. (Curtí, 1991,). Castillo y Engleman (1993), reportan un promedio de longitud de entrenudos en vainilla mansa de 11cm., los resultados encontrados en el presente trabajo están por arriba de lo reportado para *V. planifolia*

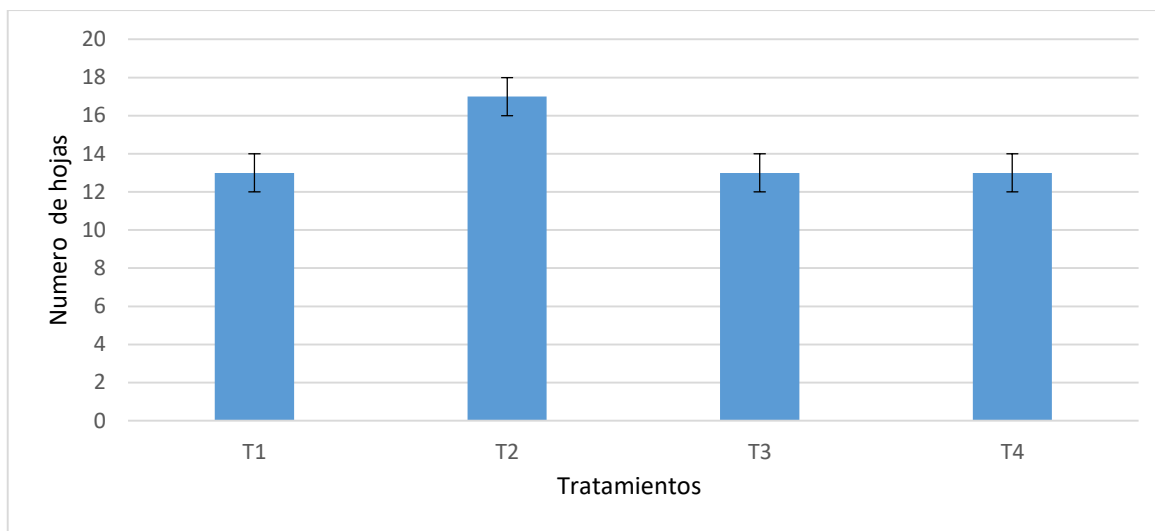


Figura 13. Número de hoja por metro cuadrado. T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3= microaspersión. T4= goteo con hidrogel.

6.6 Área foliar

El área foliar fue registrada al final de la etapa I 200 DDS, debido a que en esta edad las hojas ya están totalmente desarrolladas y funcionales. El área foliar es de importancia debido a que es en las hojas donde se realiza la fotosíntesis, lo que se reflejara en el desarrollo de la planta y rendimiento. En este caso fue T1, el que presentó mayor área foliar con 58.16 cm², seguido de T2 y T3, con 45.95 y 41.75 cm², respectivamente, fue T4 el que presentó la menor área foliar con 37.07 cm² (Figura 15). Las diferencias encontradas fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 3). Para *Vainilla planifolia* a los cuatro años de edad se reporta un área foliar de 61 cm² hasta 100 cm² (Sánchez et., al 2001) de acuerdo a los datos ya mencionados la planta tiende a tener un buen crecimiento en cuanto la edad que refleja de 200 DDS.

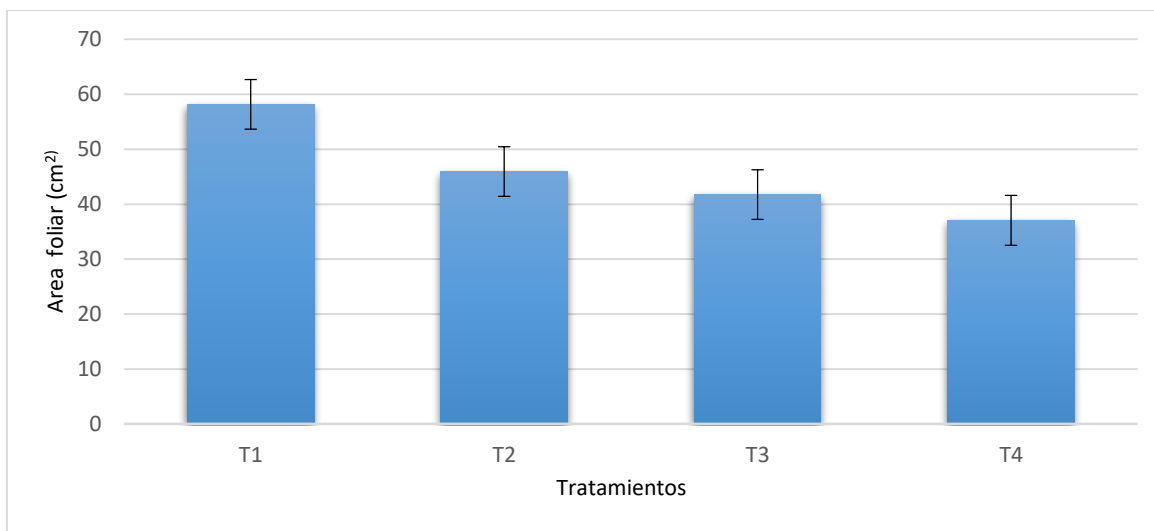


Figura 14. Área foliar: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.

Cuadro 3. Prueba de medias de las variables de desarrollo vegetativo en etapa I

Tratamiento	LB	NB	GB	AR	NH	AF
T1	83.33 a	1 b	5.98 a	613.3 b	14.33 a	58.33 a
T2	68 a	3 a	5.50 a	1106.7 ab	17.33 a	43.66 b
T3	128 a	0.6 b	6.56 a	1379.3 a	13.33 a	36.00 b
T4	131.33 a	1.3 ab	5.53 a	1775.3 a	13.66 a	37.33 b

Medias con la misma letra en columnas, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

LB=longitud de brotes(cm). NB= Número de rebrotes. GB= grosor de rebrote(mm)s. AR= Área de distribución de raíces(cm²). NH= Numero de hojas por metro lineal. AF=Área foliar(cm²)

6.7 Peso fresco, peso seco y contenido de agua

El peso fresco se obtuvo mediante una balanza, con el cual se registró el peso fresco y seco de cada uno de los órganos de la planta (tallos, raíz y hoja), así mismo el peso total de la planta (Cuadro 4), datos que se utilizaron para calcular los porcentajes considerando el total de cada tratamiento. Como se puede observar el porcentaje de peso seco por planta (PS), considerando la planta completa es similar en los cuatro tratamientos debido a que no se encuentran diferencias estadísticas significativas. Sin embargo, numéricamente fue T3 con 33 g el que presentó mayor acumulación de PS, seguido de T1 y T4 con 20 y 16 g. respectivamente, fue T2, el que presentó menor PS con 12 g. Considerando los órganos de la planta, fue la hoja y tallo quienes presentaron mayor acumulación de PS en los cuatro tratamientos, que representaron entre el 35 y 65 % de PS considerando el total de la planta, lo que se refleja en el contenido de agua (CA) ya que, la parte aérea (hoja y tallo) fue el órgano que presentó mayor contenido de agua (de 41 a 52 %) en los cuatro tratamientos considerando el total de la planta (CA%), la raíz representó una acumulación de CA entre el 4 y 6% (CA%). Se registró una tendencia a tener mayor acumulación de PS en tallo en comparación de la hoja en los cuatro tratamientos. Las diferencias encontradas en los componentes de la materia seca en la planta completa, así como en tallo, hoja y raíz no fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$)

La distribución de materia seca en los órganos de la planta, es un indicativo de la eficiencia en canalizar materia seca hacia la estructura de interés económico conocido como índice de cosecha (Escalante y Kohashi, 1993), en este sentido, Lepiz-Ildefonso, *et al.*, (2018) mencionan, que la materia seca es un parámetro importante en las plantas, ya que es resultado de la fotosíntesis neta y el análisis del crecimiento a través de muestras secuenciales y acumulativas del peso seco describe el comportamiento de una planta a través de sus etapas de desarrollo, así mismo, estos autores reportan que en las etapas correspondientes a la fase vegetativa en frijol no hubo diferencias significativas en contenido de materia seca. Escalante Estrada *et al.*, (2015), reportan que la mayor acumulación de materia seca en maíz fue más alta en tallo seguida del grano y tallo, similarmente Galvan *et al.*, (2003), encontraron una tendencia a tener mayor materia seca en tallo que en hojas en frijol común, resultados similares en el presente trabajo.

Cuadro 4. Peso fresco, peso seco y contenido de agua

		PF por planta(g)	PF (%)	PS por planta(g)	PS (%)	CA por planta (g)	CA (%)
Tratamiento 1	Tallo	116	42	10	57	106	41
	Raíz	10	4	1	8	9	4
	Hoja	157.67	54	9	35	149	55
	Total	283.67	100	20	100	263.67	100.3
Tratamiento 2	Tallo	74.667	52	8	65	67	51
	Raíz	8	5	1	7	7	5
	Hoja	62	43	3	28	59	44
	Total	145	100	12	100	133	100
Tratamiento 3	Tallo	174	42	14	45	160	42
	Raíz	28	7	4	15	24	6
	Hoja	229	51	14	40	215	52
	Total	431	100	33	100	399	100
Tratamiento 4	Tallo	80	45	6	40	74	46
	Raíz	11	6	1	8	9	6
	Hoja	87	49	8	52	79	48
	Total	178	100	16	100	162	100

PF (g) = Peso fresco por planta; PF (%), considerando el total del tratamiento; PS(g)=peso seco; PS (%), considerando el total del tratamiento, CA=contenido de agua por planta (g), CA (%), porcentaje de contenido de agua considerando el total del tratamiento

6.8 Etapa II

6.8.1 Longitud de rebrotes

La etapa II, se considera a partir de los 200 a los 650 DDS, donde se puede observar que la longitud de los rebrotes varió entre los tratamientos (Figura 15), siendo T2 el que presentó mayor longitud a los 643 DDS, con 643 cm, seguido de T1 con 617 cm, los tratamientos T3 y T4 los que presentaron los menores valores con 180 y 152 cm, respectivamente, dichas diferencias fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) (Cuadro 5). En este periodo de tiempo también varió su crecimiento, ya que T2, presento un crecimiento de 4.45 cm por día, T1 de 1.39 cm.día, mientras que los rebrotes de T3 y T4 crecieron 0.4 y 0.34 cm por día, respectivamente. Sin embargo, en los cuatro tratamientos presentan una tendencia lineal positiva, debido a que registran una R^2 por arriba del 90%.

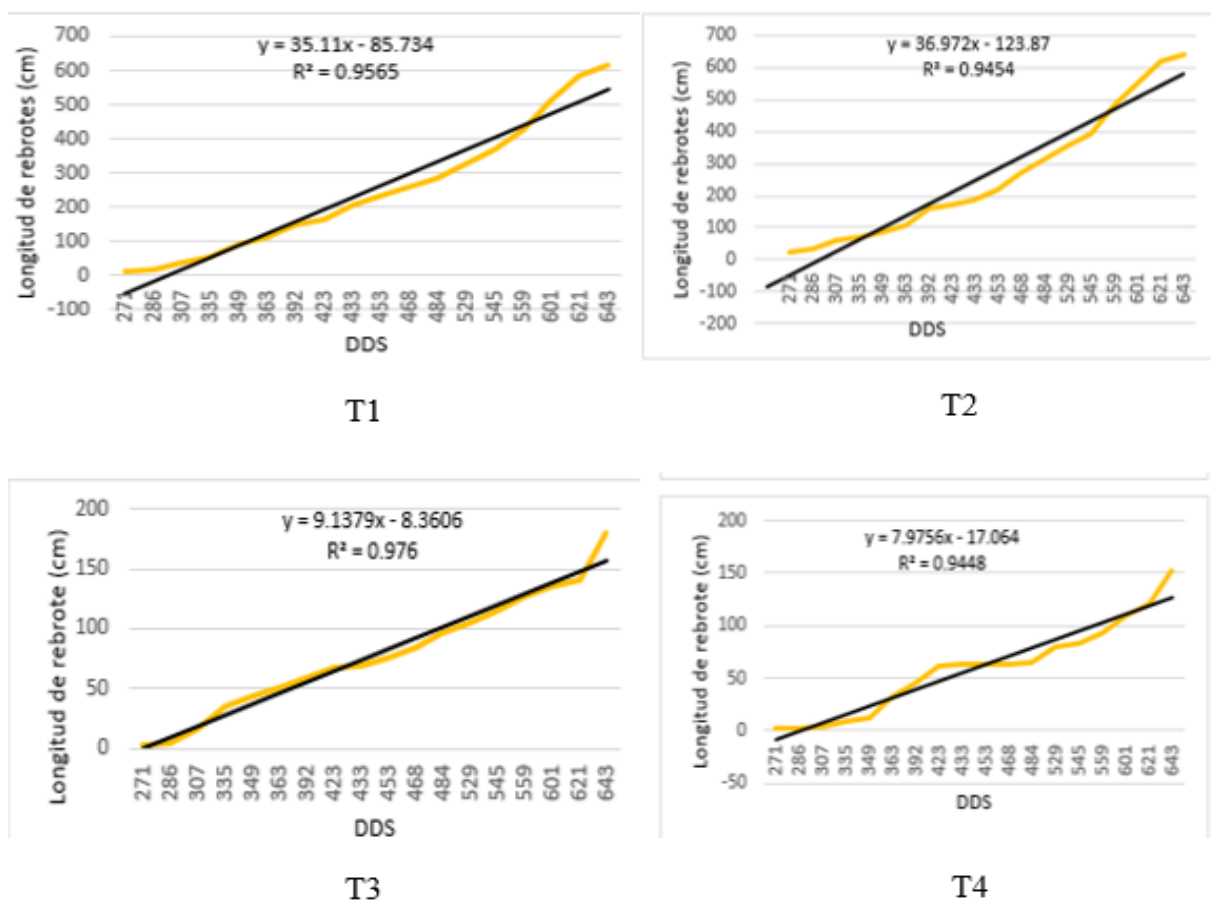


Figura 15. Longitud de rebrotes: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4= goteo con hidrogel.

Las dinámicas del crecimiento de los rebrotes también variaron entre los tratamientos, como se puede observar en la figura 16, los cuatro tratamientos tuvieron un crecimiento lento entre los 271 y 335 DDS, Sin embargo, los rebrotes de T1 y T2, presentaron un crecimiento sostenido de los 335 a los 643 DDS, con 1.8 cm/día y 1.8 cm/día, respectivamente. Los rebrotes de T3 y T4, presentaron un crecimiento más lento en el mismo periodo, con 0.52 cm/día y 0.48 cm/día, respectivamente. Este comportamiento se debió al efecto del tratamiento y a condiciones ambientales ya que el periodo de los 271 a los 335 DDS, las temperaturas fueron en promedio de 23 °C mientras que la temperatura promedio de los 335 a los 643 DDS, fue de 24°C.

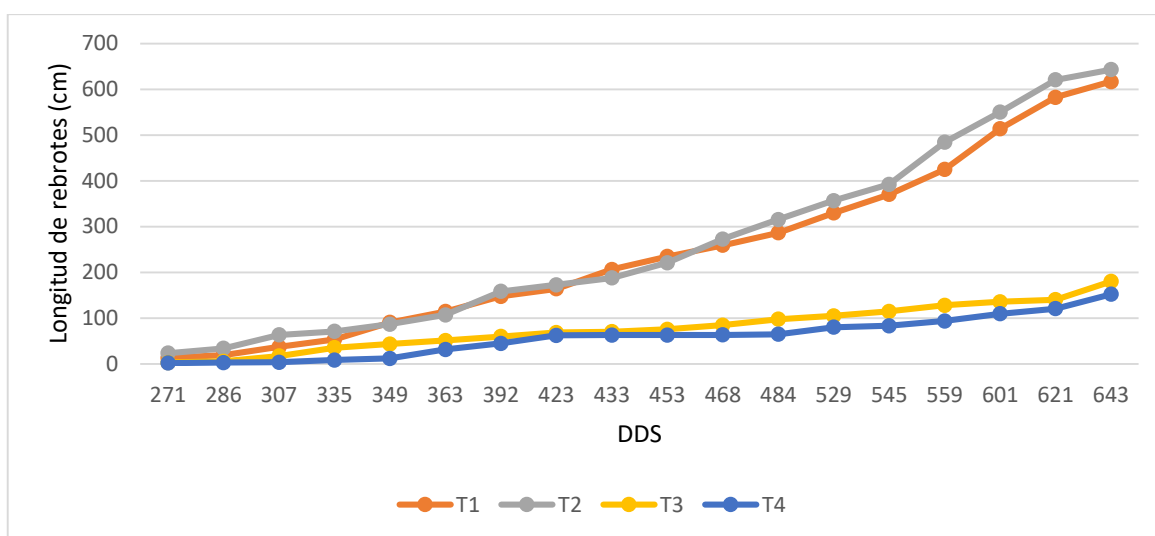


Figura16. Longitud de rebrotes: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=micro aspersión. T4= goteo con hidrogel.

6.8.2 Número de rebrotes

El número de rebrotes se mantuvo en dos rebrotes Figura 17, para los cuatro tratamientos, esto debido a que la planta concentra sus energías en consolidar su sistema aéreo para lograr una madurez necesaria para su reproducción. El número de rebrotes puede variar en los casos que uno de los rebrotes principales llega a ser dañado su punto de crecimiento, ya sea por una plaga, viento, enfermedad, bajas temperaturas, etc., entonces la planta puede presentar otro rebrote en cualquiera de las yemas laterales para proseguir su crecimiento. no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) Cuadro 5.

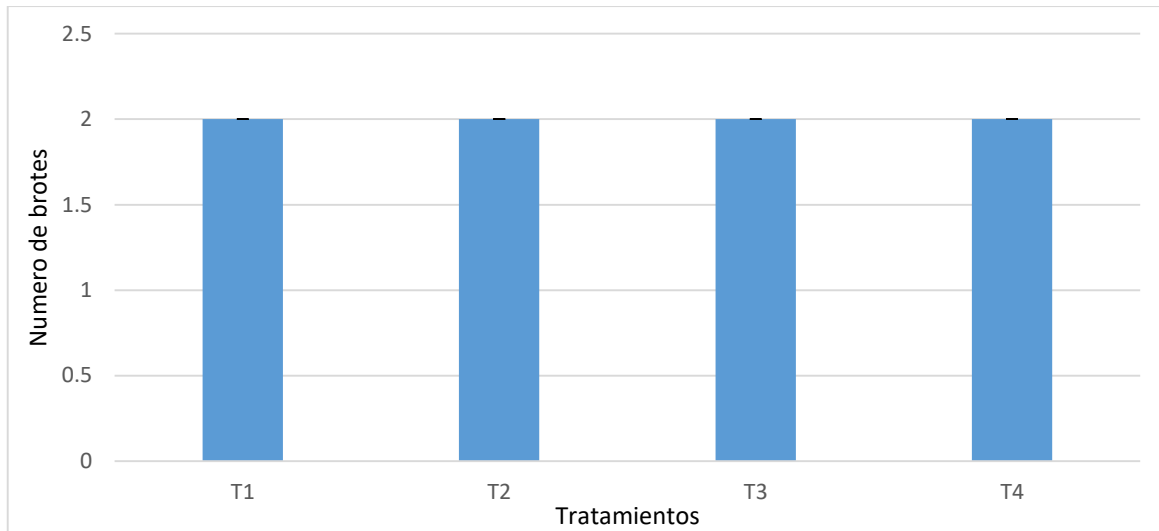


Figura 17. Número de brotes: T1=goteo lineal. T2= cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.

6.8.3 Grosor de rebrotes

El grosor del tallo vario de 6 a 11mm., siendo T2 el que presento mayor grosor con 11mm, seguido de T1 con 7 mm, fueron T3 y T4 los que presentaron los menores valores con 5 y 6 mm, respectivamente Figura 18.Las diferencias encontradas fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$).El grosor es un indicativo de vigor de la planta y este es mayor cuando esta tiene las condiciones idóneas para su desarrollo entre ellas el contenido de humedad, por lo que se infiere que la disponibilidad de agua fue uno de los factores que influyeron para obtener dichos resultados

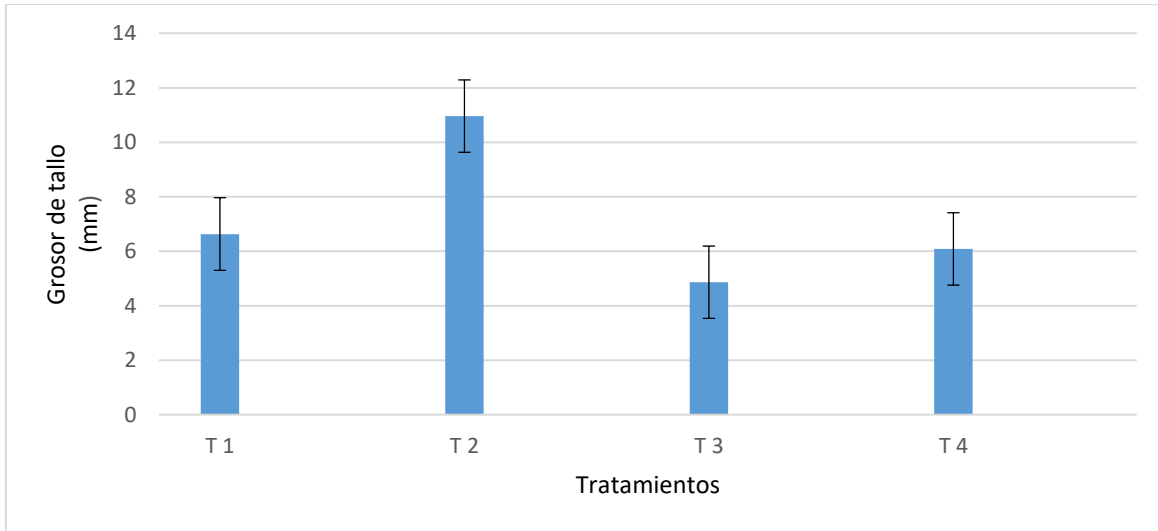


Figura18. Grosor de tallo: T1=goteo lineal. T2= cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.

6.8.4 Área de distribución de raíces

El área de distribución de raíces alrededor del tutor varió de 600 a 4150 cm² Figura 19, siendo T2, el que presentó mayor área con 4150 cm², seguido de T3 con 4100 cm², fueron T1 y T4 los que presentaron los menores valores con 1900 y 600 cm², respectivamente, diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) Cuadro 5. Estos resultados reflejan la longitud de raíces que presentaron los tratamientos respecto al tutor, T2, presentó 85 cm de longitud de sus raíces, seguido por T3 con 70cm y fueron T3 y T4 los que presentaron las menores longitudes con 62.5 y 51 cm, respectivamente.

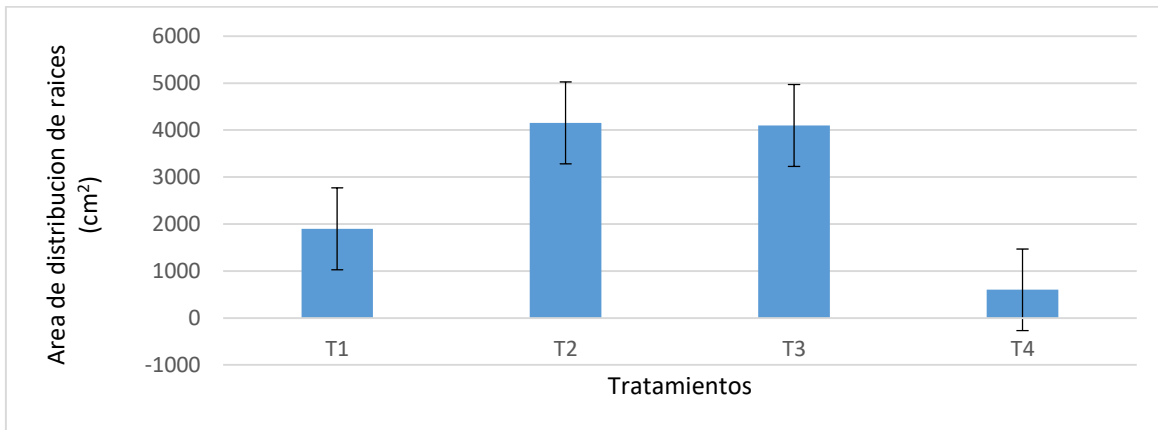


Figura 19. Área de distribución de raíces cm²: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.

La distribución de raíces respondió al área de mojado Figura 20, ya que en los tratamientos T1 y T4 que correspondieron a goteo lineal, las raíces se concentraron donde el gotero proporcionaba el agua de riego, mientras que T2 los goteros se distribuyeron uniformemente alrededor del tutor lo que permitió mayor uniformidad de distribución del agua, así mismo, T3, correspondiente a microaspersión, el área de mojado es mayor lo que también permitió que las raíces tuvieran mayor longitud y área de distribución en comparación de T1 y T4.



Figura 20. Distribución de raíces: A) T1=goteo lineal. B) T2=cola de cochino C) T3=microaspersión) D) T4= goteo con hidrogel.

6.8.5 Número de hojas por metro lineal

El número de hojas por metro lineal vario ligeramente entre los tratamientos, entre 16 y 17 hojas. T1 y T2, fueron los que presentaron los mayores valores con 16 y 17 hojas, respectivamente,

seguidos por T3 y T4 con 13 hojas Figura 21. Estos resultados indican que los tratamientos con goteo lineal tienen una tendencia a alargar la longitud de entre nudos, y los tratamientos donde hay mayor área de mojado tienden a acortar los entre nudos, ya que en cada nudo sale una hoja. Las diferencias encontradas no fueron estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) Cuadro 5.

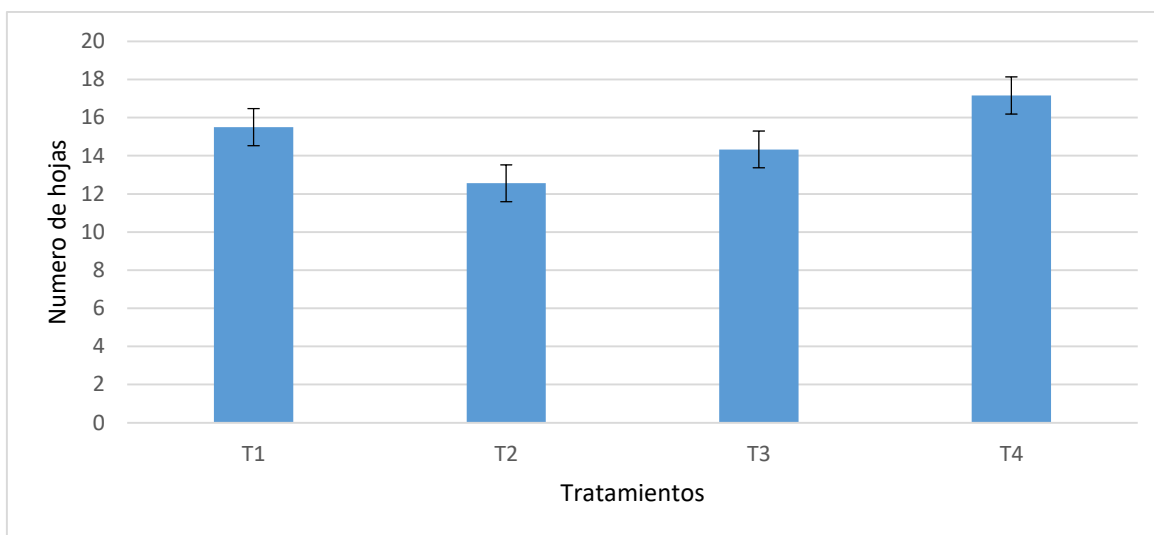


Figura 21. Número de hojas por metro lineal: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.

6.8.6 Área foliar

El área foliar fue mayor en T2, con 70 cm^2 , seguido por T3 con 63 cm^2 , fueron T1 y T4, los que presentaron los menores valores con 60 y 59 cm^2 , respectivamente Figura 22. Estos valores indican que los tratamientos con goteo lineal tienden a tener menor área foliar en comparación

con los tratamientos donde el sistema de riego es con mayor dispersión alrededor del tutor. No se encontraron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) Cuadro 5.

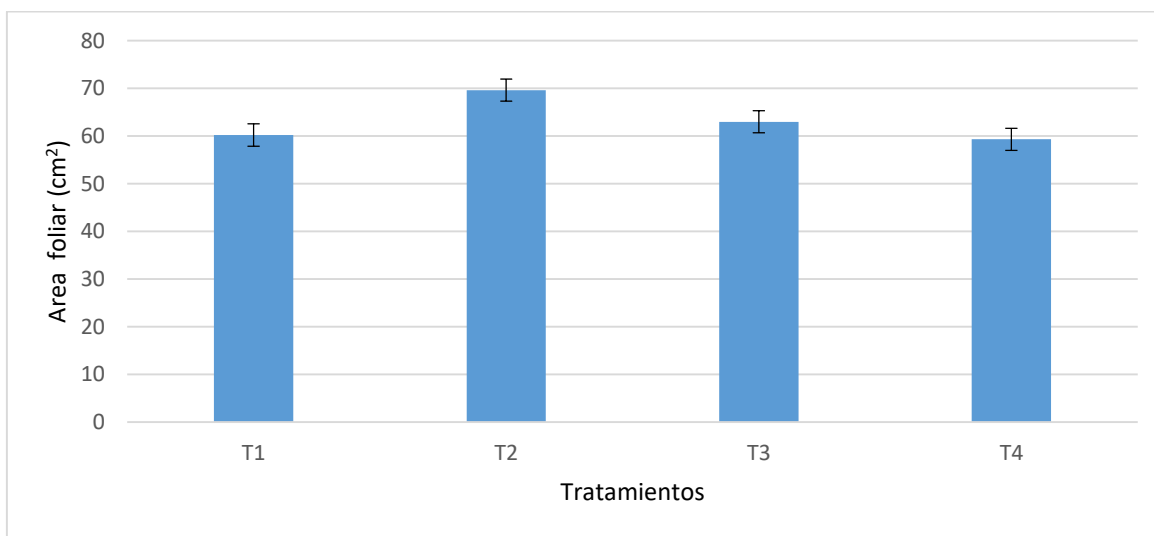


Figura 22. Área foliar cm²: T1=goteo lineal. T2=cola de cochino. T3=microaspersión. T4=goteo con hidrogel.

Cuadro 5. Prueba de medias de las variables de desarrollo vegetativo en etapa II

Tratamiento	LB	NB	GB	AR	NH	AF						
T1	616.67	a	1.66	a	6.60	b	1908.3	b	12.00	a	60.33	a
T2	643.00	a	2.00	a	10.96	a	4141.7	a	12.33	a	69.67	a
T3	180.00	b	1.33	a	4.85	c	4063.3	a	14.66	a	49.00	a
T4	152.00	b	1.66	a	6.06	bc	526.0	b	16.33	a	59.33	a

Medias con la misma letra en columnas, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

LB= Longitud de rebrotes(cm). NB= Numero de rebrotes. GB= Grosor de rebrotes(mm). AR= Área de distribución de raíces(cm²). NH = Número de hojas por metro lineal. AF= Área foliar(cm²)

6.8.7 Peso fresco, peso seco y contenido de agua

Considerando el total de PS de la planta, fue T2, el que presentó mayor PS con 255 gr.planta⁻¹, seguido de T1 con 157 gr.planta⁻¹, T3 y T4, fueron los que presentaron menor PS con 40 y 77 gr.planta⁻¹, respectivamente Cuadro 6. La distribución de la materia seca (PS), se concentró mayormente en el tallo (38 al 44%) en comparación con la hoja (28 al 41 %). Las raíces tanto terrestres como aéreas representaron desde el 10 al 33% de PS. La mayor concentración de agua

en porcentaje con respecto a la planta encuentra en las hojas coincidiendo esto en los T1, T2 y T4 los que presentaron valores de 53%,48% y 41% respectivamente.

Según Sánchez *et al.*, (2001) al aplicar diferentes sistemas de producción con respecto al riego se muestra diferencia significativa entre los sistemas en el peso fresco, peso seco en el tallo en una plantación de cuatro años de edad lo que también se puede observar en el Cuadro 7 que en este caso presento diferencia significativa entre los tratamientos.

Cuadro 6. Peso fresco, peso seco y contenido de agua

	Órgano	PF(g)	PF %	PS(g)	PS(%)	CA (g)	CA(%)
Tratamiento 1	Tallo	497	34	71	44	427	33
	Hoja	671	50	46	29	625	53
	Raíz aérea	129	9	27	15	102	8
	Raíz terrestre	65	7	13	11	51	6
	Total	1362	100	157	100	1204	100
Tratamiento 2	Tallo	1305	39	99	38	1224	39
	Hoja	1593	48	103	41	1521	48
	Raíz aérea	141	4	27	10	119	4
	Raíz terrestre	291	9	26	10	274	9
	Total	3329	100	255	100	3139	100
Tratamiento 3	Tallo	131	45	17	43	114	46
	Hoja	166	38	11	28	154	38
	Raíz aérea	33	10	7	16	26	9
	Raíz terrestre	22	8	5	13	17	7
	Total	352	100	40	100	312	100
Tratamiento 4	Tallo	87	21	23	29.870	64	20.645
	Hoja	145	38	17	22.077	128	41.290
	Raíz aérea	48	13	11	14.285	37	11.935
	Raíz terrestre	108	28	26	33.766	82	26.451
	Total	387	100	77	100	310	100

PF (g) = Peso fresco por planta; PF (%), considerando el total del tratamiento; PS (g) peso seco por planta; PS (%) considerando el total del tratamiento: CA=contenido de agua por planta (g), CA (%), porcentaje de contenido de agua considerando el total del tratamiento

Cuadro 7. Prueba de medias de los componentes de la materia seca

Tratamiento	PFPC		PSPC		PFT		PST	
T1	1361.3	b	157.33	ab	497.0	b	70.33	ab
T2	3328.3	a	254.33	a	1304.3	a	99.33	a
T3	352.3	b	75.67	b	131.3	b	17.0	b
T4	285.0	b	51.0	b	87.0	b	23.0	ab

Cuadro 7. Continuación

Tratamiento	PFH		PSH		PFR		PSR	
T1	671.0	b	46	a	64.33	b	13.0	b
T2	1592.3	a	52.33	a	291.0	a	26.0	a
T3	165.7	b	17.0	a	22.0	c	5.0	bc
T4	144.3	b	11.33	a	10.33	c	1.0	c

Medias con la misma letra en columnas, son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05)

PFPC= Peso fresco de planta completa (g). PSPC= Peso seco planta completa (g). PFT= Peso fresco de tallo (g). PST= Peso seco de tallo(g). PFH= Peso fresco de hoja (g). PSH= Peso seco de hoja (g). PFR = Peso fresco de raíz (g). PSR= Peso seco de raíz (g).

6.9 Análisis del sistema de riego en la etapa 1

La Etapa 1, fue establecida en el día 05/07/2019, mientras que el riego se estableció a los 63 DDS y el monitoreo de la humedad dio inicio a los 86 DDS (29 de septiembre). Los valores horarios reportados por los sensores fueron promediados a nivel diario y así se obtuvieron datos representativos diarios. Durante los primeros diez días del monitoreo, la humedad se encontró a niveles abundantes, puesto que la presión de succión estuvo por debajo de los 20 kPa en todos los casos. Entre los 99 y 103 DDS, se observaron disminuciones en el contenido de humedad Figura 23, en donde T3 y T4 registraron los valores más bajos, con comportamiento similar; en

contraste T1 y T2, aunque tuvieron disminución, se mantuvieron cerca de los 10 kPa. El funcionamiento de los sensores se basa en la medición del potencial hídrico que por convención el máximo potencial hídrico es cero y, a medida que disminuye la cantidad de agua, aumenta la presión de succión. Lo anterior implica que, a menor cantidad de agua disponible, es mayor la cantidad de energía que emplea la planta para acceder al agua. De este modo, a medida que aumenta la presión de succión indica mayor estrés hídrico debido a la menor disponibilidad de agua.

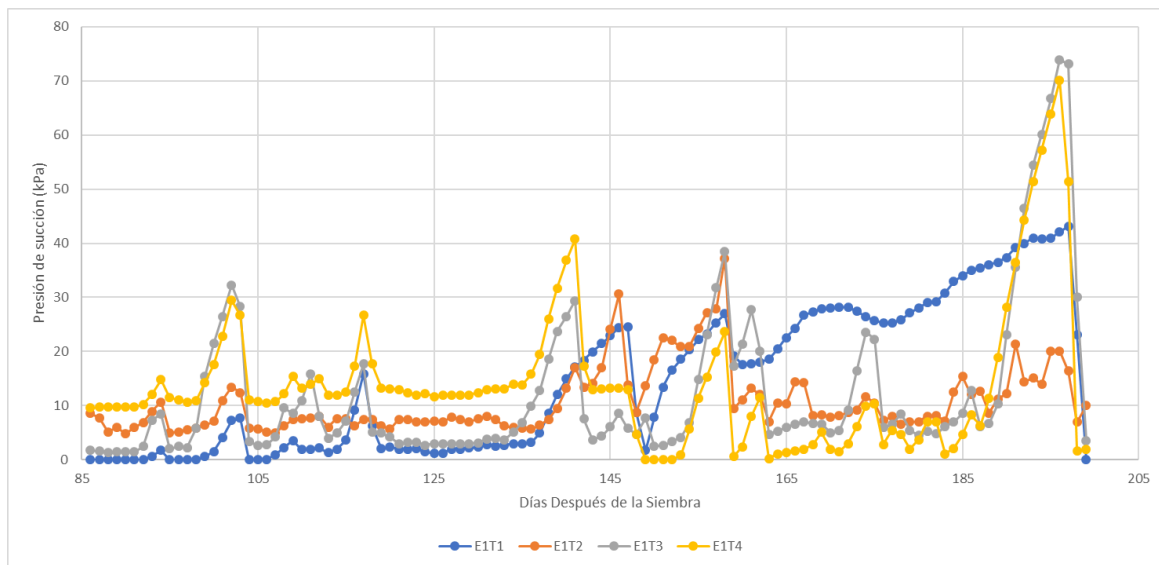


Figura 23. Monitoreo de la humedad

De conformidad con lo mostrado por la Figura 23, a medida que transcurre el ciclo de crecimiento de las plantas, éstas se encuentran con mayor estrés hídrico; en efecto, durante los primeros 110 DDS, se observaron bajos niveles de presión de succión. A partir de los 134 DDS, los valores de la presión de succión se incrementan hasta llegar a los 141 DDS, en que todos los tratamientos registraron alzas en la presión de succión, encontrándose un máximo local. Aunque los efectos se pueden medir de varias maneras, T3 y T4, mostraron los registros más altos, en tanto que T1 y T2, al igual que al principio, tuvieron los valores más bajos. Lo anterior, es el resultado del incremento en la demanda de agua por efecto del crecimiento de las plantas.

Es importante mencionar que durante el periodo que va de los 86 DDS a los 128 DDS ocurrieron varios eventos de precipitación, algunas veces fue diario, cuyos efectos se pudieron observar en la primera parte del análisis aquí expuesto, en donde los sensores registraron abundante

disponibilidad de agua reflejado en los bajos niveles de presión de succión. Los eventos de precipitación permitieron disminuir la frecuencia del riego, puesto que se proporcionó riego a los 85 DDS y se volvió a regar hasta los 161 DDS.

A los 162 DDS se proporcionó un riego luego del último evento de precipitación registrado a los 143 DDS, las reservas de agua fueron suficientes para mantener a la planta durante 19 días sin la reposición del riego. De los 162 DDS y hasta los 200 DDS, se puede observar el comportamiento debido a los efectos del riego, puesto que solo hay un evento de lluvia a los 165 DDS Figura 24 que tuvo limitado efecto en la disponibilidad de agua en la zona radicular.

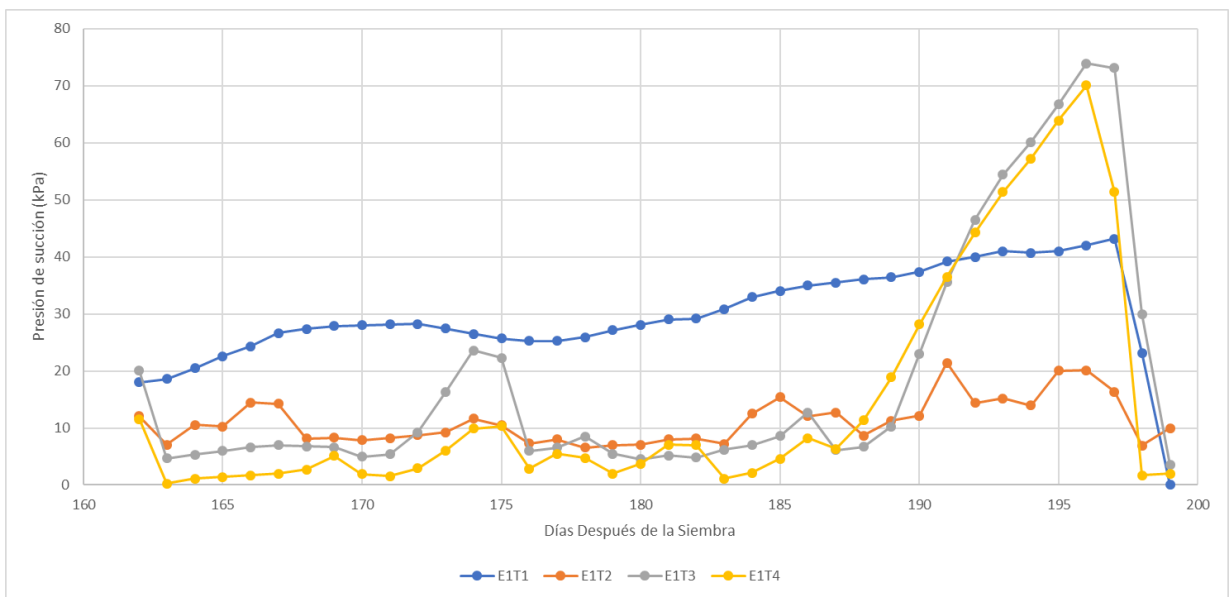


Figura 24. Comportamiento de los sensores de humedad en el periodo 162-200 DDS.

El evento de la precipitación ocurrido en el día 165, fue de solo 5.4 mm, aunque reviste importancia para las plantas establecidas, su efecto es menor comparado con el riego que se proporcionó a las plantas. Durante el periodo 162-200 DDS, se observa que los niveles de presión de succión fueron mayores en T1, hasta los 191 DDS; en ese mismo periodo, el sensor instalado para monitorear T4, estuvo por debajo de todos los demás.

Los valores de succión estuvieron por debajo de los 20 kPa (en muchos casos por debajo de 10 kPa) en T2, T3 (ligera excepción a los 174 y 175 DDS) y T4 hasta los 190 DDS, cuando presento incrementos en la presión de succión. Esto implica que el efecto del estrés hídrico comenzó a ser mayor, lo que implica deficiencias en la disponibilidad de agua para las plantas. Sin embargo,

T2 muestra valores por debajo de lo reportado por el resto de los sensores, aunque mostró incrementos por encima de los 10 kPa, se mantuvo por debajo de los 20 kPa. Estos resultados muestran que T2, es el que mejor retención y disponibilidad de agua tuvo cuando el resto de los tratamientos comenzaron a exhibir falta de agua. Al finalizar la fase experimental, ocurrieron dos eventos de precipitación (uno por día) en los dos últimos días, lo que hizo que la succión disminuyera hasta valores cercanos a cero, lo que implicó alta disponibilidad de agua en la zona de raíces.

6.10 Análisis del sistema de riego en la etapa 2

Para la etapa 2, las fechas más importantes desde el punto de vista de la evaluación del riego, va de los 321 DDS (03/12/2019) a los 510 DDS (09/06/2020), que abarca el final del otoño, el invierno y la primavera casi a totalidad, caracterizada por precipitaciones muy esporádicas, alta insolación e incrementos importantes en la temperatura diurna. En estas condiciones, el aprovisionamiento de humedad a través del riego se convierte en un factor crítico, el adecuado diseño de un sistema de riego deberá ser capaz de suplementar el agua a niveles que permitan garantizar una exitosa producción, puesto que el riego es prácticamente el único que aporta humedad a las plantas en la zona de raíces. En esta época, es cuando se da una de las etapas de mayor importancia para la producción de la vainilla, puesto que ocurre la floración y la necesaria polinización manual, que conllevan al amarre de frutos que pueden establecer las condiciones de producción. Es en esta época en la que se puede saber con antelación sobre las perspectivas de producción, pero también es esta la época que refleja el resultado del desarrollo en la primera etapa.

Durante el periodo que va de los 320 (02/12/2019) DDS a los 380 DDS (31/01/2020), el suministro de agua fue por medio del riego Figura 25. Se observa que el sensor instalado en el T4, registra los valores más bajos de tensión de humedad, lo que indica que tiene abundante disponibilidad de agua, en tanto que el sensor que monitorea T1, se encuentra por encima de los demás, registrando los valores más altos de tensión y, con ello, menor disponibilidad de agua en la zona de raíces. T3 tiene ligeros incrementos por encima de 10 kPa. De ellos, T2, es el que se mantiene en un nivel intermedio, ni tan bajo como ϕ T4 y tampoco tan alto como lo reportado por T1. Figura 25, se concluye que el T2 es el que reporta mejor consistencia en el suministro

de agua a la zona radicular, ni tan húmedo como en T4 y tampoco tan deficiente como lo que se reportó por el sensor instalado en T1.

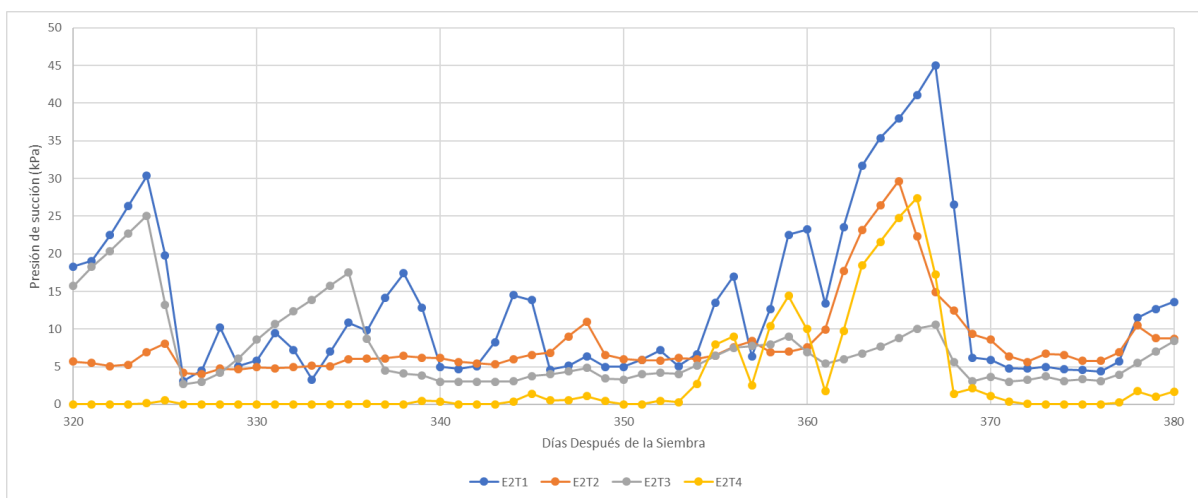


Figura 25. Comportamiento de la humedad en la etapa 2

El segundo periodo de interés Figura 26 para análisis del comportamiento del sistema de riego instalado en cada uno de los tratamientos, es entre el 381 DDS (01/02/2020) y los 441 DDS (01/04/2020). En este periodo los registros de T1 son similares a los mostrados por la Figura 25, donde reporta estrés hídrico, mientras que T3 ahora tiene un comportamiento similar a T1, por lo que las plantas sufrieron deficiencias hídricas o cuando menos, la disponibilidad fue más limitada que en el caso de T2 y T4. Por otro lado, T4 sigue siendo el que menor esfuerzo requiere para obtener el agua en la zona de raíces y T2, se encuentra en valores intermedios, con un leve ascenso debido a las exigencias climáticas, los requerimientos de la planta en el tiempo puesto que a mayor follaje mayor área de transpiración y a resequeidad presente en el suelo.

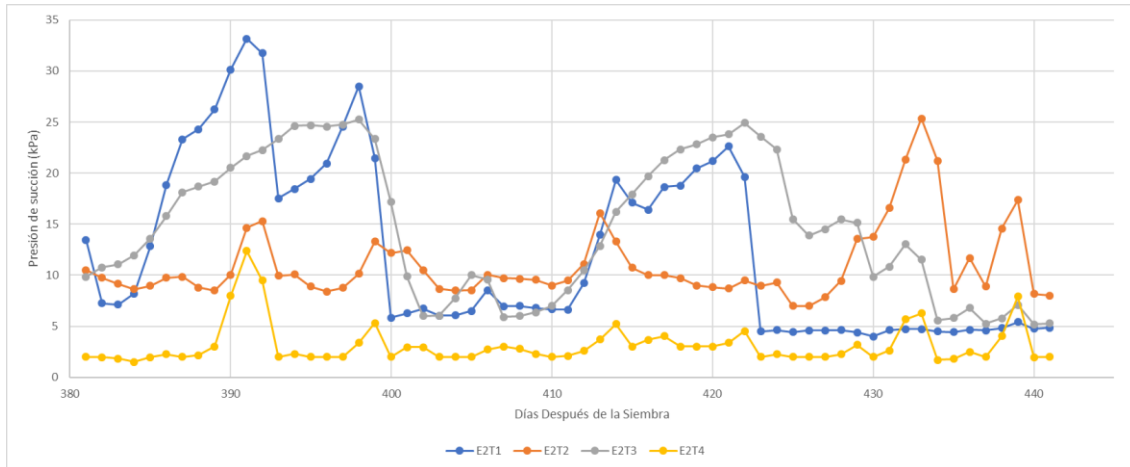


Figura 26. Segundo periodo de análisis de la etapa 2

En contraste con lo encontrado en la Figura 25, la Figura 26 muestra que aun cuando los valores de presión de succión se mantienen bajos en T2 y T4, hay aumentos en la misma, como resultado de la mayor demanda hídrica por el medio y por las plantas. El, T4 mantuvo valores entre 0 y 5 diferente al valor cuasi-constante de cero mostrado en la Figura 25. Por otro lado, T2 registro valores menos de 10 a tomar valores alrededor de 10, aunque parece menor el efecto del estrés hídrico, es posible notar la mayor demanda hídrica que provoca que el sustrato permanezca con menor humedad que al principio del periodo de análisis. Al final de la etapa de análisis, alrededor de los 430 DDS los valores de succión de T2 se incrementan de manera importante, mientras que, en el resto de los tratamientos, permaneces con valores bajos; de hecho, T2 pasa a ser el de mayores valores, con registros por encima de 10 y un pico en 25kpa.

El tercer periodo de análisis se encuentra entre los 442 DDS (02/04/2020) y los 510 DDS (09/06/2020) que se muestra en la Figura 27. Se observan incrementos importantes en la presión de succión en la segunda mitad del periodo de análisis, donde ellos mayores valores fueron registrados por T3, aunque es posible visualizar un patrón generalizado de incremento.

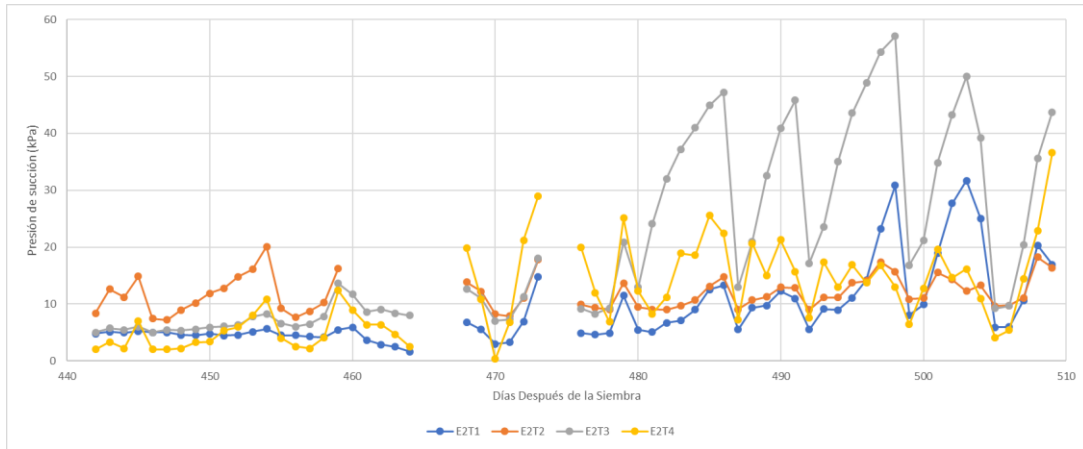


Figura 27. Tercer periodo de análisis en etapa 2

En el tercer periodo de análisis, T1 mantiene bajos valores de succión, en tanto que durante la primera mitad T2 mantiene valores altos. En la segunda mitad, T3 incrementa de manera importante la presión de succión, con T4 en segundo lugar y los valores de T1 y T2 son muy similares.

Entre los 430 DDS (21/03/2020) y 460 DDS (20/04/2020), se observaron incrementos en la presión de succión registrada por el sensor colocado en el T2 Figura 28. Esta etapa del inicio de la primavera se caracterizó por bajas precipitaciones y alta demanda hídrica; de hecho, los riegos fueron más frecuentes hasta el punto de riego realizados cada tercer día y, ante la respuesta encontrada, a los 455 DDS se decidió aplicar el doble de la lámina de riego de diseño. En lo sucesivo, aunque los riegos fueron frecuentes, no se alcanzó el punto crítico que se tuvo en este periodo y, con posterioridad, el sensor ubicado en T2 comenzó a registrar valores por debajo de lo reportado por el resto de los sensores, tal como se ya se discutió anteriormente en la Figura 27.

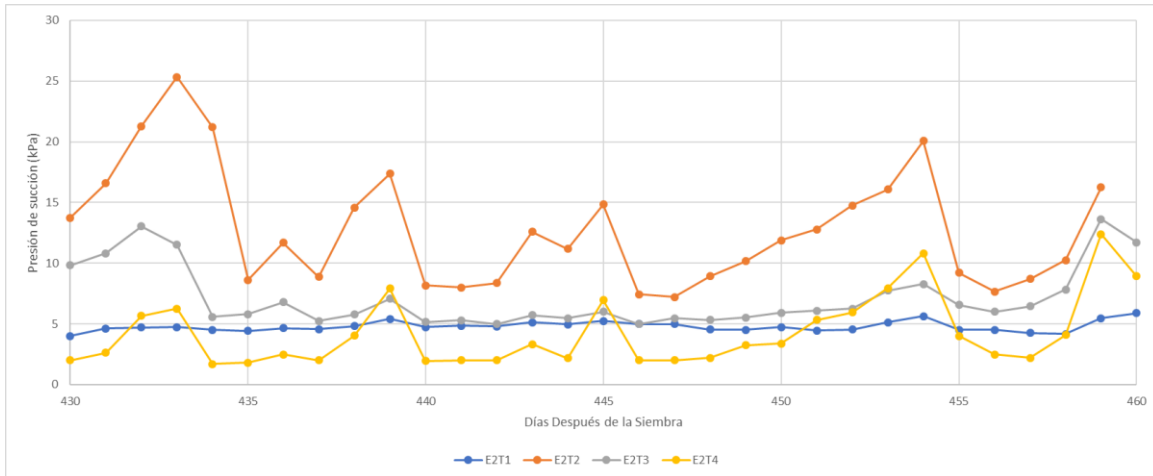


Figura 28. Periodo de riego en etapa 2

Al revisar los resultados plasmados en el Cuadro 4, se encuentra que T1 y T2, fueron los que presentaron mayores valores en cuanto a biomasa. La proporción entre T2 y T3, T4 está alrededor de 10:1; mientras que los valores entre T1 y T2, aunque no tienen proporciones con los dos últimos, T2 destaca por encima de los valores reportados por T1. Esto implica que, en la época de mayor demanda hídrica por las condiciones climáticas, la demanda hídrica debió ser mayor en t2 y también la lámina de riego debió ser mucho mayor en T2 que en el resto de los tratamientos. De este modo, es posible inferir que la lámina de riego es un elemento que debe cambiar a lo largo del año, más allá de la lámina de riego por diseño en cada una de las etapas.

VII. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que la distribución de las raíces tuvo un comportamiento directamente relacionado con el área de mojado que proporcionó el sistema de riego en cada uno de los tratamientos, con el T2 (cola de cochino) el que permitió mejor desarrollo radicular.

Con respecto al peso seco, en la Etapa I, el tallo resultó con los valores más altos en comparación con lo acumulado por parte de las hojas y raíces, con el T3 en condición de equilibrio entre tallo y hojas.

En la Etapa II, la mayor acumulación de materia fresca se observó en T2, que mostró proporciones ligeramente por encima de 9:1 con respecto a T3, 8:1 con respecto a T4 y de 2:1 con respecto a T1. En proporciones similares resultó la acumulación de agua entre los tratamientos, mientras que en el peso seco las proporciones disminuyen a 6.4:1, 2.5:1 y 1.62:1 al comparar T2 con T3, T4 y T1, respectivamente.

Los resultados mostraron que la lámina de riego presenta dinámica variable a lo largo de la etapa de desarrollo y también en función de la época del año, por lo que el uso sustentable del agua para la producción de vainilla debe contemplar esta variabilidad en la búsqueda de evitar estrés hídrico a las plantas al tiempo de minimizar el uso del agua.

La época de mayor importancia para suplementar el agua por los sistemas de riego, es la que va de enero a junio, con especial atención al periodo entre el 21 de marzo y el 20 de abril, puesto que aparte de la mayor demanda por las condiciones climáticas, es el inicio de la floración. La producción de cultivos es sensible a la disponibilidad de agua en la época de floración y amarre de frutos, tal como ocurre con la vainilla en la etapa crítica del inicio de la primavera.

Considerando el desarrollo vegetativo, la acumulación de peso seco de las plantas y el comportamiento de la humedad registrada en los sensores en la etapa I y II, se concluye que el mejor sistema de riego fue el instalado en T2 (denominado cola de cochino), debido a que se adapta a comportamiento fisiológico del sistema radicular de las plantas de vainilla.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Allen R., G., L. Pereira S., D. Raes, and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy. 298 p.
- Besse, P., D. Da Silva, S. Bory, M. Grisoni, F. Le Bellec, y M-F. Duval. 2004. RAPD genetic diversity in cultivated Vanilla: *Vanilla planifolia*, and relationships with *V. tahitensis* and *V. pompona*. *Plant Science* 167(2):379-385.
- Bonet P, C., Acea, I., Brown, M. O., Hernández, V. M., & Duarte, D. C. (2010). Coeficientes de cultivo para la programación del riego de la piña. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(3), 23-27.
- Bory, S., Lubinsky, P., Risterucci, A. M., Noyer, J. L., Grisoni, M., Duval, M. F., & Besse, P. (2008). Patterns of introduction and diversification of *Vanilla planifolia* (Orchidaceae) in Reunion Island (Indian Ocean). *American Journal of Botany*, 95:805-815.
- Bouriquet G. 1954. Le vanillier a la vanille. Encyclopédiebiologique. Editions Paul Lechevalier. Paris. 746 p.
- Castillo, M. R. y M. E. Engleman. 1993. Caracterización de dos tipos de *Vanilla planifolia*. *Acta Botánica Mexicana*, Centro de Botánica, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México, 25: 49-59
- Castro, P. M., Águila, F. M., Quevedo, N. A., Kleisinger, S., Tijerina, C. L., & Mejía, S. E. (2008). Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro. *Agricultura técnica en México*, 34(4), 459-470.
- Castro-Bobadilla, G. 2008. Evaluación y producción de vainilla en la zona de Papantla, Veracruz, México. Tesis de Doctorado. Secretaría de Posgrado, Instituto de Ecología, A. C. Xalapa, Veracruz, México. 93 p.
- Childrens, N. F., Cibes, A.N.D. 1948. Vanilla culture in Puerto Rico, U.S. Department. Federal ExperimentStation in Puerto Rico. Circular No 28. Washington, D.C. 94 p.

- Curti E. D. 1995. Cultivo y beneficiado de vainilla en México. Organización Nacional de Vainilleros Indígenas de México
- Damirón R. V. 2004. El cultivo de la vainilla. Veracruz agrícola, Dirección General de Agricultura y Fitosanitaria. Gobierno del estado de Veracruz, México.
- Divakaran, M., Nirmal, K., & Peter, K. V. (2006). Conservation of Vanilla species, in vitro. *Scientia Horticulturae*, (110), pp.175-180
- Doorembos, J. y W. Pruit. (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Serie Riego y Drenaje No 24. FAO, Roma, 193 p.
- INEGI. 2019. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Tenampulco, Puebla.
- INIA.Reyes, Camila,.Hepp, Christian &Naguil Andres.2017. método directo para la medición de materia seca y disponibilidad de forraje. *Instituto de investigaciones agropecuaria*. Disponible en <http://biblioteca.inia.cl/medios/biblioteca/informativos/NR42143.pdf>
- Kelso B. H. A. 2012. Estimación de coeficientes de desarrollo para Vanillaspp. y calibración regional de ETo en México. Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Toluca, México.
- Kelso, B. H. A., Bâ, K.-M., Sánchez, M. S.,& Reyes, L. D. (2012). Automatización de un lisímetro de pesada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (4), 807-811.
- Lépiz-Ildefonso, Rogelio, Chavarín-Espinoza, Iris E., López-Alcocer, José de J., & Rodríguez-Guzmán, Eduardo. (2018). Acumulación de materia seca durante las etapas de desarrollo de variedades de frijol. *Revista fitotecnia mexicana*, 41(3), 275-282
- Lopez. I. O.2020. Coeficiente de cultivo de *Vanilla planifolia* G. Jackson en la etapa final. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Pereira L., S. 2007. Drought impacts in agriculture: Water conservation and water saving practices and management. In: Rossi, G., T. Vega, and B. Bonaccorso (eds). *Methods and Tools for Drought Analysis and Management*. Springer, Netherlands. pp: 349-383.

- Pereira L., Valero, Maria Raquel, Martin Benito (2010). El riego y sus tecnologías. Centro regional de estudios del agua. Universidad de Castilla.
- Purseglove, JW; Marrón, P.EJ; Verde, C.L. y SRJ Petirrojos. 1981. Especies: Volúmenes 1 y 2. Longman Grupo Limited, Londres.
- Ramirez, Arnaldo, Benítez, José Luis, Rojas de Astudillo, Luisa, & Rojas de Gáscue, Blanca. (2016). Polymers materials type hydrogels: review of their characterization by ftir, dsc, sem and tem. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108-130.
- Ramírez, R. S., Gravendeel, B., Singer, R. B., Marshall. C. R., y Pierce, N. E. (2007). Dating the origin of the Orchidaceae from a fossil orchid with its pollinator. *Nature*, 448, 1042-1045
- Ranadive, A. S. 1994. Vanilla- cultivation, curing, chemistry, technology and commercial products. In: Spices, Herbs and Edible Fungi. Charalambous G. (ed). Elsevier Science. Amsterdam pp. 517-577
- Reyes López D; Rodríguez B Kelso; H Huerta; M Ibáñez, A. 2008. Beneficiado tradicional de vainilla. Puebla, MX, Editorial Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 72 p.
- Sánchez M., S. 1997. Caracterización de los principales sistemas de producción comercial de vainilla (*Vanilla planifolia* A) en México. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Sánchez, C.; Catalán, I. V. and Villa, C. M. M. 2006. Evapotranspiration modeling for irrigation purposes. Chapter book. In: modeling and remote sensing applied to agriculture. USA-México. USDA ARS – INIFAP, pp.71- 89.
- Sánchez, M.I. (1992). Métodos para el estudio de la evaporación y evapotranspiración. Geoformaediciones. España.
- Soto, M. A., & Dressler, R. L. (2010). A revision of the Mexican and Central American species of *Vanilla plumier* ex Miller with a characterization of their ITS region of the nuclear ribosomal DNA. *Lankesteriana International Journal on Orchidology*, 9, 285-354

Sujatha, S., & Bhat, R. (2010). Response of vanilla (*Vanilla planifolia* A.) intercropped in arecanut to irrigation and nutrition in humid tropics of India. *Agricultural Water Management*, 97(7), 988–994. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.031>

Viramontes, S. (2014). Genética de la conservación y la historia de vida de *Vanilla planifolia* Andrews (Orchidaceae). *Herbario CICY*, (8), pp. 88-90.

WWAP. 2014. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos UNESCO, pp.754