



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

USO DE AGUA Y KC EN DOS VARIEDADES DE GIRASOL BAJO EL SISTEMA SUCCIÓN EN DOS SUSTRATOS

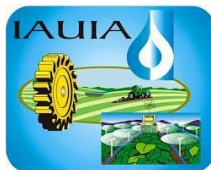
TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

IGNACIO FERNANDO VIZCARRA HERNÁNDEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:
DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ



APROBADA



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2021

USO DE AGUA Y KC EN DOS VARIEDADES DE GIRASOL BAJO
EL SISTEMA SUCCIÓN EN DOS SUSTRATOS

Tesis realizada por **Ignacio Fernando Vizcarra Hernández** bajo la supervisión del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA**

DIRECTOR:

DR. RAMÓN ARTEAGA RAMÍREZ

ASESOR:

DR. ABEL NOLASCO QUEVEDO

ASESOR:

DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

CONTENIDO

CONTENIDO	III
ÍNDICE DE CUADROS	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
DEDICATORIA	VIII
AGRADECIMIENTOS	IX
DATOS BIOGRÁFICOS	X
1. Introducción general	1
1.1 Literatura citada	5
2. REVISIÓN DE LITERATURA	1
2.1 Girasol	1
2.1.1 Origen del cultivo.....	1
2.1.2 Morfología girasol	5
2.1.3 Descripción fenológica del girasol	6
2.1.4 Kc	11
2.1.5 Kc en Girasol	11
2.1.6 Uso del agua en Girasol	13
2.2 Sistema de riego localizado	15
2.2.1 Riego por succión.....	15
2.2.2 Sortividad	20
2.2.3 Características físicas de capsulas porosas	20
2.3 Sustratos	21
2.3.1 Características físicas de sustratos.	21
2.3.2 Características químicas de sustratos.	23
2.4 Literatura citada	23

3.	Consumo de agua de dos variedades de Helianthus Annus bajo riego por succión en invernadero.	27
3.1	Resumen	27
3.2	Abstract	28
3.3	Introducción	29
3.4	Materiales y Métodos	30
3.4.1	Ubicación del experimento.	30
3.4.2	Diseño experimental	30
3.4.3	Solución nutritiva	31
3.4.4	Variables que se midieron y estimaron.	32
3.4.5	Caracterización de las cápsulas	32
3.4.6	Caracterización de sustratos	33
3.4.7	Determinación de área foliar (AF) y tasa relativa de crecimiento (TRC AF)	33
3.4.8	Estimación de GDD y filocrono	34
3.4.9	Determinación de ETo y Kc.	34
3.5	Resultados y discusión	36
3.5.1	Caracterización de cápsulas porosas	36
3.5.2	Caracterización de sustratos	37
3.5.3	Consumo hídrico	40
3.5.4	Comportamiento del consumo de agua en los tratamientos con respecto a la evapotranspiración.	41
3.5.5	Variables agronómicas	43
3.5.6	Variación del contenido de humedad en los sustratos por tratamiento	49
3.5.7	Variación de la temperatura y humedad relativa.	51
3.5.8	Fenología de cultivo de Girasol para las dos variedades	52
3.5.9	Grados días de desarrollo (GDD) y filocrono.	53
3.5.10	Determinación de Kc por tratamiento	55
3.6	3.6. Conclusiones	59
3.7	3.7. Agradecimientos	60
3.8	3.8 Literatura citada	60
4.	ANEXOS	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 escala bbch para girasol.	8
Cuadro 3.1 características de cápsulas porosas.	36
Cuadro 3.2 características físicas y química de sustratos.	38
Cuadro 3.3 calibración de sensor fdr para humedad de sustratos.	39
Cuadro 3.4 consumos hídricos acumulados por estado fenológico y su total en cada tratamiento y sus repeticiones (mm).	40
Cuadro 3.5 consumo hídrico promedio (mm) por estado fenológico.	41
Cuadro 3.6 medias de altura, diámetro de tallo y área foliar por estado fenológico; número de hojas verdaderas.....	44
Cuadro 3.7 prueba de medias tukey - altura	45
Cuadro 3.8 prueba de medias tukey - área foliar.	47
Cuadro 3.9 prueba de medias tukey - número de hojas.	48
Cuadro 3.10 fenología de los cultivares de girasol.	52
Cuadro 3.11 grados días de desarrollo de los cultivares, $t_b=4^{\circ}\text{C}$, inicio (31-03- 21), fin (18-07-21).	54
Cuadro 3.12 pruebas de shapiro de kc en cada tratamiento y repetición.	56
Cuadro 3.13 prueba de medias tukey – kc semanal.	56
Cuadro 3.14 kc promedios semanales y dms y cv.	57
Cuadro 3.15 prueba de medias tukey-kc global.	59
Cuadro 4.1 componentes y costos de módulo arduino	63
Cuadro 4.2 consumo hídrico por unidad experimental (mm).	65
Cuadro 4.3 temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ema montecillo	66
Cuadro 4.4 humedad relativa (%) ema montecillo	67
Cuadro 4.5 fechas de inicio de estados fenológicos	68
Cuadro 4.6 eto semanal y total (mm)	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 diferencias de girasol silvestre a girasol moderno, por nuseed (2019)	2
Figura 2.2 etapas del desarrollo fenológico del girasol (trapani et al., 2003)	7
Figura 3.1 distribución de las unidades experimentales en invernadero.	31
Figura 3.2 modulo arduino, para registro y almacenamiento de datos de temperatura y humedad relativa.	36
Figura 3.3 cápsulas porosas, caracterizadas en sortividad y porosidad.	37
Figura 3.4 curva de liberación de agua de sg.	38
Figura 3.5 curva de liberación de agua de sf.	39
Figura 3.6 contenido de humedad en sustratos por sonda fdr.	40
Figura 3.7 acumulación de consumo semanal (etc), en contraste con eto y eto(50%)	43
Figura 3.8 diferencia de medias de alturas (cm) de tratamientos: a =189.25, b = 189.25, c = 144 y d = 142, en etapa de floración.	45
Figura 3.9 comparación de medias de hojas verdaderas por tratamientos, a=36.5, b =37.75, c=30.25, d= 33.55.	47
Figura 3.10 tasa relativa de crecimiento de área foliar por semana	48
Figura 3.11 registro de humedad de sfgo	49
Figura 3.12 registro de humedad de sggo	50
Figura 3.13 registro de humedad de sfga	50
Figura 3.14 registro de humedad de sgga	51
Figura 3.15 histograma de temperatura y hr, durante el ciclo.	52
Figura 3.16 diferencia de gdd para emitir el siguiente par de hojas (vn).	55
Figura 3.17 kc de cada unidad experimental (ue).	57
Figura 3.18 kc global de cada tratamiento.	58

Figura 4.1 código de dispositivo arduino	65
Figura 4.2 código r de anova para consumo hídrico.	70

DEDICATORIA

A mis padres Ignacio y Virginia,

Mis hermanos Zaira e Isaac.

Las personas que creyeron en mí,

esos amigos y amigas especiales.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para la culminación de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por permitirme ser parte de su historia como alumno de posgrado y su gran ayuda a lo largo de tiempo cursado.

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez, al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña, al Dr. Abel Quevedo Nolasco por todo el conocimiento brindado, por la dedicación, por el apoyo, por el tiempo, por la revisión cuidadosa que han realizado de este documento, por sus valiosas sugerencias en momentos de duda y también por su amabilidad y dirección para que fuera posible la realización de esta investigación. Por su confianza, su paciencia, sus enseñanzas, sus aportaciones a este trabajo y por su tiempo.

DATOS BIOGRÁFICOS

FOTO

Datos personales

Nombre: Ignacio Fernando Vizcarra Hernández

Fecha de nacimiento: 25 de septiembre de 1993

Lugar de nacimiento: Cuautepec de Madero, Gustavo A. Madero, Ciudad de México.

CURP: VIH930925HDFZRG00

Profesión: Ingeniero en Agrícola

Cédula profesional: 11048285

Desarrollo Académico

Bachillerato: Preparatoria 3, Justo Sierra.

Licenciatura: Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional Autónoma de México, generación 2012-2017.

1 Introducción general

El cultivo de girasol en México la mayor parte de la producción es para fines ornamentales, sin embargo, su semilla representa una de las oleaginosas con mayor demanda internacional y SAGARPA (2017) estimó que para el 2030 se incrementara de 60Mt a 70 Mt el consumo nacional, teniendo una producción arriba de 10.72 Mt de la actual, por lo que existe una gran alternativa para el cultivo del girasol, en la rotación de cultivos. México uno de los centros de origen, además de adaptarse en diversos tipos de climas y suelos. Donde actualmente se satisface el 14.92% de los requerimientos nacionales con producción interna, con lo que se depende en gran medida de las importaciones del mismo.

El riego localizado pretende con los diversos sistemas existentes que el agua y los nutrientes estén disponibles en el suelo o sustrato en las condiciones óptimas para ser extraídos por las raíces de la planta, y en un nivel de humedad prácticamente constante, sin fluctuaciones que puedan afectar la producción final del cultivo, (Fernández & González, 2014). Con lo que el presente trabajo se empleó un sistema de riego localizado (emisores porosos) en las raíces, junto con una solución nutritiva empleada por Cisneros (2017).

El riego por succión, es un sistema de riego que sus orígenes vienen del riego por jarra establecido en medio Oriente y parte de África (Pal *et al.* 2020), que fue utilizado más en zonas áridas y semiáridas, teniendo como ventajas: *la irrigación cercana a cada mata, la ET es mínima, la filtración del agua en el suelo se hace mínima, es de los mejores métodos para los cultivos de horticultura, su uso por recipiente puede ser aproximadamente de seis años, necesita poco conocimiento técnico para su uso.* Con lo que el riego por succión como lo definen Martínez &

Del Río (2015), es una pared rígida, porosa y saturada de agua que transpira lentamente en régimen laminar (número de Reynolds bajo, $Re < 1$), humedeciendo de forma localizada el suelo próximo, sin necesidad de presión en la red o en la botella donde se encuentre inserto. El aporte de agua se produce conforme a la ley de Darcy (1856). Las capsulas porosas pueden ser de barro cocido o de materiales plásticos, las empleadas dentro del experimento son de arcilla porosa, cocidas a altas temperaturas.

La evapotranspiración (ET) es el proceso donde el agua pasa a través del suelo por la vegetación hasta la atmósfera; describiendo la relación del cultivo en función del clima, que pretende conocer el resultado de la interacción entre la vegetación y la atmósfera, donde existe un balance de energía entre los factores anteriores.

Dado que la precipitación que es parte de la evapotranspiración esta varía de región a región globalmente, y que comprende factores a evaluar como el microclima del sitio y la respuesta ecofisiológica de la vegetación.

La transpiración vegetal (ET), de acuerdo a la FAO (2014) a se puede alterar por diversos factores: condiciones ambientales (radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y la velocidad del viento); del cultivo (variedad, etapa del desarrollo, altura, rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y características radicales del cultivo); el manejo (labores, riego, fertilización) y suelo (manejo, salinidad, fertilidad, presencia de horizontes duros) y condiciones de sanidad (plagas, enfermedades) con lo que se afecta el control estomático y ocasiona una reducción en la fotosíntesis neta y la productividad del cultivo (Novak, 2012).

Los sistemas de riego son muy convenientes para manejar los recursos hídricos disponibles, sin embargo, cada uno de estos tiene sus alcances y limitaciones, con lo cual se plantea la evaluación de estos con respecto al cultivo de girasol en el Estado de México.

En relación del promedio gasto de las capsulas los reportados por López (2013), fueron para el caso de una carga de 50 cm de agua, el cual vario de 0.002216 L/h a 0.22161 L/h con una conductividad hidráulica de 0.0001 a 0.00662 cm/h, mientras que con una carga de 40 cm de agua, fue de 0.00111L/h a 0.3315 L/h con una conductividad hidráulica entre 0.0001 a 0.0127 cm/h. Los cuales son muy bajos en comparación con otros sistemas; por lo cual el aprovechamiento es más significativo y el depósito de agua es menor de igual manera que en comparación a otros sistemas.

El agua como tal es parte fundamental de la vida, el cual es decisivo para el funcionamiento de los ecosistemas existentes y así como en los procesos y recursos ambientales de los que pendemos para subsistir; con lo que es un factor importante a considerar en el desarrollo de un país.

En México se registran 1,489 mil millones de metros cúbicos en promedio al año en forma de precipitación, del cual, el 67% en el lapso de junio y septiembre, mayormente en la región sur-sureste, que comprende 49.6% de la precipitación. De recurso recibido el 73% se evapotranspira y vuelve a la atmósfera, el 22% transita en escurrimientos por ríos y arroyos y un 6% se infiltra en el suelo, recargando los acuíferos. De acuerdo a la FCEA (2017) en México se tiene 471.5 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable por año, y se considera un país con baja disponibilidad de agua. Existiendo zonas con difícil acceso a este recurso, y sobretodo para la actividad agrícola; valorando lo anterior, se buscan cultivos que se adapten a estas regiones en México

El consumo de agua en el girasol es uno de los factores más importantes para la producción de este (Moreno *et al.* 2012); las superficies sembradas han ido incrementado, sin embargo, la producción es fluctuante al no tener un paquete tecnológico adecuado para la zona productora en México. Por lo que se implementó el sistema de riego por succión (metodología que uso Herrera *et. al.*, 2018) con fertirriego en el cultivo de girasol (ornato y oleaginosa) en invernadero en dos sustratos. Donde se observó el comportamiento fenológico, como el

consumo de agua, con fertirriego, y otras variables agronómicas como: altura, índice de área foliar (IAF), grosor de tallo.

Objetivo general

- Analizar y evaluar el consumo del agua y K_c en el cultivo de Girasol (*Helianthus Annus*) en dos tipos de sustratos por el sistema de riego por succión, bajo condiciones de invernadero.

Objetivos particulares.

Determinar y analizar el uso del agua por etapa fenológica del cultivo de ambas variedades de Girasol, en los dos tipos de sustrato.

Determinar los coeficientes del cultivo (K_c) por etapas fenológicas y globales del cultivo del Girasol en los dos tipos de sustratos y ambas variedades.

Determinación de la curva de liberación de agua de los sustratos.

Caracterización física (S y P) de los emisores de riego.

Estimación de grados días de desarrollo (GDD) de los cultivares de girasol.

Hipótesis

Ho: El uso del riego localizado en el cultivo de girasol tiene un impacto significativo en la dosificación del agua y obteniendo una diferencia entre los K_c establecidos de cada etapa fenológica.

Ha: El uso del riego localizado en el cultivo de girasol no tiene relevancia en la dosificación del agua y los k_c obtenidos son similares a los establecidos de cada etapa fenológica.

1.1 Literatura citada

Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. (FCEA). (2017). [www.agua.org.mx](https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/#algunos-datos-sobre-el-agua). Consultada en <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/#algunos-datos-sobre-el-agua>

NUSEED. (2019). History of the sunflower. Nuseed Europe. Consultada en <https://nuseed.com/eu/history-of-the-sunflower/>

Fernández, S., M., González, L, G.. El sistema de riego localizado. Tecnología Agroalimentaria. Vol. 14, octubre de 2014. pp. 25-32.

Martínez, A., & Del Río, J. (2015). Microrriego de brinzales a través de recipientes poros enterrados: Fundamentos teóricos y práctico. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, pp: 47-58.

Novák, V. (2012). Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere system (primera ed.). Bratislava: Springer.

FAO. (2014). Evapotranspiración del cultivo (Primera ed.). Sin ciudad: FAO.

Moreno, O.; Cruz, I.; Herrera, H.; Turrent, A. 2012. Optimización de seis factores productivos para el girasol. Terra Latinoamericana, Vol. 30, N°1. Pp: 89-96

Cisneros, E. 2017. Espectroradiometría para detectar deficiencia de Nitrógeno en frijol. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados- Campus Montecillo.

SAGARPA. (2017, septiembre). Planeación agrícola Nacional-OLEAGINOSAS, 2017-2030. Consultada en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256431/B_sico-Oleaginosas-parte_una.pdf

Herrera, S., S. 2018. El riego en la horticultura ante el cambio climático (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

Pal, A.; Adhikary R.; Bera, M.,. Garanayak, R.; Kumar, S. 2020. Pitcher Irrigation Technology for Crop Cultivation in Arid Region. Bioscience Biotechnology Research Communications. Special Issue Vol. 13, N°12. Pp: 44-47.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Girasol

2.1.1 Origen del cultivo

Su origen como vincula Bye et al. (2009) es del sur de Estados Unidos de América (EUA) y norte de México. La domesticación de esta especie sigue en discusión; el girasol, resulta de la hibridación entre distintas poblaciones de *Helianthus annuus* L., perteneciente a la familia Asteraceae, en la zona de las grandes planicies de Norteamérica, que dio como tal “un cultivo nativo de Norteamérica”. Diferentes evidencias arqueológicas sobre la forma de la semilla del girasol (aquenio), que registran vestigios de la misma en lo que hoy es sur-centro y este de EUA, que datan de 1,200 a.C., además de también en San Andrés, Tabasco, otra semilla arqueológica de girasol fechada en el periodo Arcaico Tardío (2875-2575 a.C.), de acuerdo al INAH (2014), hace 4,800 años, con lo que parte de su domesticación fue México.

En Náhuatl de los aztecas, se le utilizó un vocablo ACAHUAL para nombrar al girasol y otras plantas similares. Con lo cual, sería el primer nombre registrado para el girasol. Otras evidencias indican que el girasol fue conocido por sus antiguos habitantes, probablemente traído desde el norte (ASAGIR, 2003).



Figura 2.1. Diferencias de girasol silvestre a girasol moderno, por NUSEED (2019)

Nota: Tomada y adecuada del sitio web NUSEED(2019)

Los usos que los indígenas tenían con el girasol, para su explotación y domesticación era alimenticia usando su semilla para comerla tostada y obtenían aceite para engrasarse el pelo, la cara y el cuerpo en general (Bye et al., 2009). Se presume que fueron ellos quienes domesticaron la especie, reservando semillas de mutantes que aparecieron espontáneamente, claramente diferenciadas por poseer un capítulo único.

Este cultivo se llevó a Europa, pero durante los siguientes 200 años, los europeos pasaron por alto el potencial alimentario y oleaginoso de los girasoles. En cambio, las flores de aspecto exótico se generalizaron en toda Europa occidental como ornamentales o, en menor grado, medicinales como antiinflamatorios.

El cultivo de girasol se desarrolló a lo largo de la década de 1700 y se había extendido por Europa a Rusia y Ucrania a principios del siglo XIX.

Es en Rusia donde se estableció el potencial de producción de aceite del cultivo. Pero ese desarrollo se debió en parte a una peculiaridad del destino y la Iglesia Ortodoxa Rusa, donde la cuaresma incentivó el consumo del mismo por olvidar de agregar este a la lista de comida prohibida por la iglesia (NUSEED, 2019).

Se tiene registro sobre la patente para la extracción de aceite de girasol, que fue otorgada a Arthur Bunyan, en Inglaterra, de acuerdo a ASAGIR (2003), con el N° 408 en 1716, para fines industriales en pintura y barnices.

En 1753 Linneo, utilizó por primera vez el nombre binomial *Helianthus annuus* y así como la mención del lugar de origen de este cultivo en Perú y México. Subsiguientemente, en una Real Expedición Científica a Nueva España de 1787 a 1803, Sessé y Mociño, documentaron a *Helianthus annuus*, su centro de origen en México y lo vincularon con registros del siglo XVI (Bye et al., 2009).

Este cultivo se utiliza como: a) fuente de alimento o extracción de aceite; generalmente, son de características monocefálicas (con un solo tallo y una cabezuela principal) y b) flor de ornato, que abarca también las plantas policefálicas (con varios capítulos), que consta de una flor apical dominante y pequeñas flores laterales en racimos cerca del ápice.

Las diversas características del género *Helianthus*, con las que se puede presentar, como anteriormente se mencionó, y se observa en la Figura 1., son monocefálicas y policefálicas, la diversidad de colores en sus flores que presentaban los primeros girasoles, así como también el color de sus tallos y reverso de las hojas, por la presencia de antocianos (NUSEED, 2019).

Bye et al. (2009), describe un síndrome de domesticación de los girasoles incluye (pero no se limita a) los cambios de una planta anual, como:

- a) Del policefalismo una ramificación difusa de muchos capítulos pequeños, que florecen asincrónicamente en las ramas laterales hasta un tallo grueso único con una cabezuela floral apical y dominante (monocefalismo).
- b) Tamaño de receptáculo compuesto menor a 5 cm de diámetro y normalmente con menos de 100 semillas, hasta un receptáculo compuesto mayor a 8 cm de diámetro y con más de 120 semillas (aquenios).
- c) De una delgada semilla con estructura de dos alas (papus) hasta una semilla grande y gruesa y sin alas (Figura 1.1).
- d) Hojas pequeñas dispersas en una ramificación difusa, hasta pocas hojas grandes insertadas a lo largo de un tallo único central.

Leclercq (citado por NUSEED, 2019) durante su trabajo en el Instituto Agrícola Francés (INRA), descubrió un método para desconectar la parte masculina de la flor en un proceso conocido como esterilización citoplasmática masculina. Esto significaba que el polen de un girasol donante podría insertarse en las estructuras reproductivas femeninas que aún funcionan, sin dilución del propio material genético de la planta. Un año después, en 1970, Kinmanun (citado por NUSEED, 2019) científico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos descubrió cómo volver a activar la fertilidad masculina en el híbrido resultante.

Los programas de mejoramiento podrían, por primera vez, crear verdaderos híbridos comerciales que explotaran rasgos combinados de diferentes plantas madre.

Los avances gemelos propiciaron una nueva era de desarrollo de rasgos. Las empresas de semillas podrían comercializar distintas variedades, con una mayor resistencia a las enfermedades y mayores rendimientos, junto con otras características diseñadas para los mercados de dulces o aceite, (NUSEED, 2019)

En los últimos 25 años, el mercado del girasol ha seguido creciendo, como su modificación hasta ahora como en la Figura 1.1. y ahora se ubica como el cuarto cultivo oleaginoso más importante del mundo, después de la palma, la soja y la colza (Idem).

2.1.2 Morfología girasol

El girasol pertenece a la familia de las Asteraceas, la mayor de las plantas vasculares. Pertenece al género *Helianthus*, el cual comprende aproximadamente 68 especies entre las que hay anuales y perennes. En Norteamérica existen cerca de 50 especies, de las cuales la más importante es *Helianthus annuus*, según Cronquist (1981); entre sus estructuras principales se encuentran la raíz, tallo, hojas, inflorescencia, mismos que a continuación se describen.

Raíz: Esta estructura es pivotante; formada por un eje principal dominante y abundantes raíces secundarias. Formando un sistema radical fuerte que es capaz de alcanzar 4 m de profundidad. La raíz principal crece en mayor medida que la parte aérea en el inicio de su desarrollo. De acuerdo a Ortegón et al. (1993) “En la fase de cuatro a cinco pares de hojas alcanza una profundidad de 50 a 70 cm, y para su crecimiento máximo se alcanza en la floración. La profundidad a la cual se desarrolla la red de raicillas depende de las condiciones climáticas: si hay sequía, llegan a la mayor profundidad; si hay humedad, se acercan a la superficie del suelo” (Ortegón et al., 1993, p. 15).

Tallo: El tallo es erecto, vigoroso y cilíndrico. Tiene el interior macizo. Ortegón et al. (1993), describen que “al llegar a la madurez, se inclina en la parte terminal a consecuencia del peso de la inflorescencia. La superficie exterior es rugosa, surcada y vellosa. La altura de las variedades aceiteras es entre 60 y 220 cm. El diámetro varía entre 2 y 6 cm, con mayor grosor en la parte inferior del tallo. En las variedades mejoradas los tallos no exhiben ramificación debido a que esta característica es nociva en los tipos de girasol para aceite” (Ortegón et al., 1993, p.16).

Hojas: “Son alternas, grandes, trinervadas, muy pecioladas, de formas variables, acuminadas, dentadas, con vellosidades, áspera en el haz y envés. La posición de las hojas en el tallo es la siguiente: en los primeros dos o tres pares son opuestas y los demás son alternas. El número de hojas por planta varía entre 12 y 40, según las condiciones del cultivo y las peculiaridades individuales de la variedad” (Ortegón *et al.*, 1993, p.17).

Según Ortegón et al. (1993) “en función de la fertilidad del suelo, la superficie foliar de una planta madura comprende de 3,000 a 6,000 cm², y el contenido de clorofila es de aproximadamente 16.5 mg 10 g⁻¹ de hojas frescas” (Ortegón *et al.*, 1993, p.20).

Inflorescencia: “La inflorescencia (llamada capítulo o cabezuela) está formada por un número de flores que fluctúa entre 500 y 1,500. Su borde se compone de brácteas protectoras que forman el involucre. El conjunto toma forma de un disco que constituye el receptáculo” (Ortegón *et al.*, 1993, p.18).

“El receptáculo es un disco plano, concavo o convexo, el cual tiene insertadas las flores en la cara superior y las brácteas en el borde. En plena floración es semicarnoso y succulento. En el receptáculo hay dos tipos de flores: liguladas y tubulosas.” (Ortegón *et al.*, 1993, p.19) “Las flores liguladas son estériles y se componen de un ovario rudimentario, un cáliz también rudimentario y una corola transformada, semejante a un pétalo; suman de 30 a 70; están dispuestas radialmente en una o dos filas; tienen una longitud de 6 a 10 cm y una anchura de 2 a 3 cm; son de color amarillo-dorado, amarillo-claro y amarillo-anaranjado. Las flores tubulosas son fértiles, pues llevan órganos de reproducción; cada una se compone de cáliz, corola, androceo y gineceo; están dispuestas en arcos espirales que parten del exterior hacia el centro de los discos” (Ortegón *et al.*, 1993, p.18).

2.1.3 Descripción fenológica del girasol

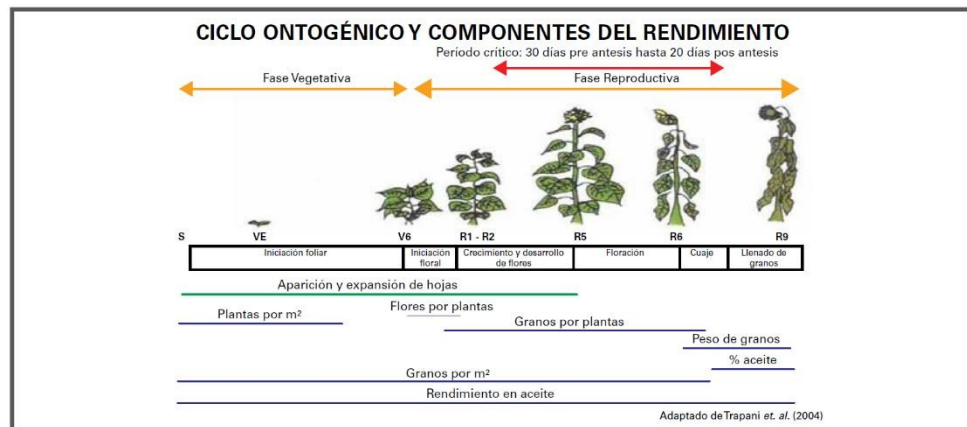


Figura 2.2 Etapas de desarrollo fenológico del girasol (Trapani et al., 2003)

Nota: Tomado de *Ciclo ontogénico dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en girasol*. Boletín técnico Pioneer. Trápani et. al., (2003), Argentina.

La escala fenológica empleada en el cultivo de girasol es la de Schneiter, A. & Miller J. (1981), donde indican que el tiempo entre etapas (Figura 2.2) y el tiempo total para el desarrollo de este cultivo dependerá de los antecedentes genéticos de la planta y del entorno de crecimiento.

0, comenzando con la germinación de la semilla

1, emergencia vegetativa (VE). La semilla emerge. Cotiledones son las primeras hojas no verdaderas producidas después de la emergencia.

2, estados vegetativos. V1, V2, V3, etc. El conteo del número de hojas verdaderas, las cuales al menos tienen 4 cm de longitud. También se cuenta las marcas donde hubo una hoja – incluso si se prevé el marchitamiento para el proceso de senescencia.

3, estados reproductivos. R1 La yema terminal forma una cabeza en miniatura en lugar de un racimo de flores. Cuando se ve directamente desde arriba, las brácteas inmaduras forman una apariencia de estrella de muchas puntas.

R2 El brote inmaduro se elonga de 0.5 a 2 cm por encima de la hoja más cercana unido al tallo. Se ignora las hojas adheridas directamente a la espalda de la yema.

R3 La yema inmadura se alarga más de 2 cm por encima de la hoja más cercana.

R4 La inflorescencia comienza a abrirse. Cuando se ve directamente desde arriba, se visualiza flores de rayas inmaduras.

R5 (Decimal) Esta etapa es el comienzo de la floración. El escenario se puede dividir en subetapas dependiendo del porcentaje del área de la cabeza (capítulo o disco de flores) que ha completado o está en floración.

R6 La floración está completa y las flores de rayo están marchitando

R7 La parte posterior de la cabeza ha comenzado a ponerse de color amarillo pálido.

R8 La parte posterior de la cabeza es amarilla pero las brácteas siguen siendo verdes.

R9 Las brácteas se vuelven amarillas y marrones. Esta etapa se considera como madurez fisiológica.

Otra escala empleada es la escala BBCH desarrollada por Weber et al. (2001) identifica las etapas de desarrollo fenológico del girasol, que se describen en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1 Escala BBCH para girasol.

Código	Descripción
Etapa de crecimiento principal 0: Germinación	
00	Semilla seca (aquenio)
01	Comienzo de la imbibición de la semilla
03	Completa imbibición de la semilla
05	Radícula emergió de la semilla
06	Radícula alargada, pelos radicales en desarrollo

07	El hipocótilo con cotiledones emergió de la semilla.
08	Hipocótilo con cotiledones creciendo hacia la superficie del suelo
09	Emergencia: los cotiledones emergen a través de la superficie del suelo
Etapa de crecimiento principal 1: desarrollo de la hoja	
10	Cotiledones completamente desplegados
12	2 hojas (primer par) desplegadas
14	4 hojas (segundo par) desplegadas
15	5 hojas desplegadas
16	6 hojas desplegadas
17	7 hojas desplegadas
18	8 hojas desplegadas
Etapa de crecimiento principal 3: elongación del tallo	
30	Inicio de la elongación del tallo
31	1 entrenudo visiblemente extendido
32	2 entrenudos visiblemente extendidos
33	3 entrenudos visiblemente extendidos
39	39 9 o más entrenudos visiblemente extendidos
Etapa de crecimiento principal 5: Emergencia de la inflorescencia	
51	Inflorescencia apenas visible entre las hojas más jóvenes
53	Inflorescencia que se separa de las hojas más jóvenes, brácteas que se distinguen de las hojas del follaje
55	Inflorescencia separada de la hoja del follaje más joven
57	Inflorescencia claramente separada de las hojas del follaje.
59	Flósculos de los radios visibles entre las brácteas; inflorescencia aún cerrada
Etapa de crecimiento principal 6: Floración	
61	Inicio de la floración: floretes radiales extendidos, floretes del capítulo visibles en el tercio externo de la inflorescencia
63	Floretes del capítulo en el tercio exterior de la inflorescencia en flor (estambres y estigmas visibles)
65	Plena floración: floretes del capítulo en el tercio medio de la inflorescencia en flor (estacas y estigmas visibles)
67	Disminución de la floración: floretes del capítulo en el tercio interno de la inflorescencia en flor (estacas y estigmas visibles)

69	Fin de la floración: la mayoría de las flores del capítulo han terminado de florecer, las flores del radio están secas o caídas.
Etapa de crecimiento principal 7: Desarrollo de la semilla	
71	Las semillas en el borde exterior de la inflorescencia son grises y han alcanzado el tamaño final.
73	Las semillas del tercio exterior de la inflorescencia son grises y han alcanzado el tamaño final.
75	Las semillas en el tercio medio de la inflorescencia son grises y han alcanzado el tamaño final.
79	Las semillas del tercio interior de la inflorescencia son grises y han alcanzado el tamaño final.
Etapa de crecimiento principal 8: Madurez	
80	Comienzo de la maduración: semillas en el tercio externo del antocarpio negras y duras. La parte posterior del antocarpio todavía verde.
81	Semillas en el tercio externo del antocarpio oscuro y duro. La parte posterior del antocarpio todavía verde
83	Oscuro de antocarpio verde amarillento, brácteas todavía verdes. Semillas alrededor del 50% de materia seca
85	Semillas en el tercio medio del antocarpio oscuro y duro. Dorso del antocarpio amarillo, brácteas con bordes marrones. Semillas alrededor del 60% de materia seca
87	Maduración fisiológica: dorso del antocarpio amarillo. Brácteas marmoladas de color marrón. Semillas alrededor del 75 al 80% de materia seca
89	Completamente maduras: semillas en el tercio interior del antocarpio oscuras y duras. Dorso de antocarpio marrón. Brácteas marrones. Semillas alrededor del 85% de materia seca
Etapa de crecimiento principal 9	
92	Semillas demasiado maduras con más del 90% de materia seca

Nota: Tomado de Growth stages of mono-and dicotyledonous plants, BBCH Monograph. (2001). Berlin, Alemania.

2.1.4 Kc

El Kc es un coeficiente que engloba la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, este mismo cambia a lo largo del ciclo del cultivo, esta variación expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del cultivo. Estos valores se encuentran tabulados en la FAO (2014), para diferentes cultivos, sin embargo, estos pueden variar acorde a las condiciones climáticas, como la frecuencia de humedecimiento.

2.1.5 Kc en Girasol

Se determinaron dentro de las condiciones climáticas y ambientales de Albacete (España), la ET del girasol medida en un lisímetro de pesada, sin ningún tipo de restricción hídrica y regada por aspersión, es de 627 mm. Los valores de Kc y Kcb máximos se obtuvieron en la etapa de floración, coincidiendo con la máxima fracción de suelo cubierta por vegetación. Los cuales fueron: Kcinicial: 0,38, Kc-medio: 1,13 y Kc-final: 0,20. Asimismo, se obtuvieron los valores del coeficiente de cultivo basal (Kcb): Kcb-inicial: 0,19, Kcb-medio: 1,09 y Kcb-final: 0,15. Los resultados obtenidos indican la necesidad de hacer un ajuste local de los coeficientes de cultivo del girasol, para realizar una programación de riegos más precisa (López, et al., 2011).

Lamm, et al., (2011); encontraron que las disminuciones en el rendimiento de girasol con riego deficitario son menos drásticas que con el maíz, por lo que los productores pueden considerar el girasol cuando el riego es marginal.

Para girasol y maíz dentro (2011) del estudio realizado por Lamm et al. (2011), con simulación de modelos con datos climáticos de 39 años, se comparó realizando simulaciones de programación de riego para cantidades de riego por aspersión de 1 pulgada con una eficiencia de aplicación del 95%, un evento de

humedecimiento cada 4 días. Donde, se obtuvo que el girasol fue más susceptible en el riego en el mes de agosto, mientras el maíz se tiene un déficit de riego que afecta en mayor medida a este cultivo durante el mes de julio. Con lo que en las estimaciones se observan que tienen similitudes en sus picos de ET e irrigación, pero el girasol requiere aproximadamente 2.3 pulgadas menos de riego y sus necesidades máximas comenzaron aproximadamente cuando las necesidades de maíz comienzan a disminuir. El promedio de riego de los girasoles sería de aproximadamente 12 pulgadas, pero a menudo los productores aplicarán entre 8 y 10 pulgadas de riego porque la disminución en el rendimiento es menos afectada por la lámina de riego dentro de este rango.

Se obtuvieron de cuatro diferentes regímenes de irrigación: 45 (testigo), 60, 75 y 90% del máximo agotamiento permisible del agua en el suelo.

Safahani, et al., (2014); obtuvieron resultados que mostraron que el déficit de agua, en comparación con el tratamiento de riego completo, aumentaba la actividad de todas las enzimas antioxidantes en las hojas. La variedad Master tuvo el mayor rendimiento de semillas en irrigación total y limitada, así como el mayor contenido de enzimas antioxidantes. Las plantas de girasol extrajeron la mayor parte de la humedad del suelo de 0 a 50 cm de capa de suelo.

Las láminas de riego son importantes a la hora de evaluar un sistema de riego en un cultivo que no ha sido estudiado en la zona. Por lo que las siguientes investigaciones muestran la importancia de la misma. Rizo y Meza, (2015) obtuvieron que las láminas de riego en tomate, mostraron que la lámina media 1.25 L planta día⁻¹ obtuvo los mejores resultados y mayor efecto respecto a las variables evaluadas el factor rendimiento mostro mayores resultados con esta lámina obteniendo una producción de 8 726.6 kg ha⁻¹, superando a las láminas 1.5 y 1.0 L planta día⁻¹ con rendimientos de 5 309.8 y 6 168.8 kg ha⁻¹, respectivamente.

La fenología del girasol está relacionada con el estrés hídrico como lo indica Bakht et al. (2010), quienes observaron que los días de maduración son

incrementados debido al incremento de las láminas de riego. También refiriéndose a otras investigaciones donde el riego completo y limitado aplicado en diferentes etapas de crecimiento aumentó significativamente el crecimiento vegetativo particularmente la altura de la planta de girasol. También hicieron énfasis en que todo el crecimiento y rendimiento de los componentes contribuyentes (en este caso son: la altura de la planta, días hasta la madurez, diámetro del capítulo, rendimiento de semillas y contenido de aceite) fueron afectados significativamente por las diferentes frecuencias de riego.

2.1.6 Uso del agua en Girasol

Moreno et al. (2012) también identificaron la optimización de 6 factores productivos para el girasol. Donde el calendario de riego óptimo fue una lámina de 15 cm en presembrado y 3 riegos de auxilio de 12 cm en intervalos de 40, 30 y 20 días con una lámina acumulada de 51 cm. Las interacciones entre genotipo, control de plagas y fertilizantes resultó significativa, sin embargo en este experimento se logró la economización debido que no aplicaron insecticidas y tampoco fertilizantes. Y la densidad de población más adecuada resultó ser de 85,000 plantas por ha.

De acuerdo a Lorenzo (2006), para un aprovechamiento óptimo del agua, se requiere que los niveles de nutrientes en el suelo sean los convenientes para el cultivo. El riego empleado por aspersión no excede el 70% de eficiencia; registró las necesidades totales brutas del girasol se encuentran entre 3000 y 6000 m³/ha, acorde a la pluviometría del año, fecha de siembra y capacidad de campo del suelo.

Mahmood et al. (2019), determinaron las etapas críticas o sensibles del girasol en las deficiencias de riego. En la etapa de floración y bajo la irrigación salteada, el factor de respuesta del cultivo fue mayor en los lugares donde se llevó el experimento, concluyendo que un genotipo (Barolo Ro) que trabajaron, tuvo el mayor rendimiento bajo riego deficitario. También, bajo riego salteado, la etapa de floración fue más efectiva en el aumento del rendimiento de semilla que las

etapas de vegetación y formación de aquenio en girasol. Sin embargo omitir el riego en la etapa de floración es donde afecta en mayor medida que en las otras etapas. Por lo tanto, se debe garantizar el agua en esta etapa para evitar un rendimiento bastante bajo o incluso la pérdida del cultivo.

Escalante, (2001), menciona que en las condiciones donde se establece un cultivo con humedad residual (la cual se obtuvo mayor respuesta de rendimiento en el año de mayor humedecimiento del suelo, antes del establecimiento del cultivo), que es aprovechable para el cultivo en este caso con girasol con dos variedades, una de ciclo corto y otra de ciclo largo; donde este último produjo mayor biomasa, sin embargo, su rendimiento fue mejor que la del ciclo corto. Otro factor fue la fertilización nitrogenada que acorto la duración de los ciclos en ambas variedades que trabajaron, como también su respuesta fue mayor en el año de mayor humedecimiento.

Indu, et al. (2017) realizaron un experimento donde comprueban que la fertirrigación por goteo mejora la productividad del girasol. Donde utilizaron 3 irrigaciones al (100, 80 y 60% del ETc) de igual forma con la fertilización recomendada fue de (100%, 80% y 60%) el cual era 60 kg de N y 30 kg P₂O₅ ha⁻¹, contra un tratamiento control. Con lo que encontraron que en el caso de la irrigación del 100% y 80% no hay diferencia significativa y son mayores en cuanto a la producción de semilla. Sin embargo, la productividad energética y la productividad de agua aparente fue mayor con el 80% de la ETc, produciendo 397 g de semilla más con cada metro cubico de irrigación. Mientras que en la fertilización la mayor significancia se encontró en el 100% y 80% de estos; y haciendo las combinaciones de estos con la irrigación al 80%, se encuentra un 33% de ahorro energético.

2.2 Sistema de riego localizado

Es una forma más eficiente en el manejo y conservación del agua, de acuerdo a Boswell (1990) utilizando tuberías a presión y diversos tipos de emisores, pero la cual consiste en suministrar el agua de modo que sólo moje una parte del suelo o bajo este, donde se encuentre el cultivo, y este va a desarrollar sus raíces. De tal manera este mismo se realiza en cantidades pequeñas y con alta frecuencia.

2.2.1 Riego por succión

El riego por succión tiene un referente pasado, del cual se le conocía como riego de jarrón, usado en regiones áridas. Como lo mencionan Siyal et. al (2009), se empleaban jarrones pequeños que usualmente por el costo a comparación de jarrones grandes. Este método fue originado al Norte de Africa e Iran, donde se menciona en libros de China de 2000 años de antigüedad. Donde los factores que incidían mayormente fueron la conductividad hidráulica del material de los jarrones, área de superficie del jarrón y el espesor de la pared. Teniendo en cuenta que su instalación se hacía en regiones áridas y semiáridas, estas debían colocarse en distancias una respecto a la otra, donde la zona de humedad no empalmara con la otra.

Livingston (1918) empleó parte de este método, pero con otras características más semejantes al riego por succión empleado actualmente, donde uso estos en experimentos con plantas para mantener una humedad constante en periodos amplios. Estos consistían en una o varias capsulas porosas cilíndricas, colocadas en una maceta bajo el nivel del sustrato, se llenaban con agua, y se conectaban a una fuente de abastecimiento, que se encontraba en un nivel inferior al autoirrigador. Conforme el suelo perdía el contenido de agua debido a la transpiración del cultivo o la evaporación, el diferencial de potencial hídrico existente entre el agua del suelo y el agua dentro de los poros de la pared de la capsula, movía esta última hacia el suelo. Controló las alturas de succión por medio de columna de agua o de mercurio. En este caso llenó 15 macetas con tres tipos diferentes de suelo, en cada maceta colocó un autoirrigador cónico,

donde cada una de las 5 macetas las colocó a una altura de succión de 2, 10 ,20, 30 y 40 cm Hg. Sembrando trigo dentro de estas macetas, llevando el desarrolló por seis semanas. Los resultados que obtuvo, mencionan que el contenido de humedad de un suelo está determinado por la altura de succión, y este contenido de humedad puede tener entre el valor máximo contenido capilar y el que corresponde al equilibrio con la altura de succión, con lo que los diversos suelos, existe un rango en su contenido de humedad que se puede establecer y mantener por el autoirrigador, donde la cantidad de agua entregada al suelo es mayor con una altura de succión menor y la velocidad de entrega de agua del irrigador al suelo que depende de la absorción de la planta.

Richards y Blood (1934) mencionaron dos métodos para mantener la humedad constante en el suelo dentro de invernaderos; el primero método de peso constante y tensión capilar constante; el último mencionado fue el más adecuado en su fin. Se mencionan que lo problemas presentados en los autoirrigadores, fue el controlar la humedad a través de la tensión capilar debido a la entrada de aire proveniente de la fuente de abastecimiento. Se propuso construir macetas para solucionar este problema de forma grupal o individualmente.

Diversas investigaciones se realizaron en torno a este sistema de riego en Cuba, en relación con cultivos hortícolas en invernaderos, presentados por Vargas *et. al* (2008), encontrando lo siguiente:

- La fabricación de cápsulas porosas es más accesible en la región central del país, y con propiedades hidrodinámicas favorables para su uso.
- Los diferentes materiales usados para la fabricación de cápsulas se caracterizaron y su costo es relativamente bajo.
- El método de fabricación empleado, se obtuvieron cápsulas con propiedades adecuadas para la irrigación localizada.

En México, la experimentación con este sistema fue llevados por Olguín (1975), donde reafirmo que la aplicación del agua fue más eficiente y su operación del

sistema es más sencilla, asimismo de no requerir una fuente externa de energía para su funcionamiento correcto; con lo que se tiene mayor rendimiento por unidad de volumen de agua utilizada.

Su funcionamiento como lo describen Martínez & Del Río (2015), se puede describir con la ecuación de Darcy; este consta de una fuente de abastecimiento debajo del emisor poroso, donde se genera un gradiente y la humedad se distribuye alrededor del emisor a aproximadamente 1 cm, al existir diferencias de energía entre el agua y el suelo que pierde humedad por el efecto de la evapotranspiración del cultivo, fuerzas matricas del suelo y las condiciones climáticas.

En 1977, García realizó una investigación con un cultivar de fresa y el sistema de riego por succión, probando su eficiencia en el uso del agua y su potencialidad de rendimiento. Los tratamientos que se utilizaron fue tres niveles de fertilización y dos densidades de planta (80,000 y 40,000 plantas/ha). Con un diseño de bloques completamente al azar, formado por 6 tratamientos y 4 repeticiones. Encontrando que la mayor densidad de plantación hubo mayor rendimiento y el sistema de riego empleado es capaz de abastecer la demanda de agua del cultivo de fresa, resultando 7.9 veces más eficiente que un riego superficial por m^3 de agua empleada.

Del Valle en 1977, describió una metodología para minimizar los gastos de fabricación de las cápsulas, disminuyendo su volumen y superficie, con lo que se logró aumentar el caudal y el diámetro de humedecimiento; así mismo obtuvo dos modelos matemáticos: el primero describe la distribución de humedecimiento del suelo y el segundo la velocidad de propagación de la humedad del suelo.

Seguido, Morales en 1978, realizó diversos experimentos en condiciones de invernadero con los cultivos: llevo trigo (*triticum aestivum*), tomate (*licopersicum sculentum*) y frijol (*phaseolus vulgaris*), de los que son considerados como tolerantes, semitolerante y susceptibles a la salinidad respectivamente. Con el objetivo de determinar la potencialidad de emplear agua salada para su

producción mediante el sistema de riego por succión. Se determinó la distribución de sales en la zona radicular con el sistema de riego por succión y su efecto en la tolerancia de cada cultivo, a su vez de determinar el efecto de altura de succión sobre la acumulación de las sales en la zona radicular y el desarrollo de las mismas. Obteniendo un del agua salada en la producción de los cultivos y mejorando su tolerancia al agua salada. En la distribución de sales se encontró una concentración de éstas similares a las que se encuentran con agua de riego.

Rendón (1979) experimento con este sistema de riego, registrando diversos problemas sobre este mismo: como el taponamiento de los emisores (cápsulas porosas), bajas uniformidades de humedecimiento y pequeñas conductividades hidráulicas; son las principales desventajas al usar este sistema.

En 1979 Coras, experimentó con tres formas geométricas de cápsulas porosas (cónica, cilíndrica y platillo), con lo que se obtuvieron diferentes conductividades hidráulicas. El mayor rendimiento de producción obtenido de estas, fue donde se emplearon las cápsulas cónicas.

En 1988 Tijerina utilizó el sistema de riego por succión en el cultivo de frijol con tres tratamientos de humedad en el suelo, controlando el área filtrante en función del número de cápsulas en operación y altura de succión. También estudiando el agua en el suelo y planta midiendo los potenciales correspondientes y la resistencia a la difusión en la hoja. Las mediciones se realizaron semanalmente a cada tratamiento: área foliar, profundidad radical, número de flores y ejotes. Con lo que se analizó para cada tratamiento la biomasa total producida y rendimiento de grano en función de la lámina consumida.

- Durante la operación del sistema observó que en dos tratamientos se disminuyó el potencial del agua en el suelo después de los 55 días de la siembra, probablemente al taponamiento de los poros de la cápsula, por los pelos absorbentes de las raíces y precipitación del fertilizante dentro de los poros.

- La resistencia a la difusión de la hoja durante la etapa de maduración aumentó y el potencial del agua en las mismas alcanzó un valor de -12 bar medido a medio día.
- El rendimiento de grano resultó ser muy superior al compararlo con los rendimientos obtenidos en sistemas tradicionales de riego.

Albanil (1991) determinó en el cultivo de fresa su evapotranspiración, eficiencia en el uso del agua y fertilización mediante el riego por succión. Comparando este sistema de riego con uno tradicional. Para estimar la evapotranspiración y el crecimiento del cultivo, se realizaron mediciones de área foliar y sistema radical. Utilizando ambos sistemas de riego se fertilizó, con lo que el desarrollo de raíces y producción de frutos por unidad de área fueron mejores en el sistema de riego por succión. La productividad del agua por unidad de rendimiento de fruto en los tratamientos regados por succión fue 4.5 veces mayor que los tratamientos irrigados en forma tradicional.

Perea (1993) desarrolló una metodología en el diseño, construcción y evaluación bajo condiciones de laboratorio, para el sistema de riego a baja presión con capsulas porosas para una parcela experimental. Encontrando resultados aceptables para la metodología de construcción de las cápsulas porosas, dado que los coeficientes de variación de las dimensiones de las cápsulas porosas fueron bajos. Para la determinación de la conductividad hidráulica, utilizó el método del permeámetro de carga constante, con lo que obtuvo menor variación en contraste del método morfológico, este último, recomendado para análisis de suelos y materiales porosos como un método de referencia. Los coeficientes de uniformidad de la línea regante fueron de 47.74%, debido a la baja presión del sistema, con lo que se estrangulo parte de la manguera alimentadora. Donde el terreno utilizado contaba con fuertes pendientes. El costo total estimado para una hectárea de riego fue de \$1378. U.S.D.

Cisneros (2017), empleo el sistema de riego por succión en el cultivo de frijol, donde utilizo diferentes concentraciones de solución nutritiva en el nitrógeno, evaluando la respuesta de reflectancia del cultivo, con lo que la presión osmótica de la misma se mantuvo en 0.72 atm y con lo cual no afecto la operación del sistema de riego por succión.

Herrera (2018), empleo este sistema en plantas de ornato y con lo que llegó a una conclusión similar a la de Pacheco et al. (2016), que emplearon capsulas porosas para cuantificación hídrica de noche buenas, con agua residual. Con lo que mencionaron que son similares a microlisímetros de menor costo y fácil de emplear.

Trinidad en 2019, realizó un experimento para la extracción de sales, mediante las capsulas porosas, siendo factible este procedimiento en lugares con altas temperaturas y baja humedad relativa. Indicando que existió gran correlación mayor del 60% entre la conductividad hidráulica y sortividad.

Velazquez (2020) usó las capsulas porosas para el cultivo de la pitahaya, favoreciendo la producción de materia seca, junto con el sombreado al 25% sobre el cultivo.

2.2.2 Sortividad

La sortividad es un parámetro simple, que representa “la influencia que la succión mátrica y la conductividad que ejercen sobre el flujo de agua transitorio, describiendo la función descendente de la infiltrabilidad con relación a los cambios en el contenido de humedad de los suelos o succión” (p. 8), de acuerdo a Philip, (1969, citado por Cabria & Culot, 1999)

2.2.3 Características físicas de capsulas porosas

López (2013), evaluó las capsulas porosas, encontrando que las conductividades hidráulicas y gasto, no son iguales cuando son sometidas a diferentes cargas de columna de agua. Conociendo la conductividad hidráulica de cada cápsula, se puede hacer un correcto diseño del sistema.

2.3 Sustratos

Un sustrato de acuerdo a Burés (1998) “es cualquier medio que se emplea para cultivar en contenedores, entendiendo por contenedor cualquier recipiente que tenga una altura limitada y que su base se halle a presión atmosférica” (Burés, 1998, p.19). Abad et al. (2004), describe los sustratos que son “todo material sólido distinto del suelo in situ, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta y que este puede intervenir o no en la nutrición vegetal.” (Abad *et al.*, 2004, p. 114). Para Cruz et al., (2012) lo definen “el sustrato para un cultivo de plantas es todo material que puede proporcionar anclaje, oxígeno y agua suficiente para el óptimo desarrollo de las mismas, o en su caso nutrimentos, requerimientos que pueden cubrirse con un solo material o en combinación con otros, los cuales estarán en un contenedor. Las propiedades se pueden agrupar en físicas y químicas” (Cruz et al., 2012, p.18).

2.3.1 Características físicas de sustratos.

Las propiedades físicas que se determinan son el espacio poroso total, capacidad de aireación, capacidad de retención de agua, densidad aparente y densidad real.

Espacio poroso total: Es el total de espacio que no está ocupado por el material sólido que se agrega en la maceta o contenedor y que puede estar ocupado por agua y aire, denominado también como capacidad de retención de agua y capacidad de aire, respectivamente. El espacio poroso total debe ser mayor a 85 % (Cruz, et al, 2012).

Capacidad de aire o porosidad de aire: Se refiere a la proporción de aire en el medio de crecimiento o sustrato, su importancia radica en los diversos requerimientos para cada especie a cultivar o necesidades de aireación. Hasta el momento no existe consenso entre los autores de cuál es el valor óptimo debido al argumento anterior; algunos autores aceptan que este debe estar

comprendido entre 10 y 35 % para sustratos en maceta, mientras que otros señalan que debe situarse entre 20 y 30 %. Otro valor de referencia es el porcentaje de aire que queda al aplicar al sustrato 10 cm de tensión columna de agua (Burés, 1998). Esta variable depende del tamaño de partícula utilizada en el medio de crecimiento, así como de la forma, naturaleza de los materiales y altura del contenedor (Cruz et al., 2012).

Capacidad de retención del agua: Es una propiedad importante a evaluar en los sustratos a utilizar y se refiere a la cantidad de agua retenida por el sustrato, y corresponde a la cantidad de agua en el sustrato después de haber drenado, después de que fue agregada al contenedor o maceta. Esta variable depende del tamaño de partícula utilizada en el medio de crecimiento, así como de la naturaleza de los materiales empleados. En bajas tensiones se encuentra el agua retenida por el sustrato en tensiones de 0-100 cm columna de agua; dentro de la cual se dividen el agua fácilmente disponible (AFD) comprendida entre 10 – 50 cm de tensión, el agua de reserva (AR) de 50 -100 cm de tensión y el agua difícilmente disponible (ADD) en tensiones >100 cm.

Ansorena (1994) (citado por Cruz et al., 2012) señala que “tamaño de partícula menor a 0.5 mm, presenta la máxima influencia en la porosidad de aire y en la retención de agua, dado que la disminuye e incrementa, respectivamente” (Cruz et al., 2012, p. 21). Con lo que el aumento de la porosidad total aumenta con partículas mayores a 0.5 mm y disminuye la retención de humedad.

Densidad aparente: “Se define como la masa seca contenida en un centímetro cúbico de medio de cultivo, depende del grado de compactación y del tamaño de partícula” (Cruz et al., 2012, p.21). Con lo que se puede hacer una evaluación de volúmenes y costos de los materiales a emplear.

Densidad real: “Se define como el cociente entre la masa de las partículas del medio de cultivo y el volumen que ocupan, sin considerar los poros y huecos, no depende del grado de compactación, ni del tamaño de partícula” (Cruz et al., 2012, p.21).

2.3.2 Características químicas de sustratos.

Burés (1998) divide la parte química de los sustratos entre los sustratos inertes y sustratos activos químicamente o no inertes. Los primeros no tienen descomposición bioquímica, no liberan elementos de forma notable (baja concentración) y no hay transferencia entre sólido y solución. Mientras por los no inertes se caracterizan por liberar elementos ya sea por su degradación, disolución o reacción de compuestos, estos también pueden absorber elementos de su superficie que pueden intercambiar en la fase líquida presente.

Con lo cual, a las propiedades químicas, los sustratos orgánicos son los que contribuyen en mayor grado a estas propiedades. La capacidad de intercambio catiónico (CIC), disponibilidad de nutrientes, salinidad y la relación C/N son las más importantes.

Una propiedad biológica la cual depende de la M.O., de acuerdo a Burés (1998), el porcentaje de contenido de M.O. es de 5-19%. En la cual podremos encontrar una característica de supresividad ante hongos endógenos en las semillas o del mismo sustrato del porcentaje de M.O., también existirá una actividad reguladora del crecimiento del cultivo relacionado con la actividad hormonal. Otra característica es la actividad enzimática la cual se vincula con la disponibilidad de elementos nutritivos. La adición o que en la misma M.O. se encuentren micorrizas tendrá un favorecimiento en la absorción de algunos elementos nutritivos como en la absorción de agua.

2.4 Literatura citada

Abad B., M., P. Noguera M., y C. B. Carrión. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In: Urrestarazu, M. G. (ed). Tratado de Cultivo sin Suelo. Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 113-158

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

Ansorena MJ. (1994). Sustratos. Propiedades y caracterización. Madrid: Mundi-Prensa. 171.

- Asociación Argentina de Girasol (ASAGIR). (2003). 2do. Congreso Argentino de Girasol. Consultada en: <http://www.asagir.org.ar/acerca-de-2do-congreso-484>
- Bakht, J., Shafi, M., Yousaf, M., Raziuddin, & Aman, M. (2010). Effect of irrigation on physiology and yield of sunflower hybrids. *Pak. J. Bot*, 1317-1326.
- Boswell, M. (1990). Manual de diseño y manejo de sistemas de micro-irrigación. España: Litografía A. Romero.
- Burés, S. (1998). Introducción a los sustratos. Aspectos generales. In: Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal. J. Narciso Pastor S. (ed). Universidad de Lleida. pp: 19-31
- Bye, R., Linares, E., Lentz, D.L. (2009). México: centro de origen de la domesticación del girasol. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. N° 12. pp:5-12.
- Cabria, F.N & Culot, J. (1999). Sortividad y conductividad hidráulica saturada de Udoles del sudeste bonaerense, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 17 (1), pp: 8-19.
- Cisneros, E. (2017). Espectroradiometría para detectar deficiencia de nitrógeno en frijol. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Coras, P.M. (1979). Efecto de riego por succión con tres formas de cápsulas porosas sobre rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa L.*). Tesis de Maestría, Chapingo, México.
- Cronquist, A. (1981). An integrated system of classification of flowering plants. New York
- Cruz, E., Can, A., Sandoval, M., Bugarín, R., Robles, A., Juárez, P. (2012). Sustratos en la horticultura. *Biociencias*. pp: 17-26.
- Del Valle, H. (1977). Experimento preliminar en invernadero con riego por succión para el diseño de cápsulas porosas. *Nueva Epoca*, Chapingo, México, (7-8): 39-53.
- Escalante, J. (2001). Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en girasol de humedad residual. *Terra Latinoamericana*, pp: 19-27.
- García, C.A. (1977). Efecto del riego por succión sobre la potencialidad de rendimiento de la fresa y eficiencia en el uso del agua. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Herrera, S.S. (2018). El riego en la horticultura ante el cambio climático. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Indu S., Buttar, G.S., Brar, A.S. (2017). Drip irrigation and fertigation improve economics, water and energy productivity of spring sunflower (*Helianthus annuus L.*) in Indian Punjab. *Agricultural Water Management*. Volume 185, pp 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.02.008>
- Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). (2014). El girasol también fue domesticado en México. Consultada en

<https://www.inah.gob.mx/boletines/902-el-girasol-tambien-fue-domesticado-en-mexico>

Lamm, F., Aiken, R., & Aboukheira, A. (2011). Irrigation research with sunflowers in. 23rd Annual Central Plains Irrigation Conference, 23(760), 169-180.

Livingston, B. E. (1918). Porous clay cones for the auto-irrigation of potted plants. *Plant World*. 21: 202-208.

López, I. (2013). Evaluación hidráulica de capsulas porosas para riego. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

López, R., Martínez, L., Montoro, A., & López, P. (2011). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo del girasol en condiciones semiáridas. Córdoba: XXIX Congreso Nacional de Riegos.

Lorenzo, M. (2006). Trabajo del riego en el girasol. Valladolid: Universidad de Valladolid.

Mahmood, H., Towfiq, S., & Rashid, K. (2019). The sensitivity of different growth stages of sunflower (*helianthus annuus* L.) Under deficit irrigation. *Applied Ecology and Environmental Research*, pp: 7605-7623.

Martínez, A., & Del Río, J. (2015). Microrriego de brinzales a través de recipientes poros enterrados: Fundamentos teóricos y práctico. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, pp: 47-58.

Morales, V. (1978). Uso de aguas saladas para riego de cultivos por succión. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

Moreno, O., Cruz, I., Herrera, H., & Turrent, A. (2012). Optimización de seis factores productivos para el girasol. *Terra Latinoamericana*, pp: 89-96.

NUSEED. (2019). History of the sunflower. Nuseed Europe. Recuperado el 9 de agosto de 2020: <https://nuseed.com/eu/history-of-the-sunflower/>

Olguín, C. (1975). Riego por succión. Descripción del método y avances en la investigación. Memorias del 1er Seminario Nacional sobre Riego por Goteo, Hermosillo, Sonora. Tomo II. Pp 165-181.

Ortegón, M.A.S., Escobedo, M.A., Loera, G.J., Díaz, F.A., Rosales, R.E. (1993). El girasol. Edit. TRILLAS. México, D.F. 15-20 p.

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

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

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

- Rizo, E.J., & Meza, J.A. (2017) Evaluación de tres láminas de riego y tres distancias de siembra en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) Cv. Butero, UNA, Managua, 2015. Ingeniería tesis, Universidad Nacional Agraria
- Safahani, A., Kamkar, B., Teixeira, J., & Ataei, M. (2014). Response of sunflower cultivars to deficit irrigation. *Helia*, 37(60), -.
- Schneiter, A.A., and J.F. Miller. (1981). Description of Sunflower Growth Stages. *Crop Sci.* 21:901-903
- Siyal, A., Van Genuchten, M., Skaggs, Todd. (2009). Performance of Pitcher Irrigation System. *Soil Science*. 174 (6), pp: 312-320.
- Tijerina, L. (1988). Cultivo de frijol irrigado por el método de riego por succión. *Revista Terra*. Volumen 6, número 2. Pp 117-130.
- Trápani N., López, M., Sadras, V., Hall, A. (2003). Ciclo ontogénico dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en girasol. En producción de granos: Bases funcionales para su manejo. Ed. Facultad de Agronomía, UBA, Argentina.
- Trinidad, J.A. (2019). Extracción de sales solubles de suelos por medio de cápsulas porosas. Tesis maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Vargas R. P., Peña, C. M., Gonzáles, A. J., Hernández, C.G. (2008). Obtención de cápsulas porosas para el beneficio de cultivos protegidos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Vol. 17, núm. 3, pp 14-17.
- Velázquez, Y. (2020). Uso del agua en Pitahaya (*Hylocereus undatus*), bajo diferentes condiciones de humedad, sombra y tamaño de esqueje. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- Weber, F.E., Bleiholder, H., Feller, C., Hess, M., Wicke, H., Mejer, U., Van Den Boom, T., Lancashire, P.H., Buhr, F.L., Hack, H., Klose, F.R., Stauss, R. (2001). *Growth stages of mono-and dicotyledonous plants, BBCH Monograph*. Berlin, Alemania. Federal Biological Research center for agriculture and forestry.

3 CONSUMO DE AGUA DE DOS VARIEDADES DE HELIANTHUS ANNUS BAJO RIEGO POR SUCCIÓN EN INVERNADERO, TEXCOCO, MÉXICO. Vizcarra, Arteaga, Vázquez & Quevedo

3.1 Resumen

Arteaga RAMIREZ Ramón~ Mario Alberto Vázquez-Peña
Universidad Autónoma Chapingo, México.
Abel Nolasco Quevedo
Colegio de Postgraduados, México

El cultivo del girasol es una de las oleaginosas con más demandas a nivel internacional ocupando el tercer lugar; en México su producción es mayoritariamente para flor de ornato, sin embargo, representa una gran alternativa al ser México parte de su centro de origen. El consumo de agua en el girasol, es uno de los factores más importantes en su producción; se realizó un estudio en un invernadero del Colegio de Postgraduados y se utilizó un diseño completamente al azar con diseño factorial de dos variedades de girasol (ornato y SYN 3950 HO), con dos sustratos en función del tamaño de partícula. Siendo los tratamientos: SFGO, sustrato fino (SF) y girasol Ornamental; SGGO, sustrato grueso (SG) y girasol Ornamental; SFGA, SF y girasol SYN3950HO y; SGGA, SG y girasol SYN3950HO. La unidad experimental fue una bolsa de plástico (como maceta) con su sistema de fertirriego (cápsula porosa y fuente de agua) a succión con una negativa de -10 cm. Se investigó el consumo de agua, los coeficientes del cultivo (Kc) por estado fenológico, para cada tratamiento. Se utilizó una solución nutritiva a través del mismo sistema de riego. Se monitoreó y registro la temperatura y humedad relativa por medio de un sistema de adquisición de datos con Arduino. Los sustratos resultaron similares en términos de retención de humedad, sin embargo, el SF contiene más materia Orgánica. Se obtuvieron consumos hídricos estadísticamente similares, hasta R6. Las variables agronómicas de altura, diámetro del tallo, área foliar y número de hojas se mostraron significativamente mayor en SFGO y SGGO. Los Kc obtenidos tuvieron significancia entre tratamientos, por la temperatura superior a la tolerada por el cultivo.

Palabras clave: Girasol, consumo hídrico, cápsula porosa, Kc.

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Ignacio Fernando Vizcarra Hernández

Director de Tesis: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

USE OF WATER AND KC ON TWO VARIETIES OF SUNFLOWER UNDER SUCTION SYSTEM ON TWO SUBSTRATES, TEXCOCO, MÉXICO. Vizcarra, Arteaga, Vázquez & Quevedo

3.2 Abstract

Arteaga RAMIREZ Ramón~ Mario Alberto Vázquez-Peña
Universidad Autónoma Chapingo, México.
Abel Nolasco Quevedo
Colegio de Postgraduados, México

The crop of sunflower is one of the most demanded oleaginous plants which occupies the third place at international level; in Mexico its production is mainly as ornament flower, nevertheless, it represents a great alternative as Mexico is part of its center of origin. The consumption of water on sunflower is one of the most important factors for its production. A study in a greenhouse at the Postgraduate College was made, and a completely randomized design with factorial design of two varieties of sunflower (ornament and SYN 3950 HO), with two substrates in function of particle size, being the treatments: SFGO, fine substrate (SF) and ornament sunflower, SGGO, depth substrate (SG) and ornament sunflower, SFGA, SF and SYN 3950HO sunflower and SGGA, SG and SYN 3950HO sunflower was used. The experimental unit was a plastic bag (as pot) with a fertirrigation system (porous capsule and water source) with negative suction of -10 cm. It was investigated the consumption of water, the crop coefficients (Kc) per phenological state, per every treatment. A nutrient solution through an irrigation system was used. It was observed and registered the temperature and relative humidity, through a system of information acquisition card in Arduino. The substrates were similar in terms of moisture retention, nevertheless, the SF have more content of organic matter. The hydric consumption obtained, were similar, until R6. The agronomic variables of height, stem diameter, leaf area and number of leaves were higher in treatments SFGO and SGGO. The Kc obtained, were different statistics between treatments, related with the temperature higher than the crop tolerate.

Key words: Sunflower, hydric consumption, porous capsule, Kc.

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autonoma Chapingo.

Author: Ignacio Fernando Vizcarra Hernández

Advisor: Dr. Ramón Arteaga Ramírez

3.3 Introducción

La evapotranspiración (ET) es el proceso donde el agua pasa del suelo a la vegetación hasta la atmósfera; siendo esta uno de los mayores parámetros en el ciclo hidrológico. También como parte de este ciclo la precipitación es perdida en forma de evaporación y evapotranspiración con lo que varía de región a región globalmente. Para pretender conocer la relación entre la vegetación y la atmósfera se realiza un balance de energía; en esta interacción, la evapotranspiración del agroecosistema, comprende factores a evaluar como el microclima del sitio y la respuesta ecofisiológica de la vegetación. Con lo que el presente trabajo pretende cuantificar el consumo de agua de dos variedades del cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) con dos tamaños de granulometría en los sustratos empleados, mediante lisímetros succión (Pacheco, et al. 2016).

El cultivo de girasol en México la mayor parte de la producción es para fines ornamentales, sin embargo su semilla representa una de las oleaginosas con mayor demanda internacional y como lo plantearon SAGARPA (2017) se estimó que para el 2030 se incrementara de 60Mt a 70 Mt para consumo nacional, teniendo una producción de 10.72 Mt, con lo que existe una gran alternativa para la rotación de cultivos en cuanto a la producción de girasol al ser México uno de los centros de origen y se desarrolla en cualquier tipo de clima y suelos, actualmente se satisface el 14.92% de los requerimientos nacionales con producción interna, con lo que se depende en gran medida de las importaciones del mismo.

El riego por succión como lo definen Martínez & Del Río (2015), es una pared rígida, porosa y saturada de agua que transpira lentamente en régimen laminar (número de Reynolds bajo, $Re < 1$), humedeciendo de forma localizada el suelo próximo, sin necesidad de presión en la red o en la botella donde se encuentre inserto. Con base a la relación realizada por Pacheco et al. (2016) para el uso las cápsulas porosas, como microlisímetros de succión para la cuantificación del consumo de agua y teniendo en cuenta que la presión osmótica sea estable se utilizó la solución nutritiva como indica Herrera (2018).

Por medio del mismo sistema se puede calcular el Kc del cultivo, como lo indica Herrera (2018), ya que las capsulas calibradas, con sus conductividades hidráulicas conocidas, resulta muy útil y preciso para cuantificar el consumo hídrico en plantas de ornato, con flor de corte o plantas de maceta, con moderado a bajo consumo de agua y bajo condiciones de invernadero. El objetivo fue cuantificar el consumo de agua de dos variedades del cultivo de girasol (*Helianthus annuus*) con dos tamaños de granulometría en los sustratos empleados, mediante lisímetros succión, en un invernadero del Colegio de Postgraduados.

3.4 Materiales y Métodos

3.4.1 Ubicación del experimento.

Se realizó en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (19° 28' 4.26" latitud norte, 98° 53' 42.18" longitud oeste y una altitud de 2250 m) Texcoco, Estado de México, en condiciones de invernadero.

Las condiciones climáticas de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (1981) son C (w o) (w) b(i')g que corresponde a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal menor que el 5% de la total, con verano fresco largo con una oscilación térmica entre 5 y 7 °C, la marcha anual de temperatura es del tipo Ganges. La temperatura promedio durante el ciclo del cultivo de 109 días fue de 22.43 °C y la mínima de 12° C dentro del invernadero, con una humedad relativa promedio de 65.01%.

3.4.2 Diseño experimental

Fue completamente al azar, un arreglo factorial, donde se utilizaron dos especies de girasol, el primero girasol ornamental (GO) de ciclo medio; y la variedad SYN 3950 HO (GA) que es de ciclo medio. En dos sustratos (dos tamaños de partícula): fino (SF) y grueso (SG), con cuatro combinaciones: SFGO, Sustrato Fino y Girasol Ornamental (GO); SGGO, sustrato grueso y GO; SFGA, Sustrato Fino y Girasol SYN 3950 HO (GA) y SGGA sustrato Grueso y GA; con cuatro

repeticiones. Con 16 unidades experimentales que se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar (Borges et al., 2019) ver Figura 3.1.

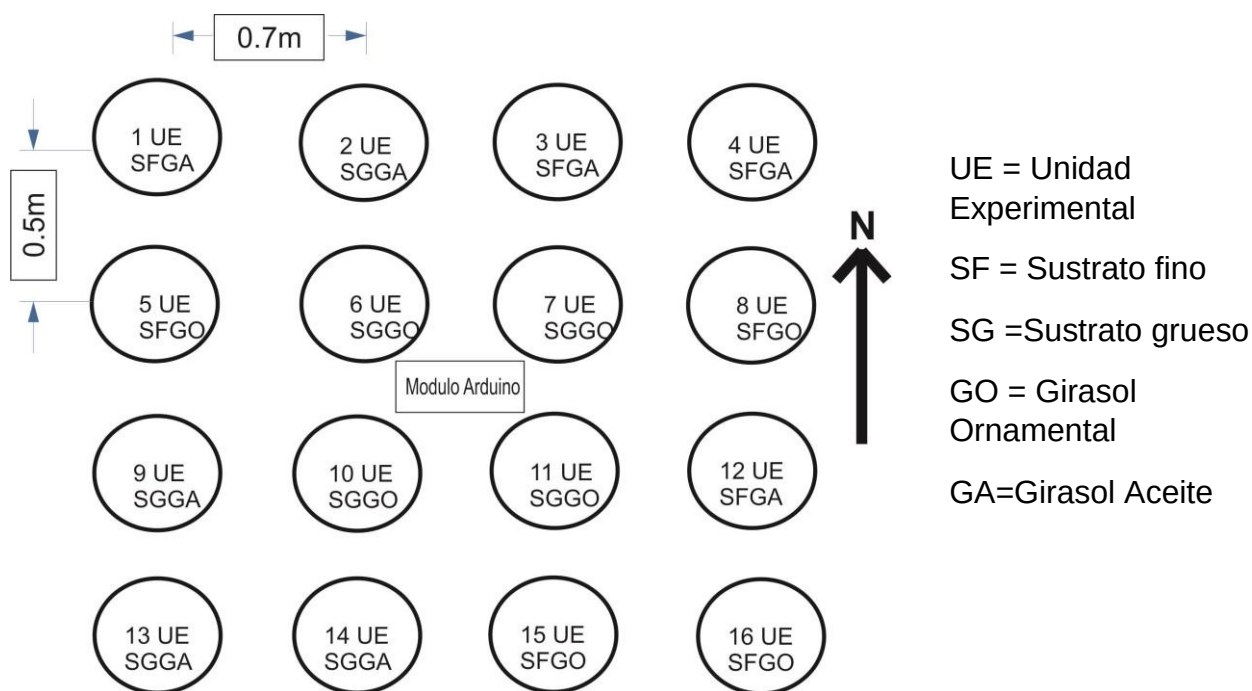


Figura 3.1 Distribución de las unidades experimentales en Invernadero.
 Nota: Elaboración propia.

La unidad experimental (U.E.) es una planta de girasol de alguna de las dos variedades empleadas, con una bolsa de vivero = maceta de polietileno ((altura de 44.8 cm, ancho de 29.5 cm, con una capacidad de 30 L) y con un sistema de riego con cápsula porosa a succión. Se realizó una comparación de medias con Tukey, haciendo uso del software R, tanto para variables agronómicas como para las de consumo de agua.

3.4.3 Solución nutritiva

Los fertilizantes que se usaron fueron los siguientes con sus proporciones de acuerdo a Cisneros (2017). Nitrato de potasio 9.9 g, Nitrato de calcio 9.4 g, Fosfato monopotásico 1.9 g, Sulfato de Potasio 3.2 g y Sulfato de magnesio 9.3

g disueltos en 20 L de agua aciculada; la solución nutritiva se aplicó de manera de Fertiirrigación.

Se aplicó la solución nutritiva al recuperar el agua, que se consumió el día previo para cada unidad experimental. El agua aciculada que se empleó, se mantuvo con un pH entre 5.5 y 6 mediante la adición de H₂SO₄ 1N, que permitió mantener el pH de la solución nutritiva entre 5.5 y 6.5.

3.4.4 Variables que se midieron y estimaron.

Se midió el consumo de agua en las unidades experimentales con el sistema de riego por succión. Y contrastó la respuesta de las variedades del cultivo con las mediciones de las variables agronómicas y ambientales dentro del estudio, que son las siguientes:

- Altura de la planta (cm) medida desde la base hasta parte superior de cada planta.
- Diámetro del tallo (cm) medido en la parte basal.
- Número de hojas verdaderas
- Área foliar, método no destructivo descrito por Maldener *et al.* (2009)
- Filocrono (intervalos de tiempo entre las apariciones de las hojas sucesivas).
- Humedad en sustratos (%), se registró cada semana.
- Temperatura del ambiente(°C), se registró cada hora.
- Humedad relativa (%), se registró cada hora.

3.4.5 Caracterización de las cápsulas

Por medio de la sortividad se caracterizaron las cápsulas a partir de la ecuación 3.1, que empleo Trinidad (2019). La cual se deduce del flujo de agua, que parte de una superficie circular con un potencial hídrico h_0 , en un sustrato que está inicialmente a un potencial h_n , puede ser determinado inicialmente de la siguiente Ecuación (1):

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{Q(t)}{\pi r_d^2} \right] = \frac{1}{2} S t^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (3.1)$$

Donde: Q(t), caudal a partir del disco (mm³ s⁻¹), t, tiempo (s), r_d, radio del disco (mm) y S: sortividad que presenta el suelo al potencial hídrico del disco (mm s^{1/2}).

Se utilizaron cápsulas con un diámetro de alrededor de 10 cm, de diferentes lotes de fabricación, con lo cual se definió utilizar capsulas con un estándar de sortividad de 0.6 a 0.7 mm s^{-1/2}, empleando la metodología descrita por Trinidad (2019)

3.4.6 Caracterización de sustratos

Se utilizaron dos tipos de sustratos en función del espacio poroso, y similares a los empleados por Herrera (2018). Con lo que se utilizó el método descrito por Ansorena (1994) para obtener la densidad real y la densidad aparente.

Para la porosidad total se calcula con base en la densidad real y la densidad aparente, con la siguiente Ecuación (3.2) comúnmente utilizada para suelos.

$$PT(\%) = 1 - \left(\frac{da}{dr} \right) \cdot 100 \dots \dots \dots (3.2)$$

La curva de liberación de agua se realizó con el procedimiento de Bood *et al.* (1974), así como la retención de humedad y aireación, utilizando el método descrito por Quintero *et. al.* (2011).

Para el monitoreo del contenido de humedad de los sustratos, se verificó de dos formas: el primero fue con el método gravimétrico tomando 200 ml de cada UE, y secada a 120°C hasta obtener un peso constante, y el segundo se realizó con la calibración del sensor FDR que se calibro previamente para cada sustrato al utilizar el método descrito por Kizito *et. al.* (2008).

3.4.7 Determinación de área foliar (AF) y tasa relativa de crecimiento (TRC AF)

Se empleó la Ecuación (3.3), utilizada por Maldener *et al.* (2009), que mide las hojas desde la unión del peciolo hasta el ápice, en un método no destructivo.

$$Af = \sum_{L=1}^N 0.1328 * L^{2.5569} \dots \dots \dots (3.3)$$

Donde: Af, área foliar (cm²), L, longitud de la hoja (cm).

Con los datos de área foliar por tratamientos medido cada semana, se hizo la estimación de la tasa de crecimiento foliar donde se empleó la Ecuación (3.4), descrita por Santos et al., (2010).

$$TRC = \frac{\ln Af_2 - \ln Af_1}{T_2 - T_1} \dots\dots\dots(3.4)$$

Donde: TRC, tasa relativa de crecimiento, Af, área foliar (cm²), T, tiempo (días).

3.4.8 Estimación de GDD y filocrono

Durante la observación de estados fenológicos con la escala Schneiter, A. & Miller J. (1981), a partir de la fecha de emergencia (cuando el 80% del total sembrado tiene los cotiledones por encima del suelo), también se obtuvieron los GDD con la metodología empleada por Rivero & Grillo (2018), con la siguiente Ecuación (3.5):

$$GDD = \frac{T_{maxd} + T_{mind}}{2} - \text{cero biológico} \dots\dots\dots(3.5)$$

Donde: T_{maxd}, temperatura máxima diaria (°C) y T_{mind}, temperatura mínima diaria (°C). Para el girasol se considera como cero biológico 4 °C (Aiken, 2005).

Para calcular el filocrono medio, se determinaron los GDD promedio necesarios para que las plantas alcanzaran los consecutivos estados de desarrollo de la fase vegetativa del cultivo (V_n), los cuales son equivalentes al número de hojas en las plantas (Schneiter y Miller, 1981). Aplicando la Ecuación (3.6):

$$V_n = P^{-1} * GDD \dots\dots\dots(3.6)$$

Donde: V_n, fenoestado vegetativo, número de hojas, P⁻¹, inverso del filocrono y GDD, Grados días de desarrollo (Rivero & Grillo, 2018).

3.4.9 Determinación de ETo y Kc.

Para calcular la ETo se empleó el modelo (Ecuación 3.7) de Penman-Monteith que presentan Allen *et al.* (2006). Se recomienda utilizar el valor 0.5 m s⁻¹ como valor mínimo para la velocidad del viento, dentro de invernaderos, lo que mejora las estimaciones de la ETo.

$$ET_o = \frac{0.408\Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (3.7)$$

Donde: ET_o , evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹); R_n , radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹); R_a , radiación extraterrestre (mm día⁻¹); G , flujo de calor de suelo (MJ m² día⁻¹); T , temperatura media del aire a 2 m de altura (°C); u_2 , 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).

Para la obtención del Kc se emplearon los ETc (mm día⁻¹) obtenidos de los microlisímetros de succión de acuerdo a lo descrito por Herrera (2018) y la ETo estimada, con la Ecuación (3.8), descrita en el boletín de la FAO (2014).

$$Kc = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (3.8)$$

Para la medición de temperatura del aire y humedad relativa, se empleó un sensor AM2301, marca Talos Electronics, hecho en Taiwan, con un módulo Arduino (Figura 3.2) que permite almacenar los datos diarios. Que se colocó el dispositivo en medio de la zona experimental dentro del invernadero, a nivel del cultivo, bajo una gaveta de madera de color blanco y con similares especificaciones al abrigo meteorológico Díaz (2012).

Se realizó la calibración del sensor de temperatura y humedad relativa con un higrómetro, marca "UNI-T", modelo UT333, calibrado y certificado por Laboratory Accreditation Inc. Mediante la regresión lineal (y estimada = $a + b$ y medida).

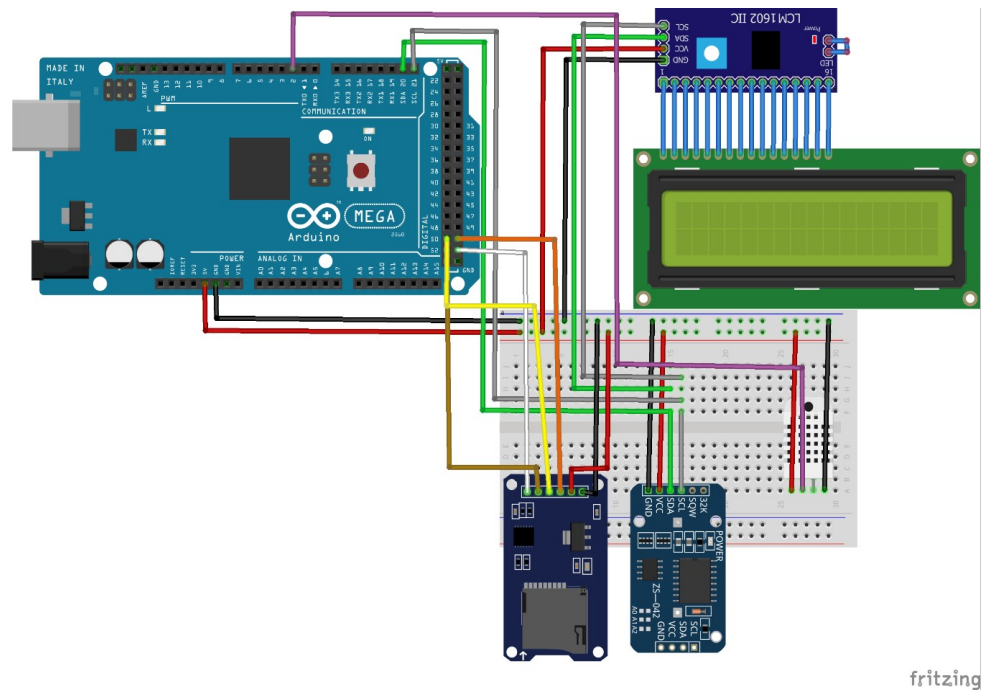


Figura 3.2 Modulo Arduino, para registro y almacenamiento de datos de temperatura y humedad relativa.

Nota: Elaboración propia.

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Caracterización de cápsulas porosas

Se utilizaron 16 cápsulas (Figura 3.3 Cápsulas porosas, caracterizadas en sortividad y porosidad) con las siguientes características de sortividad, como se indica en la Cuadro 3.1. Con un rango de 0.62 a 0.76 mm s^{1/2}, y con una porosidad de 41.57% a 56.81%, similares a las empleadas por Herrera (2018).

Cuadro 3.1 Características de cápsulas porosas.

UE	Sortividad (mm s ^{1/2})	Porosidad (%)
1	0.641	53.91
2	0.660	41.58
3	0.702	54.62
4	0.657	44.02
5	0.708	42.26

6	0.660	44.18
7	0.699	44.62
8	0.7698	54.02
9	0.628	45.21
10	0.660	45.47
11	0.644	56.81
12	0.676	45.03
13	0.676	44.43
14	0.699	54.54
15	0.628	45.64
16	0.682	42.32

Nota: Elaboración propia.



Figura 3.3 Cápsulas porosas, caracterizadas en sortividad y porosidad.

Nota: Tomada con cámara.

3.5.2 Caracterización de sustratos

Las características de cada sustrato se presentan en el Cuadro 3.2, donde se hay una menor porosidad del sustrato grueso (SG) de un 4%, con respecto al sustrato

fino (SF), con similar a la retención de humedad, y la porosidad de aireación menor por 8% en el SG.

En el caso de las características químicas, se observa un pH mayor en el SF debido a la mayor cantidad de Peat-Moss, con respecto al SG, y de igual forma se observa en el contenido de materia orgánica (MO).

De acuerdo con Ansorena (1994) los cultivos pueden crecer dentro del rango de 4 a 8 pH. Los criterios que se emplearon para la elección de los diferentes tamaños de partícula de los sustratos fueron con base a lo descrito por Ansorena et al. (1994) al tener un diámetro menor a 0.5 mm de tezontle, en el SF con una porosidad mayor al del SG.

La capacidad de aireación se encuentra dentro de los porcentajes reportados por Cruz *et al.*, (2012). En términos de Densidad real, es menor a lo reportado por Ansorena para sustratos orgánicos, el cual es de 1.5 g/ cm³, mientras que la densidad aparente en ambos sustratos es muy baja por lo que no hay probabilidad de compactación y mejor aireación en ambos sustratos.

Cuadro 3.2 Características físicas y química de sustratos.

Sustrato	Densidad real (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad total %	Porosidad de aireación %	Porcentaje retención humedad %	pH	M.O. %
SG	0.22	0.070	78	20	57	5.5	38.26
SF	0.31	0.067	82	28	54	4.4	56.45

Nota: Elaboración propia con datos emitidos por laboratorio física de suelos (2021),COLPOS.

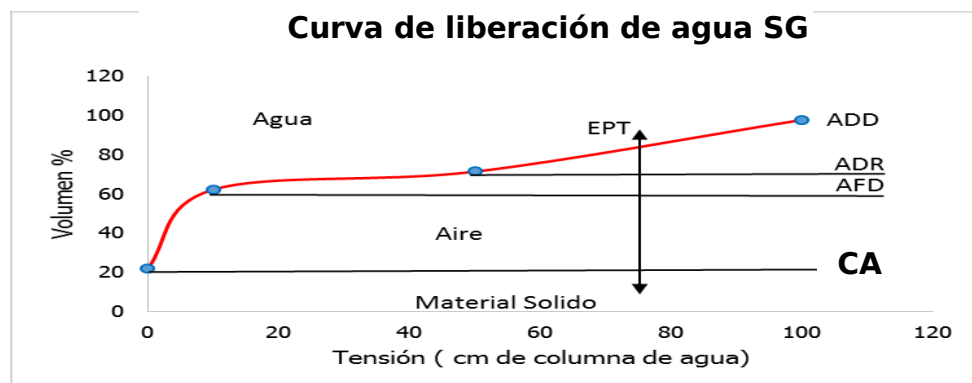


Figura 3.4 Curva de liberación de agua de SG.

Nota: Realizada por el laboratorio de suelos (2021) COLPOS.

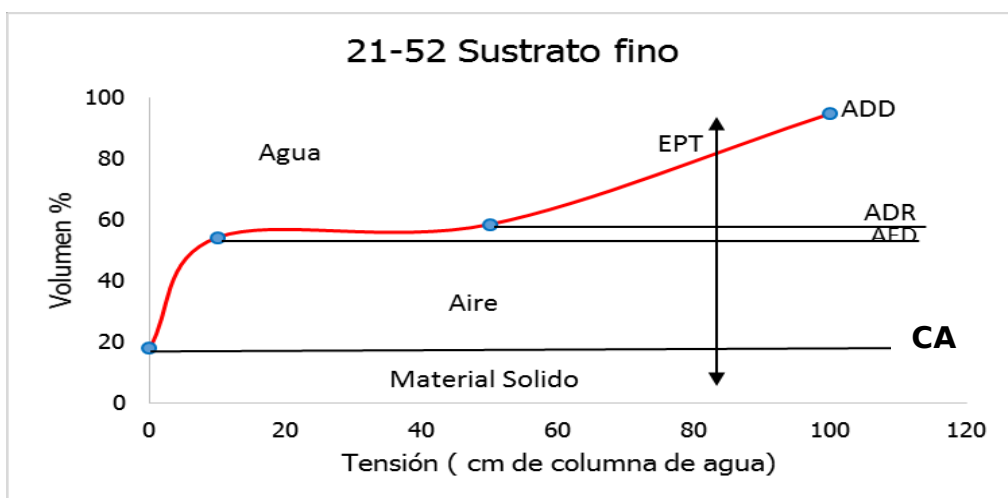


Figura 3.5 Curva de liberación de agua de SF.

Nota: Realizada por el laboratorio de suelos (2021) COLPOS.

Las curvas de liberación de agua (Figura 3.4 y Figura 3.5), se observa una similitud en el AFD, que no es muy grande en ambos sustratos, y cómo se observa en la Figura 3.6 ambos sustratos son similares en términos de retención de humedad, como también se observa en el Cuadro 3.3 del método descrito por Kizito *et al.*, (2008). Domingo *et al.*, (2015), mencionan que el aumento en porosidad de aireación disminuye la capacidad de retención de humedad, como se observa entre los SF y SG.

Cuadro 3.3 Calibración de sensor FDR para humedad de sustratos.

Voltaje registrado sensor (V^{-1})	Contenido de humedad SF (decimal)	Contenido de humedad SG (decimal)
0.30	0	0
0.31	0.047	0.047
0.48	0.097	0.095
0.60	0.147	0.145
0.74	0.198	0.195
0.81	0.246	0.241
0.85	0.293	0.288
0.88	0.341	0.336
0.90	0.391	0.386
0.92	0.441	0.434
0.95	0.488	0.481
0.96	0.539	0.526

0.98	0.589	0.574
1.01	0.637	0.622

Nota: Elaboración propia.

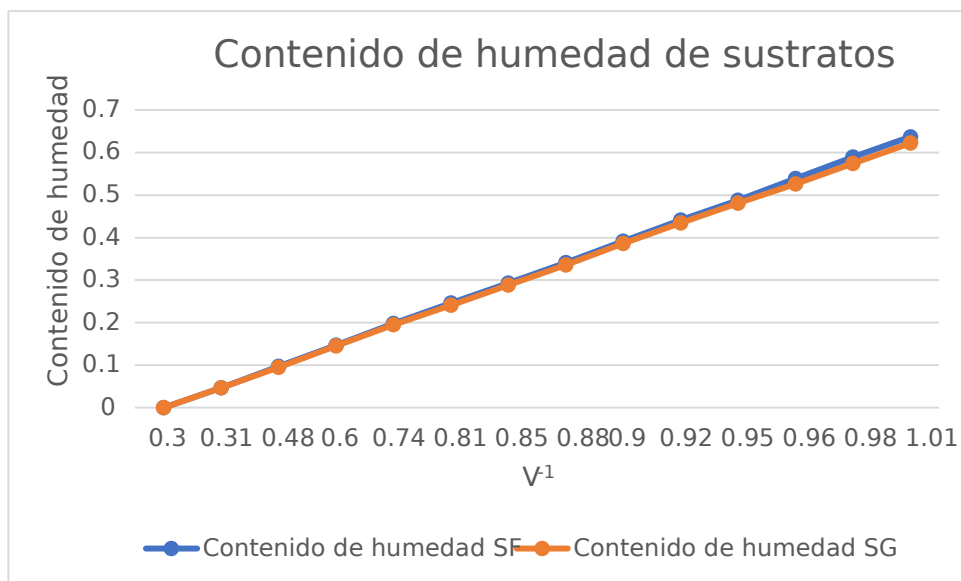


Figura 3.6 Contenido de humedad en sustratos por sonda FDR.

Nota: Elaboración propia.

3.5.3 Consumo hídrico

En el Cuadro 3.4 se muestra las láminas acumuladas (mm) consumidas por estado fenológico.

Cuadro 3.4 Consumos hídricos acumulados por estado fenológico y su total en cada tratamiento y sus repeticiones (mm).

Tratamientos	Vegetativa	Abotonamiento	Floración	Total
SFGO R1	78.70	167.64	118.82	365.16
SFGO R2	50.96	170.64	119.76	341.37
SFGO R3	50.69	157.10	100.71	308.49
SFGO R4	45.41	154.06	117.05	316.52
SGGO R1	53.58	166.21	109.52	329.31
SGGO R2	53.96	146.60	119.67	320.22
SGGO R3	53.62	172.52	126.70	352.84
SGGO R4	63.93	145.86	119.35	329.13
SFGA R1	39.27	162.76	106.02	308.06

SFGA R2	43.36	156.86	107.24	307.47
SFGA R3	37.73	132.43	115.03	285.19
SFGA R4	42.20	169.89	104.68	316.78
SGGA R1	56.52	168.94	116.97	342.43
SGGA R2	55.31	148.06	95.95	299.32
SGGA R3	50.63	170.00	119.06	339.69
SGGA R4	48.64	150.31	109.45	308.40
DMS ₀₅	NS	NS	NS	NS
CV %	44.81	4.85	24.73	32.36

^yDMS₀₅ = Diferencia Mínima Significativa P=0.05, NS= Diferencias NO significativas, CV=Coeficiente de Variación.

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite, y Rn = Repetición (número).

Nota: Elaboración propia.

Se realizó la acumulación del consumo hídrico por estado fenológico de cada unidad experimental (UE) y repetición (ver Cuadro 3.3). Con lo que se realizó por estado fenológico el ANOVA con el software R (Figura 4.2 Código R de ANOVA para consumo hídrico) con lo que se obtuvieron diferencias no significativas entre tratamientos. Y como se observa en el Cuadro 3.5, el consumo hídrico no es muy diferente entre las medias de los tratamientos. El consumo hídrico corresponde a lo referido por Gómez *et al.*, (2011), que durante todo su ciclo puede consumir de 250 a 400 mm llegando a producir entre 1.5 y 3 t ha⁻¹.

Cuadro 3.5 Consumo hídrico promedio (mm) por estado fenológico.

Tratamiento	Vegetativa	Abotonamiento	Floración	Total
SFGO	56.44	162.36	114.085	332.885
SGGO	56.2725	157.7975	118.813	332.875
SFGA	40.64	155.485	108.2425	304.375
SGGA	52.775	159.3275	110.3575	322.46

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite, y Rn = Repetición (número).

Nota: Elaboración propia.

3.5.4 Comportamiento del consumo de agua en los tratamientos con respecto a la evapotranspiración.

En la Figura 3.7 Acumulación de consumo semanal (ET_c), en contraste con E_{to} y ET_o(50%) observa que durante las primeras tres semanas tiene aproximadamente una cuarta parte de la demanda atmosférica de evapotranspiración, sin embargo, el

desarrollo del cultivo fue favorable dentro de este periodo, al tener una tasa relativa de crecimiento de área foliar a partir de la semana 3 que se tuvo los primeros pares de hoja, que se observa en la Figura 3.10 Tasa relativa de crecimiento de área foliar por semana. Sin embargo se observa que hay una disminución de este al perder el primer par de hojas verdaderas, de la ETo y la ETo al 50%, donde a partir de la semana 6 que corresponde a la etapa vegetativa, se tiene un mayor consumo hídrico respecto a la ETo(50%), sin embargo, el consumo hídrico no satisface la demanda atmosférica dentro del invernadero.

En la semana 8 correspondiente al estado de abotonamiento R2 del cultivo se observa que el cultivo satisface la demanda atmosférica, donde en la Figura 3.15 Histograma de Temperatura y HR, durante el cultivo se observa que las temperaturas máximas de 40°C disminuyen, sin embargo, en las siguientes semanas vuelven a tener un valor superior al tolerado por el cultivo de 34°C de acuerdo a GRDC (2017); en la semana 11 correspondiente al estado de floración se vuelve a observar el comportamiento donde se satisface la demanda atmosférica, al tener una temperatura menor a la tolerada, seguido en las siguientes semanas vuelve a sobre pasar la temperatura tolerada por el cultivo. La acumulación del consumo hídrico total fue en promedio de los tratamientos de 60% respecto al acumulado de la ETo. Se observó en varios periodos condiciones de estrés térmico al cultivo dentro del invernadero.

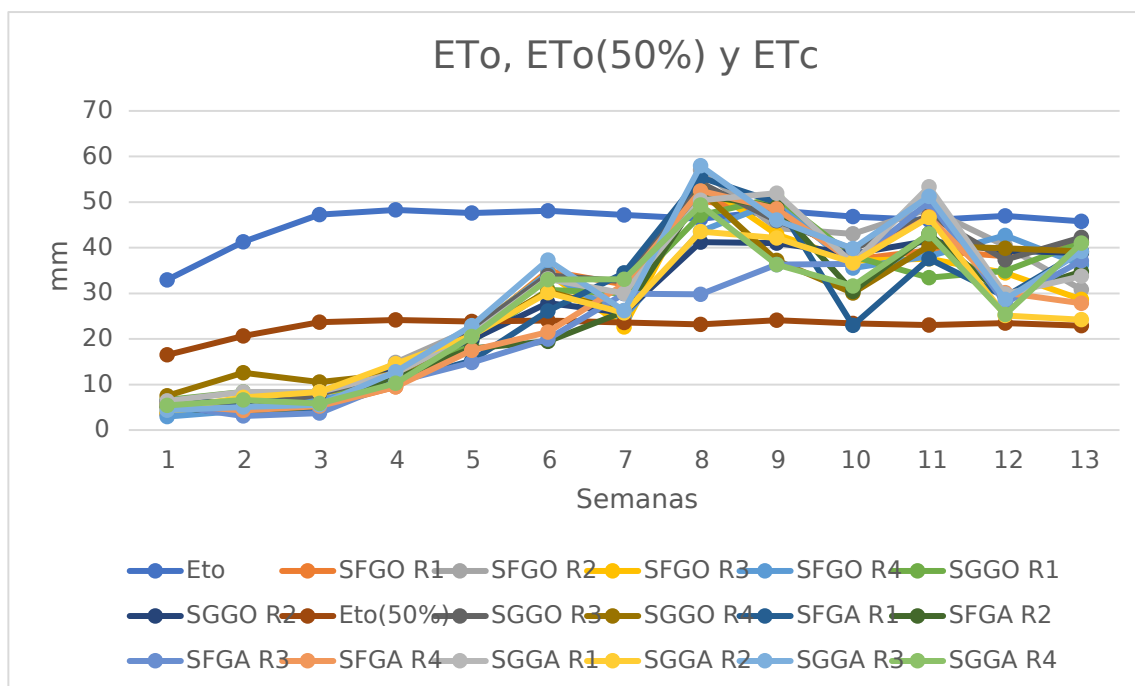


Figura 3.7 Acumulación de consumo semanal (ETc), en contraste con ETo y ETo(50%)

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite, y Rn = Repetición (número).

Nota: Elaboración propia.

3.5.5 Variables agronómicas

Las alturas obtenidas por etapa tienen una diferencia estadística en el ANOVA realizado en el software R entre tratamientos en los estados fenológicos que se observa en el Cuadro 3.6 Medias de altura, diámetro de tallo y área foliar por esta fenológico; número de hojas verdes, se aplicó una prueba de medias Tukey (Cuadro 3.7 Prueba de medias Tukey -) entre los tratamientos por la variable altura para la etapa vegetativa, se obtuvo que los tratamientos con significancia respecto a la altura fueron los tratamientos SGGO y SGGA respecto a los demás tratamientos, que su sustrato es SG.

En la segunda etapa no se encontró una diferencia significativa entre tratamientos, mientras que, en la última etapa registrada de floración, se encontraron diferencias significativas, entre tratamientos por parte del factor de

variedad, donde la primera variedad ornamental, obtuvo una mayor altura respecto a la variedad Oleaginosa, como se observa en la Figura 3.8 Diferencia de medias de alturas (cm) de tratamientos: A =189.25, B = 189.25, C = 144 y D = 142, en e floración.GRDC (2017), mencionan que la altura de los tallos puede llegar a crecer 220 cm, pero, cuando se encuentra bajo estrés por sequía, su altura es más pequeña, alrededor de 50-60 cm, con lo que no se tuvo estrés por sequía.

Cuadro 3.6 Medias de altura, diámetro de tallo y área foliar por estado fenológico; número de hojas verdaderas.

Variable	Tratamientos	Vegetativa	Abotonamiento	Floración
		(cm)	(cm)	(cm)
Altura (cm)	SFGO	58.25	144.5	185.25
	SGGO	68.5	160.75	189.25
	SFGA	50.5	125.75	144
	SGGA	66	132.75	142
	DMS ₀₅	0.0347*	NS	**0.000338
	CV %	49.97	42.52	77.55
		(cm)	(cm)	(cm)
Diámetro del tallo (cm)	SFGO	1.65	1.925	1.9
	SGGO	1.675	1.95	1.875
	SFGA	1.57	1.725	1.787
	SGGA	1.97	2	1.96
	DMS ₀₅	NS	NS	NS
	CV %	31.94	28.23	10.9
		(cm ²)	(cm ²)	(cm ²)
Área Foliar	SFGO	5044.8	7423	7093
	SGGO	4950.4	6747	6175
	SFGA	2349.9	4021	3498
	SGGA	4254.1	5809	4878
	DMS ₀₅	0.0075	0.0082	0.005
	CV %	61.71	61.16	64.55
		Total		
		(Número de hojas)		
Número de hojas verdaderas	SFGO	36.5		
	SGGO	37.75		
	SFGA	30.25		
	SGGA	33.55		
	DMS ₀₅	0.027		
	CV %	52.13		

^yDMS₀₅ = Diferencia Mínima Significativa P=0.05, NS= Diferencias NO significativas, CV=Coefficiente de Variación. SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite, y Rn = Repetición (número).

Nota: Elaboración propia.

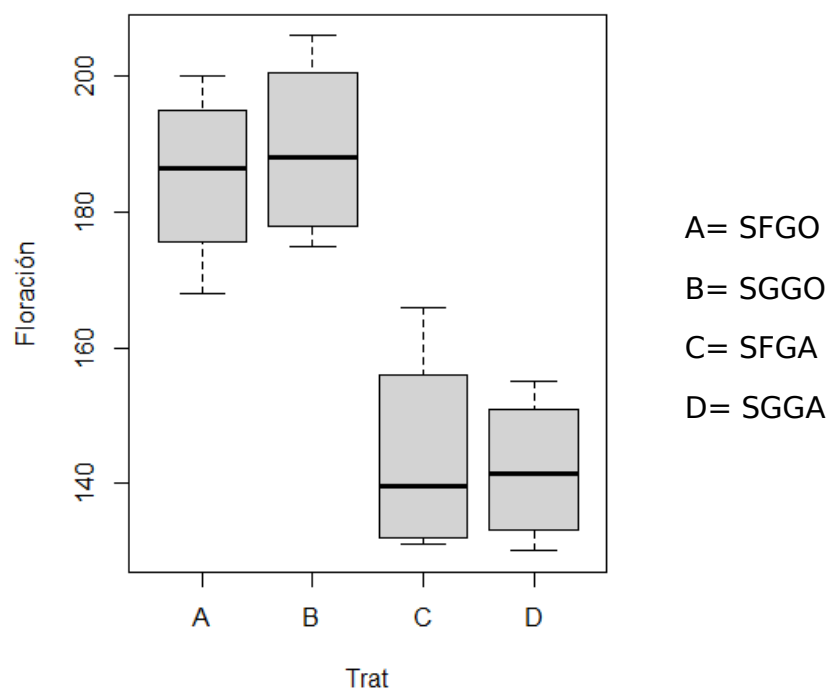


Figura 3.8 Diferencia de medias de alturas (cm) de tratamientos: A =189.25, B = 189.25, C = 144 y D = 142, en etapa de floración.

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 3.7 Prueba de medias Tukey - altura

Etapa	Tratamientos	Diferencia (cm)	DMS ₀₅
Vegetativa	SFGA - SGGO	-18.	0.03
Floración	SFGA – SFGO	-41.25	0.0055
Floración	SGGA – SFGO	-43.25	0.0038
Floración	SFGA – SGGO	-45.25	0.0027
Floración	SGGA - SGGO	-47.25	0.0019

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

Para el diámetro del tallo no existió alguna diferencia significativa entre tratamientos, como se observa en el Cuadro 3.6 Medias de altura, diámetro de tallo y área foliar por estado fenológico; número de hojas, ~~verdaderas~~ el mayor

diámetro en el segundo tratamiento que concuerda con las alturas máximas obtenidas de la variedad ornamental.

En el área foliar se tienen una diferencia estadística en el ANOVA realizado en el software R entre tratamientos en los estados fenológicos que se observa en el Cuadro 3.6 Medias de altura, diámetro de tallo y área foliar por estado fenológico; número de hojas verdaderas. Se aplicó una prueba de medias Tukey (Cuadro 3.8), se observó que en la etapa vegetativa, hay diferencia significativa entre el tratamiento SFGO – SFGA de 2695 cm², y SGGO-SFGA de 2600.55 cm², donde la variedad GO, tuvo mayor área foliar que en el tratamiento SFGA, dado que la M.O. fue mayor en este tratamiento y por lo consiguiente su pH fue menor (4.4) como se observa en el Cuadro 3.2, el pH óptimo del cultivo es de 6 a 7.5 , sin embargo, se puede desarrollar bajo un rango de pH entre 4 y 8.5(Ruiz *et al.*, 1999, citado por INIFAP s/f); combinado con la variedad GA, su desarrollo no se adecuó a las condiciones del experimento, que es lo que se observa en los otros estados fenológicos, como el abotonamiento, donde su diferencia significativa entre medias fue 3401.84 cm² y 2725.87 cm² y en la floración, donde su diferencia significativa entre medias fue 3595.09 cm² y 2676.33 cm², que tienen la misma tendencia en lo referido al estado vegetativo.

La tasa relativa de crecimiento de área foliar (Figura 3.10), se observó un decremento a partir de la semana 5, que coincide con el aumento en el consumo de hídrico de la Figura 3.7, donde, como lo menciona GRDC (2017), es uno de los mecanismos ante un estrés hídrico y que fue la senescencia de las hojas viejas, presentando menor área foliar en esa semana. En la semana 8 y 9 que coincide con el estado fenológico de Abotonamiento, se volvió a observar el mismo comportamiento, al presentarse humedades relativas bajas en esas

fechas (Figura 3.15), combinado con temperaturas elevadas a la tolerada por el cultivo(34°C).

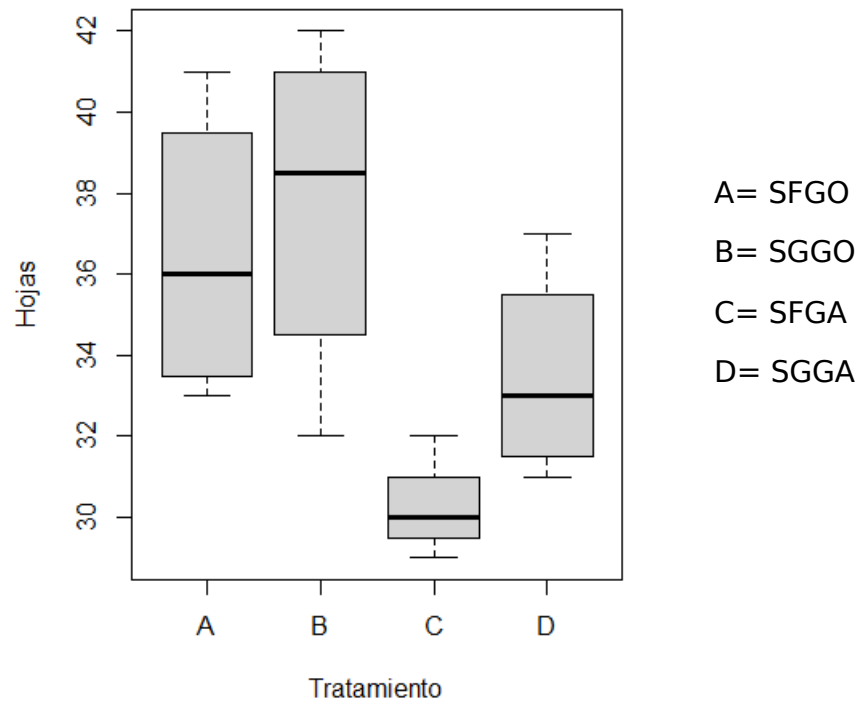


Figura 3.9 Comparación de medias de hojas verdaderas por tratamientos, A=36.5, B =37.75, C=30.25, D= 33.55.

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 3.8 Prueba de medias Tukey - Área foliar.

Etapa	Tratamientos	Diferencia (cm ²)	DMS ₀₅
Vegetativa	SFGO - SFGA	2695	0.01
Vegetativa	SGGO-SFGA	2600.55	0.013
Abotonamiento	SFGO-SFGA	3401.84	0.007
Abotonamiento	SGGO-SFGA	2725.87	0.029
Floración	SFGO-SFGA	3595.09	0.004
Floración	SGGO-SFGA	2676.33	0.03

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

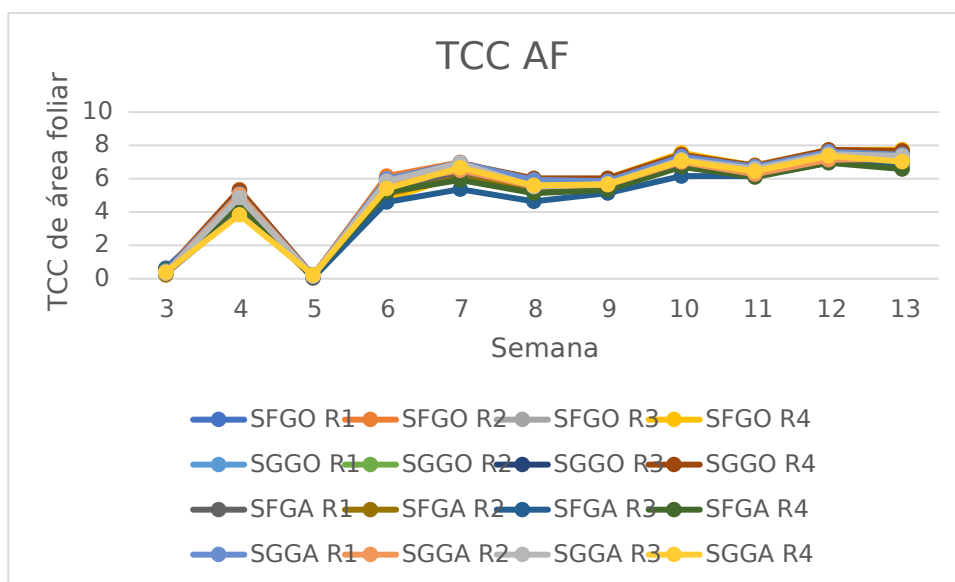


Figura 3.10 Tasa relativa de crecimiento de área foliar por semana
Nota: Elaboración propia.

En Cuadro 3.6 se obtuvo el ANOVA realizado con el software R, donde se observó una diferencia significativa entre tratamientos en el número de hojas verdaderas al final del experimento, por lo que se realizó una prueba de medias Tukey en Cuadro 3.9, que tienen diferencia significativa entre los tratamientos SGGO y SFGA, que se vincula con el área foliar (Cuadro 3.8) de las mismas,

Cuadro 3.9 Prueba de medias Tukey - número de hojas.

Tratamientos	Diferencia (piezas)	P-value
SGGO-SFGA	7.50	0.027

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

3.5.6 Variación del contenido de humedad en los sustratos por tratamiento

La humedad registrada de forma semanal en cada unidad experimental, de forma gravimétrica, con lo que se obtuvieron las gráficas de cada tratamiento en el contenido de humedad en los tratamientos con SF, presentaron una humedad mayor del 30% en promedio, como se observa en la Figura 3.11. Registro de humedad de SFGO. Figura 3.13 Registro de humedad de SFGA. Mientras que los tratamientos con SG, presentaron una tendencia en el contenido de humedad menor al 30% en promedio en el tratamiento SGGO y debajo del 20% de humedad en el tratamiento SGGA.

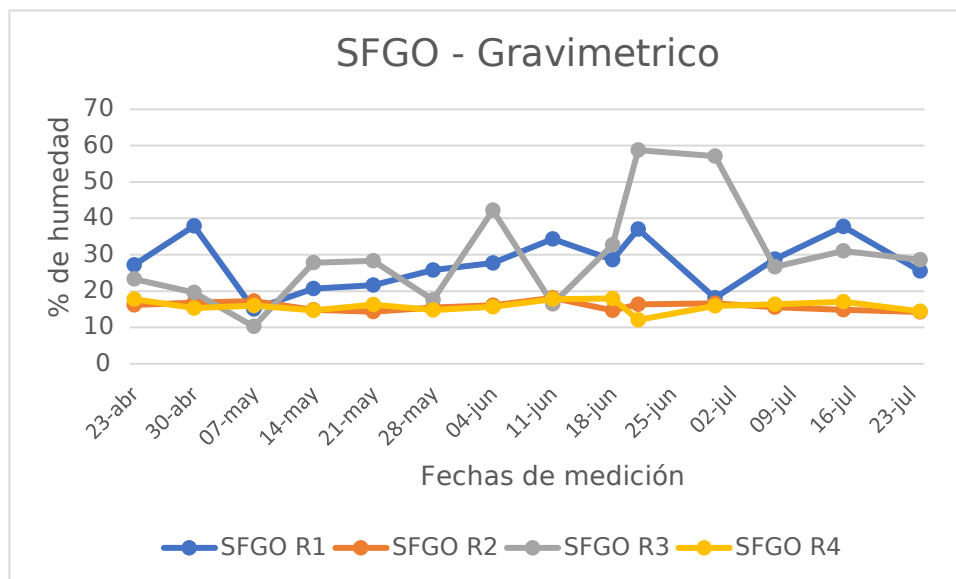


Figura 3.11 Registro de humedad de SFGO

SF = Sustrato Fino, GO = Girasol Ornamental

Nota: Elaboración propia.

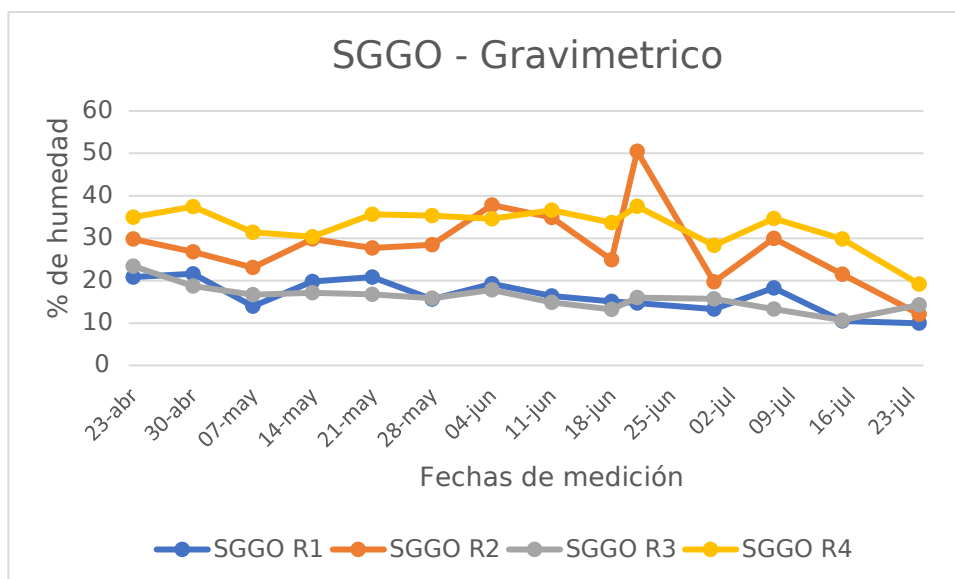


Figura 3.12 Registro de humedad de SGGO

SG = Sustrato Grueso, GO = Girasol Ornamental

Nota: Elaboración propia.

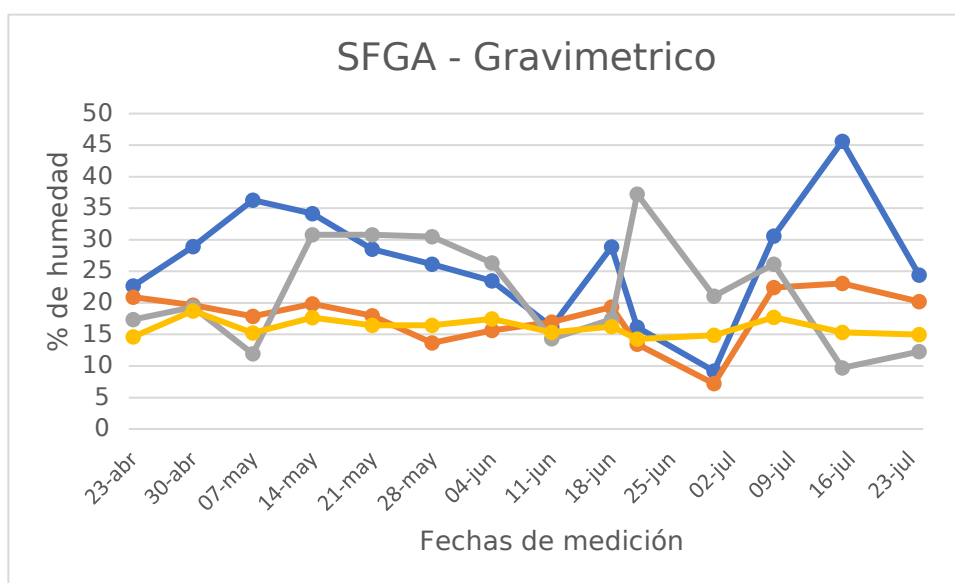


Figura 3.13 Registro de humedad de SFGA

SF = Sustrato Fino, GA = Girasol Aceite

Nota: Elaboración propia.

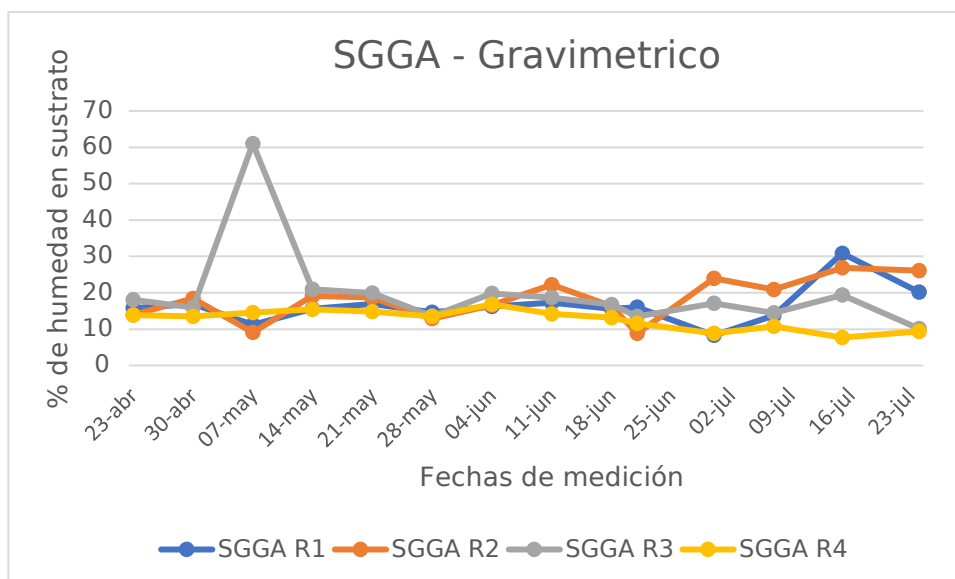


Figura 3.14 Registro de humedad de SGGA

SG = Sustrato Grueso, GA = Girasol Aceite.

Nota: Elaboración propia.

3.5.7 Variación de la temperatura y humedad relativa.

En la calibración del sensor de temperatura y HR, se obtuvo las ecuaciones de regresión (Ecuación 3.9 y Ecuación 3.10) y los coeficientes de determinación para temperatura de 93.4% y humedad relativa de 69.7%; Para los datos faltantes de temperatura y HR, se empleó los datos de la Estaciones Meteorológicas Automáticas, del COLPOS, Montecillo, con lo que se ajustaron los datos mediante una regresión lineal obteniendo un r^2 93.4% y 89% respectivamente. La mayor temperatura registrada (Figura 3.15) fue de 41.3 °C, y la mínima 3.83°C, con una temperatura promedio de 24.13°C, mientras que la HR más alta fue de 100% y la mínima de 0%, con un promedio de 55.52% de HR. La temperatura óptima para el girasol de acuerdo a GRDC (2017) de 25°C a 28°C, sin embargo, puede tolerar una temperatura de 8°C a 34°C, con lo que el cultivo estuvo expuesto a una temperatura superior a la que tolera en condiciones a la intemperie.

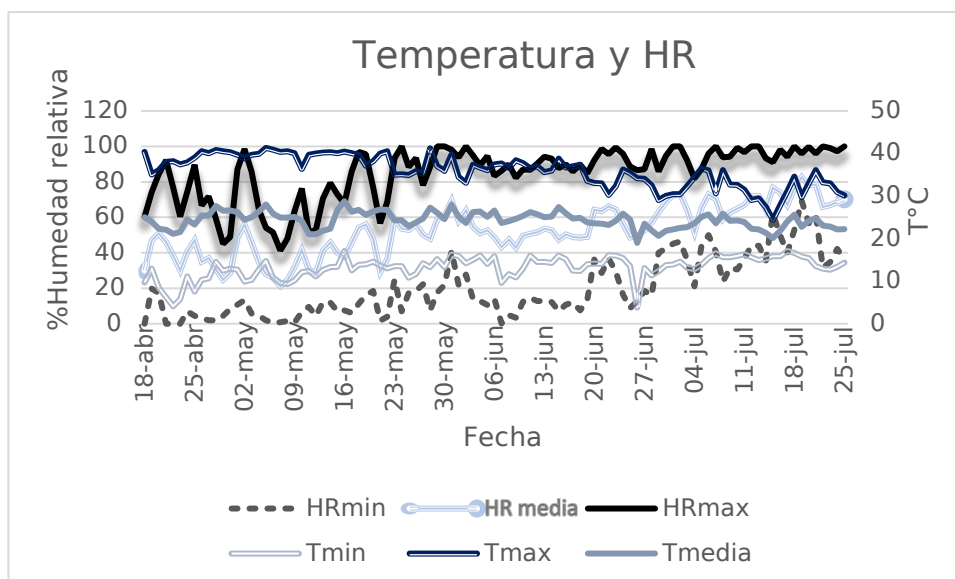


Figura 3.15 Histograma de Temperatura y HR, durante el ciclo.
 Nota: Elaboración propia con datos del EMA, CONAGUA(2021), Montecillo, Texcoco..

$$T(^{\circ}C) = T^{\circ} (sensor) * 0.966 + 1.72 \dots\dots\dots(3.9)$$

$$HR(\%) = HR (sensor) * 1.28 + (-11.6) \dots\dots\dots(3.10)$$

3.5.8 Fenología de cultivo de Girasol para las dos variedades

Cuadro 3.10 Fenología de los cultivares de girasol.

Estado fenológico	Girasol Ornamental		Girasol Aceite (SYN 3950 HO)	
	Días acumulados	Día juliano	Días acumulados	Día juliano
Siembra		90		90
Germinación	7	97	7	97
Vegetativa	53		52	
	V1	112		112
	V2	126		126
	V3	131		131
	V4	134		134
	V5	137		136
	V6	140		139
	V7	143		143
	V8	147		146
	V9	150		149

Reproductiva	49		44	
R1		162		160
R2		167		163
R3		172		167
R4		179		172
R5		184		178
R5.2		186		180
R5.5		189		182
R5.7		192		184
R6		199		193

Nota: Elaboración propia.

En el Cuadro 3.10 Fenología de los cultivares de girasol se observa que el número de días de desarrollo desde la emergencia hasta la etapa reproductiva es de acuerdo al reportado por Gardiol et. al. (2001), sin embargo, en lo encontrado por Granados&Vizcarra (2017) respecto a la variedad GA (SYN 3950 HO) en algunos de los estados de vegetativos aumentan los días (V1 a V2 se obtuvieron 4 y 9 días), al igual que en la etapa reproductiva (22 y 30 días en etapa reproductiva, abotonamiento y floración), que se relaciona con periodos condiciones de estrés térmico al cultivo dentro del invernadero.

3.5.9 Grados días de desarrollo (GDD) y filocrono.

Se empleó la metodología descrita por Rivero&Grillo (2018), con la temperatura base propuesta por Aiken (2005), con lo que se obtuvo la Cuadro 3.10, donde se observa un aumento en los GDD para el estado de abotonamiento en comparación del reportado por Gardiol et. al. (2001), en el caso de NDAWN (2003), reportan una acumulación menor de GDD para el girasol, que el encontrado en este estudio, debido a que el cultivo estuvo expuesto a temperaturas de 40°C donde la FAO (2014), indica que los estadios fenológicos pueden prolongarse, en este caso se retrasó tres estadios fenológicos con respecto a los reportados.

Cuadro 3.11 Grados días de desarrollo de los cultivares, TB=4°C, inicio (31-03-21), fin (18-07-21).

Estado fenológico	Girasol Ornamental	Girasol Aceite (SYN 3950 HO)
VE	152	152
V1	478.6001	478.6001
V2	790.1911	790.1911
V3	895.0261	895.0261
V4	960.8061	960.8061
V5	1025.0211	1002.6661
V6	1088.4061	1068.7561
V7	1150.5411	1150.5411
V8	1236.7211	1215.5761
V9	1302.7689	1282.0561
R1	1533.4046	1498.7686
R2	1626.3525	1551.3117
R3	1730.8443	1626.3525
R4	1858.9093	1730.8443
R5	1960.3793	1841.0493
R5.2	1998.3243	1878.9943
R5.5	2055.7693	1919.3993
R5.7	2115.6293	1960.3793
R6	2243.2193	2133.5893

Nota: Elaboración propia.

Se realizó la Figura 3.16 entre los grados días de desarrollo y su correspondiente estado fenológico esta que indica los GDD necesarios para la emisión del siguiente estado vegetativo, de acuerdo a la metodología empleada por Rivero&Grillo (2018).

Para obtener el filocrono de los estados fenológicos, se empleó el método descrito por Rivero & Grillo (2018), y empleando la Ecuación (3.6) obteniendo la Figura 3.16, se observó que los GDD necesarios disminuyen a partir del V4 en ambas variedades, del promedio indicado por Aiken (2005), es de 37.3 °C día hoja⁻¹, en secano, llegando a ese valor en el V3 (tercer par de hojas), este disminuye conforme aumenta los estados vegetativos con lo que se requiere menor calor para el siguiente estado vegetativo, se puede relacionar a la temperatura registrada dentro del invernadero, y la cual es superior a la tolerada por el cultivo.

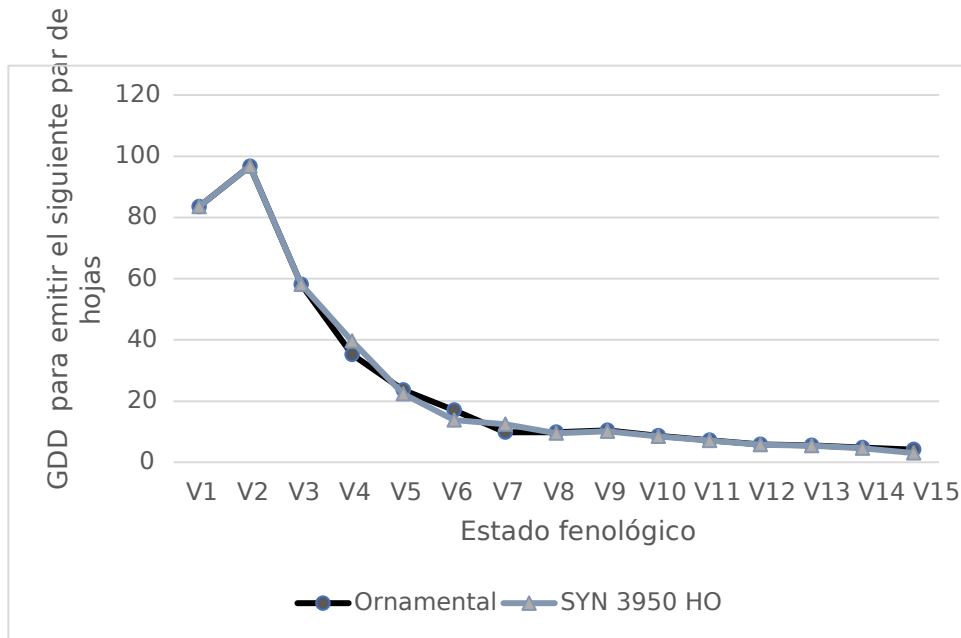


Figura 3.16 Diferencia de GDD para emitir el siguiente par de hojas (Vn).
Nota: Elaboración propia.

3.5.10 Determinación de Kc por tratamiento

Se obtuvieron los Kc mediante la ecuación 3.8, con los datos del agua consumida por unidad experimental (ETc), y la ETo obtenida de la ecuación 3.7, en acumulación semanal a partir del día 20 de abril hasta el 17 de julio.

Con lo que se obtuvo la Figura 3.17, con lo que se realizó un ANOVA con software R para los tratamientos en las 13 semanas que se registraron datos de consumo, donde se obtuvieron diferencias significativas estadísticamente en las semanas 1, 3, 5, 6, 12 y 13.

Se aplicó la prueba de Shapiro en el programa R para los datos de Kc obtenidos, con lo que se observaron que en las semanas 2, 5, 6, 8, 10 y 13, no tienen una distribución normal.

Cuadro 3.12 Pruebas de Shapiro de Kc en cada tratamiento y repetición.

Semanas	W	Distribución de datos, p-value = 0.05
Semana 1	0.91	0.16
Semana 2	0.86	0.025
Semana 3	0.97	0.2186
Semana 4	0.93	0.26
Semana 5	0.87	0.0328
Semana 6	0.87	0.028
Semana 7	0.92	0.147
Semana 8	0.88	0.046
Semana 9	0.91	0.16
Semana 10	0.88	0.046
Semana 11	0.96	0.83
Semana 12	0.92	0.18
Semana 13	0.89	0.069

Nota: Elaboración propia.

Para las semanas con distribución normal, con una diferencia significativa estadísticamente, se aplicó la prueba de medias Tukey en el software R, con lo que se encontró que en la semana 1 hay diferencia significativa entre los tratamientos SGGO, SFGA y SGGA hacia el tratamiento SFGO, debido a la mayor evaporación, debido al problema de taponamiento en la primera semana de las mangueras y colocación de las cápsulas porosas.

Cuadro 3.13 Prueba de medias Tukey – Kc semanal.

Semana	Tratamientos	Diferencia	p-value = 0.05
Semana 1	SGGO - SFGO	0.098	0.00002
Semana 1	SFGA - SFGO	0.058	0.0028
Semana 1	SGGA-SFGO	0.053	0.0061
Semana 1	SFGA - SGGO	-0.039	0.0389
Semana 1	SGGA - SGGO	-0.045	0.017
Semana 3	SFGA - SGGO	-0.084	0.0038
Semana 12	SFGA - SFGO	-0.21	0.0005
Semana 12	SGGA – SFGO	-0.25	0.00009
Semana 12	SFGA – SGGO	-0.18	0.0014
Semana 12	SGGA - SGGO	-0.22	0.0002

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

En la semana 3 se realizó la prueba de Tukey, con lo que se observó que el tratamiento SGGO tiene una diferencia significativa entre el tratamiento SFGO y el SGGa respecto al SFGa, que se tienen el SG y el cultivo tiene poca área foliar respecto a la maceta, con lo que la evaporación afecta en mayor medida al SF. En la semana 12 se realizó la prueba de Tukey, con lo que se observó que los tratamientos SFGO y SGGO tienen una diferencia significativa entre sus medias de los tratamientos SFGa y SGGa, debido a que los tratamientos SFGa y SGGa se encontraban en la etapa de floración es crítica como describen Mahmood et al. (2019), mientras los SFGO y SGGO, tenían una semana de atraso y se encontraban en el estado de abotonamiento.

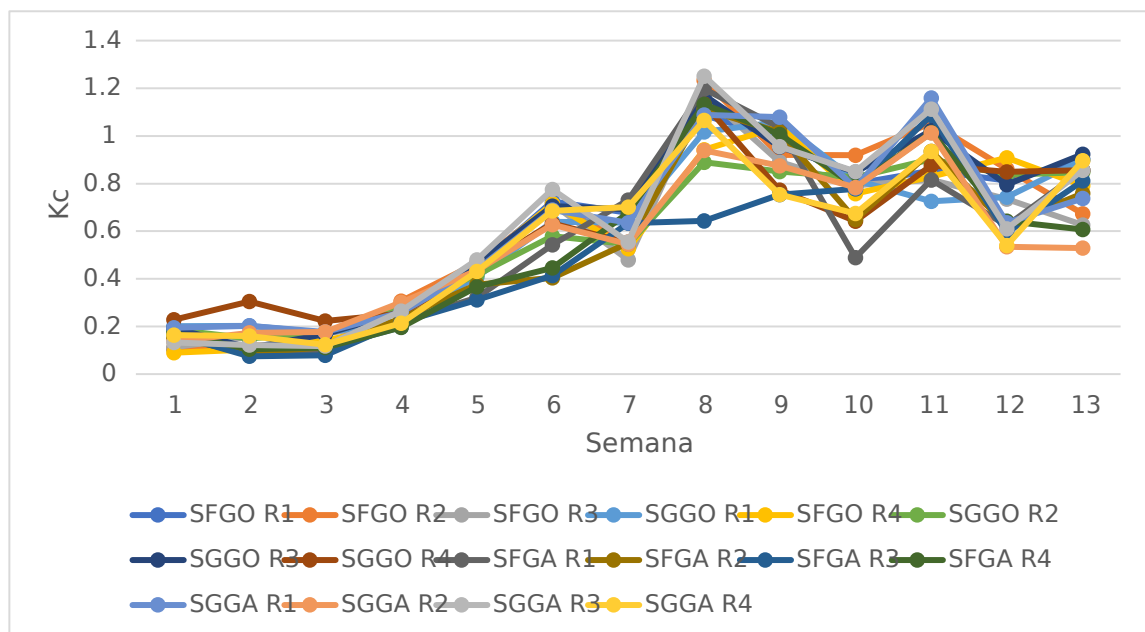


Figura 3.17 Kc de cada unidad experimental (UE).

Nota: Elaboración propia.

Cuadro 3.14 Kc promedios semanales y DMS y CV.

Tratamientos	SFGO	SGGO	SFGA	SGGA	DMS	CV
Semana 1	0.1	0.2	0.16	0.15	0.0000549	83.45
Semana 2	0.12	0.19	0.08	0.16	NS	48.49
Semana 3	0.13	0.18	0.09	0.14	0.0053	64.01
Semana 4	0.23	0.25	0.21	0.25	NS	25.32

Semana 5	0.45	0.43	0.34	0.44	0.0000865	82.18
Semana 6	0.71	0.64	0.45	0.69	0.0000352	84.69
Semana 7	0.56	0.6	0.64	0.61	NS	18.38
Semana 8	1.1	1.05	1.02	1.08	NS	4.93
Semana 9	0.96	0.9	0.95	0.91	NS	4.61
Semana 10	0.82	0.78	0.67	0.77	NS	27.31
Semana 11	0.88	0.88	0.96	1.05	NS	33.85
Semana 12	0.83	0.81	0.62	0.58	0.0000237	85.68
Semana 13	0.74	0.88	0.76	0.75	0.358	22.81
Kc global	0.6	0.61	0.55	0.6	0.0465	47.28

¹DMS₀₅ = Diferencia Mínima Significativa P=0.05, NS= Diferencias NO significativas, CV=Coeficiente de Variación

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

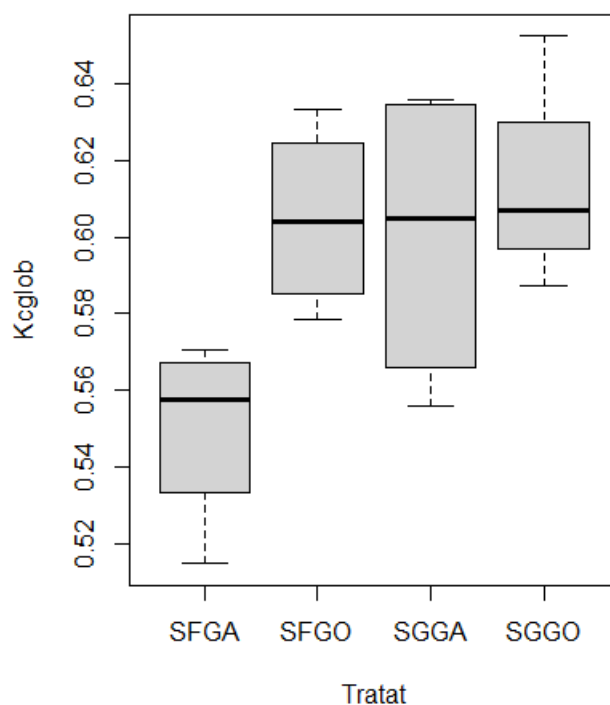


Figura 3.18 Kc global de cada tratamiento.

Nota: Elaboración propia.

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

El Kc global se obtuvo hasta R6, en el cual se realizó un ANOVA con el software R y se obtuvo diferencia significativa, donde se aplicó una prueba de Tukey

(Cuadro 3.15) y se observó una diferencia significativa con el tratamiento SFGO respecto al SFGA, al tener el doble del área foliar (SFGO) como se observa en el Cuadro 3.6 Medias de altura, diámetro de tallo y área foliar por estado fenológico; número de hojas verdaderas Kc que reporta la FAO (2014), en comparación a los obtenidos fueron menores así como los reportados por Kiani et. al. (2013), debido a la demanda atmosférica fue mayor (ET_o) y el estrés térmico presentado a lo largo del experimento dentro del invernadero (Figura 3.15 Histograma de Temperatura y HR, durante el ciclo).

Cuadro 3.15 Prueba de medias Tukey-Kc global.

Tratamientos	Diferencia	Menor	Mayor	p-value = 0.05
SFGO-SFGA	0.0548	-8.49	0.118	0.098
SGGO-SFGA	0.063	-3.46	0.126	0.05

SF = Sustrato Fino, SG = Sustrato grueso, GO = Girasol Ornamental, GA= Girasol de Aceite.

Nota: Elaboración propia.

3.6 Conclusiones

El consumo hídrico de los diferentes tratamientos no fue significativo, al presentarse temperaturas superiores a las toleradas por el cultivo y tener sustratos parecidos en términos de retención de humedad. Su consumo promedio total fue de 323.15 mm hasta el estado fenológico R6.

El sistema es capaz de satisfacer las demandas hídricas, si las temperaturas no superan lo tolerado por el cultivo. La fertirrigación por medio del sistema de las cápsulas porosas permite que el girasol absorba de forma eficiente los nutrientes y su desarrollo sea favorable.

El sistema de riego por succión afecta al Kc en las primeras etapas del cultivo al tener mayor evaporación donde los sustratos amortiguan la pérdida de humedad respecto a la retención de humedad.

El consumo en la variedad ornamental fue superior debido a la diferencia de área foliar y diferencia de altura que contaba el cultivar. El girasol ornamental se adaptó de mejor forma a las condiciones dentro del invernadero y los sustratos empleados.

3.7 3.7. Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico otorgado para realizar esta investigación; al Colegio de Postgraduados campus Montecillo, por el espacio brindado para la realización del experimento. A la Universidad Autónoma Chapingo y al Programa de posgrado de IAUIA, por la formación y enriquecimiento de conocimiento otorgado a través de los académicos que formaron parte de esta trayectoria.

3.8 3.8 Literatura citada

Aiken, R.M. 2005. Applying Thermal Time Scales to Sunflower Development. *Agron. J.*, 97 (3): 746.

Ansorena MJ. (1994). Sustratos. Propiedades y caracterización. Madrid: Mundi-Prensa. 171.

Azua, M., Arteaga, R., Vázquez, M., & Quevedo, A. (2020). Calibración y evaluación de modelos matemáticos para calcular evapotranspiración de referencia en invernaderos. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 11(1), 125-137. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.1906>

Borges, F.R.M., Bezerra, F.M.L., Marinho, A.B., Ramos, E. G.; Adriano, J.N. (2019). Goat manure fertilization and irrigation on production components of sunflower. *Revista Caatinga*, vol. 32, no. 1, pp. 211-221.

Bye, R., Linares, E., Lentz, D.L. 2009. México: centro de origen de la domesticación del girasol. *Tip Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*. N° 12. pp:5-12.

Cisneros, E.(2017). Espectroradiometría para detectar deficiencia de nitrógeno en frijol (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

- Cruz, E., Can, A., Sandoval, M., Bugarín, R., Robles, A., Juárez, P. 2012. Sustratos en la horticultura. Biociencias. pp: 17-26.
- Dantas, K., Raj, H., Loureiro, F.A., Augusto, C., Silva, N., Gurgel, M., Chipana, R. (2019). Water consumption of the sunflower crop irrigated with saline water. DYNA, vol. 86, no. 208, pp. 221-226. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.73203>
- De Boodt, M. Verdonck, O. Capper, I. 1974. Determination and study of the water availability substrates for ornamental plant growing. Acta horticultura 35: 51- 58.
- Díaz, S. (2012). Análisis CFD de diferentes diseños para una estación meteorológica de pequeñas dimensiones. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Domingo, R., Téllez, D., Hernández, M.A., De la Cruz, E. (2015). Evaluación de cinco sustratos para la obtención de plantas de la especie *Jatropha curcas*. Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias. Vol.2 No.2 pp.169-184
- Dos-Santos, João Batista, et al. Crecimiento del girasol (*Helianthus annuus L.*) En función de la salinidad del agua de riego con fertilización nitrogenada. Agrociencia, 16 Aug. 2017.
- Escalante, J. (2001). Biomasa, rendimiento, eficiencia en el uso del agua y nitrógeno en girasol de humedad residual. Terra Latinoamericana, pp: 19-27.
- FAO. (2014). Evapotranspiración del cultivo (Primera ed.). Sin ciudad: FAO.
- García, E. (1981). Modificaciones al Sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía de la UNAM. Pp: 252.
- Gardioli, J.M., Della Maggiora, A.I., Irigoyen, A. (2001). Curvas de coeficientes de cultivo de maíz, girasol y soja. Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA).
- Gómez, S.N.D., Espinoza, Z.C., López, H.J., Castro, R.V., Álvarez, A.S. (2011). Producción de girasol de temporal para grano y combinado con maíz para ensilaje en Durango. Folleto para productores No. 11. INIFAP. Campo experimental Valle de Guadiana. Durango, México. 20 p.
- Grains Research & Development Corporation (GRDC). (2017). Sunflower, plant growth and physiology.
- Herrera, S.S.(2018). El riego en la horticultura ante el cambio climático (Tesis de doctorado). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.
- INIFAP. s/f. Requerimientos agroecológicos de cultivos. En: <http://www.inifapcirpac.gob.mx/PotencialProductivo/Jalisco/Norte/RegionNorteReqAgroecologicos.pdf>
- Kiani, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B., Majidi, M.M. (2013). Development of a crop coefficient model for sunflower to save water in arid region. Conference: The 6 th International Perspective on Water Resources & the Environment Conference. At: Izmir, Turkey.

- Kizito, F.; Campbell, C.S.; Campbell, G.S.; Cobos, D.R.; Teare, B.L.; Carter, B.; Hopmans, J.W. (2008). Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor, *Journal of Hydrology*.352 (3-4), 367-378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.021>
- Mahmood, H., Towfiq, S., & Rashid, K. (2019). The sensitivity of different growth stages of sunflower (*helianthus annuus* L.) Under deficit irrigation. *Applied ecology and environmental research*, pp: 7605-7623.
- Maldener, I. C., A. B. Heldwein, L. H. Loose, D. D. P. Lucas, F. L. Guse, e M. P. Bortoluzzi. 2009. Modelos de determinação não destrutiva da área foliar em girassol. *Ciênc. Rural* 39: 1356-1361
- Morales, E. J., Morales, E. J., & Díaz, E., Cruz, A. J., & Medina, N., Guerrero, M. (2015). Tasa de asimilación neta y rendimiento de girasol en función de urea y urea de liberación lenta. *Agrociencia*, 49(2),163-176.[fecha de Consulta 8 de Noviembre de 2020]. ISSN: 1405-3195. Consultada en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=302/30236851005>
- North Dakota Agricultural Weather Network (NDAWN). (2003). Sunflower Development and Growing Degree Days (GDD). Consultada en <https://ndawn.ndsu.nodak.edu/help-sunflower-growing-degree-days.html>
- NUSEED. (2019, 7 agosto). History of the sunflower. Nuseed Europe. <https://nuseed.com/eu/history-of-the-sunflower/>
- Pacheco, P; López, V.; Andrade, M; Alia, I; Sainz, M. J.; Villegas, O. G; Arteaga, R.; Vázquez, M. (2016). Cuantificación microlisimétrica del consumo de agua residual tratada en la nochebuena (*Euphorbia pulcherrima* Willd. Ex Klotzch). *Tecnología y Ciencia del Agua*, VII (6), pp 179-186.
- Quintero, C., M. F., González, M., C.A. y Guzmán, P., J.M. (2011). Sustratos para cultivos hortícolas y flores de corte. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. Pp. 79-108.
- Rivero, A. & Grillo, H. (2018). Sunflower-Homoeosoma electellum Hulst. interaction phenology towards control strategies development. *Idesia (Arica)*, 36(4), 81-86. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005002602>
- Santos, M., Segura, M., Núñez, C.E. (2010). Análisis de Crecimiento y Relación Fuente-Demanda de Cuatro Variedades de Papa (*Solanum tuberosum* L.) en el Municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia) *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín* 63(1): pp. 5253-5266. Recuperado en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v63n1/a04v63n01.pdf>
- Schneider, A.A., and J.F. Miller. 1981. Description of Sunflower Growth Stages. *Crop Sci.* 21:901-903
- Trinidad, J.A. (2019). Extracción de sales solubles de suelos por medio de cápsulas porosas. Tesis maestría. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

4 ANEXOS

Cuadro 4.1 Componentes y costos de módulo Arduino

Componente	Costo unitario
Arduino Mega	\$ 419
Sensor de temperatura y humedad AM2301	\$ 383
Módulo de memoria micro SD	\$ 138
Protoboard	\$ 150
Juego de cables tipo Dupont	\$ 55
Módulo de reloj DS3231SN	\$ 180
Pantalla LCD 16X2	\$ 215
Gaveta de madera	\$500
Adaptador de corriente	\$25
Extensión de cable de corriente	\$45

```

#include "DHT.h"

#define DHTPIN 2    // Pin donde está conectado el sensor

// #define DHTTYPE DHT11 // Descomentar si se usa el DHT 11
#define DHTTYPE DHT21 // Sensor DHT21
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // libreria para LCD por I2C
// #include <RTCLib.h> // incluye libreria para el manejo del modulo RTC
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include "Sodaq_DS3231.h"
File archivo;
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
#define I2C_ADDR 0x3F
#define SSpin 53
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // DIR, E, RW, RS, D4, D5, D6, D7
// RTC_DS3231 rtc; // crea objeto del tipo RTC_DS3231
DateTime now;
int newHour = 0;
int oldHour = 0;
int h;
int t;

void save_temperature() {
  archivo = SD.open("temp.txt", FILE_WRITE);
  now = rtc.now();
  float h = ((dht.readHumidity()*1.28) + (-11.6)); // Leemos la HR
  float t = ((dht.readTemperature()* 0.966) + 1.72); // Leemos la temperatura en grados
  Celsius
  float f = dht.readTemperature(true); // Leemos la temperatura en grados Fahrenheit
  float hO = dht.readHumidity();
  float tO = dht.readTemperature();
  archivo.print(now.month(), DEC);
  archivo.print("/");
  archivo.print(now.date(), DEC);
  archivo.print(",");
  archivo.print(now.hour(), DEC);
  archivo.print(":");
  archivo.print(now.minute(), DEC);
  archivo.print(",");
  archivo.print(h); // registra la humedad
  archivo.print(",");
  archivo.print(t); // registra la temperatura
  archivo.print(",");
  archivo.print(hO);
  archivo.print(",");
  archivo.println(tO);
}

```

Figura 4.1 Código de dispositivo Arduino

Cuadro 4.2 Consumo hidrico por Unidad Experimental (mm).

Fecha	SFGO R1	SFGO R2	SFGO R3	SFGO R4	SGGO R1	SGGO R2
20/04/2021	0.472159665	0.574726183	0.606557172	0.387277028	1.140610425	1.290923427
21/04/2021	0.680829479	0.825837316	0.664913984	0.559694883	1.304186339	1.423552547
22/04/2021	0.946087717	0.972613541	0.954929659	0.959350629	1.560602636	1.556181666
23/04/2021	0.627777831	0.629546219	0.708239497	0.525211312	1.303302145	1.188356908
24/04/2021	0.714428856	0.586220707	0.790469551	0.534937448	1.326291192	0.714428856
25/04/2021	0	0	0	0	0	0
26/04/2021	1.551760695	1.843544757	2.059730222	1.576960228	3.534566028	1.604812343
27/04/2021	0.557926495	0.784280192	0.836447645	0.473928053	0.972613541	0.424413182
28/04/2021	0.427949958	0.592410066	0.809921822	0.306815363	0.954045464	1.248482109
29/04/2021	0.652535267	0.781627609	0.879773158	0.831142481	0.972613541	0.990297424
30/04/2021	0.54820036	0.503106459	0.877120575	0.361635398	0.975266124	0.958466435
01/05/2021	0.573841989	0.538474224	0.95316127	0.751565009	0.972613541	0.970845153
02/05/2021	0	0	0	0	0	0
03/05/2021	1.680410941	1.538497783	2.754706807	2.192801438	3.179119988	2.985481474
04/05/2021	0.735649515	0.642809131	1.275007933	1.246713721	0.914256729	1.145031396
05/05/2021	0.838216034	1.183935938	1.412942217	1.096400719	1.219303703	1.432394488
06/05/2021	1.150336561	1.175978191	1.184820132	1.167136249	1.236987585	1.23787178
07/05/2021	0.752449203	0.785164386	1.37934284	0.990297424	1.654327214	1.442120623
08/05/2021	0	0	0	0	0	0
09/05/2021	0	0	0	0	0	0
10/05/2021	1.894828017	6.767621858	2.086698143	1.51639293	2.741001798	3.92582193
11/05/2021	1.936385141	1.938153529	1.909859317	1.892175435	2.13974979	2.137981402
12/05/2021	1.518161318	1.384648005	1.651674632	1.547339725	0.9487403	1.707378862
13/05/2021	1.369616705	1.565023607	1.826745069	1.768388257	1.070759089	1.862997028
14/05/2021	1.625148808	1.619843643	1.589781043	1.591549431	1.609233313	1.618075255
15/05/2021	1.17155722	1.537613589	1.687042397	1.591549431	2.414734164	2.284757627
16/05/2021	0	0	0	0	0	0
17/05/2021	4.013357148	4.005399401	4.076134931	4.023083284	3.890454164	3.934663871
18/05/2021	2.136213014	2.661424326	2.652582385	2.475743559	1.909859317	2.369640264
19/05/2021	2.864788976	3.094679449	2.96205033	2.785211504	2.337809275	2.458059677
20/05/2021	4.06729299	4.031925225	4.058451049	4.06729299	4.181354033	4.226447933
21/05/2021	3.784350869	3.890454164	3.554460396	3.713615339	3.006260036	2.68795015
22/05/2021	4.491706172	4.509390054	4.48286423	4.474022289	4.111502697	4.129186579
23/05/2021	0	0	0	0	0	0
24/05/2021	10.16823248	9.841080648	9.213302817	9.637715998	6.923240024	6.030203955
25/05/2021	4.659703056	4.61549335	4.703912762	4.659703056	3.810876693	3.289202157
26/05/2021	5.331690594	5.128325944	5.526213302	5.327269623	4.3820661	3.642879809
27/05/2021	4.986854884	4.951487118	4.995696825	5.004538766	5.128325944	5.092958179
28/05/2021	4.447496465	4.244131816	4.650861115	4.456338407	4.191080168	3.483724865
29/05/2021	5.322848652	5.351142864	5.314006711	5.30516477	6.321988017	6.348513841
30/05/2021	0	0	0	0	0	0
31/05/2021	10.25665189	9.920658119	8.735837987	7.621753386	9.142567287	9.902974237
01/06/2021	6.13630725	3.492566807	3.598670102	4.350235111	5.437793889	4.332551229
02/06/2021	6.330829959	4.13802852	4.102660755	4.924961295	6.260094428	4.739280528
03/06/2021	3.934663871	3.23615051	4.261815698	3.324569922	3.713615339	3.253834392
04/06/2021	5.30516477	5.393584183	1.9275432	4.633177232	5.411268065	3.483724865
05/06/2021	0	0	0	0	0	0
06/06/2021	0	0	0	0	0	0
07/06/2021	14.35931264	18.26745069	18.26745069	12.82081486	14.14710605	12.26377256

Cuadro 4.3 Temperatura (°C) EMA Montecillo

Hora	31-mar	01-abr	02-abr	03-abr	04-abr	05-abr
00:00	15.9	14.7	12	12	11.4	11.5
01:00	14.3	14.1	11.8	10.8	10.1	10
02:00	13.7	14	10.9	10.1	8.9	8.8
03:00	15.5	13.8	9.9	9.3	7.4	7.9
04:00	13.3	14.3	8.5	8.2	6.3	7.1
05:00	12	14.5	9.2	7.5	5.3	6.5
06:00	10.9	14	9.8	6.9	5	6.2
07:00	9.7	12.9	11.2	6.2	4.1	5.8
08:00	11.3	14.1	12.6	8.3	6.5	8.5
09:00	17.2	16.1	15.6	12.1	11.4	12.7
10:00	20.6	17.6	18.4	15.3	15.2	16.1
11:00	23.5	18.7	20.3	18.3	18.6	19.8
12:00	26.7	20.2	21.6	21.6	22.2	23.4
13:00	29.5	22.4	23.8	24.8	24.8	25.9
14:00	29.9	23.9	24	26.5	26.5	27.4
15:00	29.4	24.4	25.5	27.3	27.6	27.1
16:00	30.4	25.1	24.9	28	28.2	25.5
17:00	29.8	24.4	26.1	27.8	27.8	24.5
18:00	27.9	22.7	25.3	26.6	25.7	23.9
19:00	25.4	19.4	23.7	24	22.7	22.5
20:00	22.5	16.4	20.7	20.5	19.8	21.1
21:00	20	14.9	16.5	18.1	17.3	20.2
22:00	17	14.4	14.9	15.5	14.4	18.4
23:00	15.6	13.5	13	12.4	12.6	16.5

Cuadro 4.4 Humedad Relativa (%) EMA Montecillo

Hora	31-mar	01-abr	02-abr	03-abr	04-abr	05-abr
12:00	39	53	62	69	58	45
01:00	45	53	66	73	62	50
02:00	45	63	67	77	65	53
03:00	38	68	74	80	70	49
04:00	45	67	75	79	70	50
05:00	49	66	75	80	67	51
06:00	52	61	74	82	61	53
07:00	57	63	76	82	65	57
08:00	51	56	69	74	59	49
09:00	40	46	56	64	48	44
10:00	33	42	46	56	40	39
11:00	25	40	39	46	33	32
12:00	14	37	35	33	21	22
13:00	8	30	30	15	9	14
14:00	6	27	28	11	3	8
15:00	6	28	24	9	1	9
16:00	3	25	25	8	2	11
17:00	2	29	23	10	6	11
18:00	2	34	25	10	10	16
19:00	3	45	31	18	13	20
20:00	9	55	38	21	22	24
21:00	20	58	48	34	30	26
22:00	48	57	54	44	39	30
23:00	50	55	64	55	41	36

Cuadro 4.5 Fechas de inicio de estados fenológicos

Estado Fenológico	GO	GA
VE	07-abr	07-abr
V1	22-abr	22-abr
V2	06-may	06-may
V3	11-may	11-may
V4	14-may	14-may
V5	17-may	16-abr
V6	20-may	19-may
V7	23-may	23-may
V8	27-may	26-may
V9	30-may	29-may
R1	11-jun	09-jun
R2	16-jun	12-jun
R3	21-jun	16-jun
R4	28-jun	21-jun
R5	03-jul	27-jun
R5.2	05-jul	29-jun
R5.5	08-jul	01-jul
R5.7	11-jul	03-jul
R6	18-jul	12-jul

Cuadro 4.6 ETo semanal y total (mm)

Semanas	SFGO R1	SFGO R2	SFGO R3	SFGO R4	SGGO R1	SGGO R2
1	3.44128355	3.58894397	3.72510986	2.9664713	6.63499274	6.1734434
2	4.31221476	5.04344331	6.41615469	4.30204653	8.38171824	6.19731665
3	5.15706225	5.32638543	8.00681993	6.69334955	8.20399522	8.24289976
4	9.51569721	14.8129042	10.7518006	9.90739521	10.9242185	13.5370121
5	21.3577092	22.1932726	21.7865433	21.538969	19.4372395	19.8059485
6	34.9168261	34.1316617	34.4039935	34.3907306	30.7575769	27.8874828
7	31.9636177	26.1809881	22.6265277	24.8546969	29.965339	25.7123653
8	50.3283298	57.1100987	54.4053489	43.6084544	47.0833373	41.2211303
9	47.9056379	44.3069678	42.9276249	50.0895974	51.0180012	40.9912398
10	37.4456213	43.0425702	37.1361534	35.5092362	38.1441347	38.6746512
11	39.3820065	48.5422576	37.5782505	38.1618186	33.422538	41.5217563
12	38.1441347	40.4165136	34.483571	42.6623667	34.8991422	39.3112709
13	41.2918658	30.8053234	28.6478898	36.2254334	41.1946044	38.8338061

```

>library(readxl)
> Consumo_hidrico_etapas <- read_excel("~/1Documentos
fer/CHAPINGO/Proyecto/excel/Consumo_hidrico_etapas.xlsx")
> View(Consumo_hidrico_etapas)
> attach(Consumo_hidrico_etapas)
> anov_vegetativa = aov(Vegetativa~Tratamientos)
> summary(anov_vegetativa)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Tratamientos 3  666.6  222.19   3.248  0.06 .
Residuals  12  820.9   68.41
---
Signif. codes:
0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
> anov_abot = aov(Abotonamiento~Tratamientos)
> summary(anov_abot)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Tratamientos 3   99.7   33.24   0.204  0.892
Residuals  12 1957.4  163.12
> anov_floracion = aov(Floración~Tratamientos)
> summary(anov_floracion)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Tratamientos 3  257.7   85.89   1.314  0.315
Residuals  12  784.4   65.36
> anov_tot =aov(Total~Tratamientos)
> summary(anov_tot)
      f Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Tratamientos 3  2169   723.1   1.913  0.181
Residuals  12  4536   378.0

```

Figura 4.2 Código R de ANOVA para consumo hídrico.