

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

*“Evaluación de un sistema de producción de forraje verde hidropónico en la
Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno”*

Trabajo Final de Graduación presentado ante la Escuela de Ingeniería de Biosistemas como
requisito para optar por el grado de

Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Alexander Salazar Campos

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2018

Esta tesis fue aceptada por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

Ing. Giovanni Carmona Villalobos

Director de tesis

M.Sc. Gustavo Díaz Gutiérrez

Miembro, Comité Asesor

Ing. Francisco Marín Thiele

Miembro, Comité Asesor

Ph.D. Marta Montero Calderón

Presidente, Tribunal Examinador

Dra. Beatriz Mazón Villegas

Miembro, Tribunal Examinador

Alexander Salazar Campos

Estudiante

Dedicatoria

A Dios y a mis padres.

Agradecimientos

Al Ing. Francisco Marín por confiar en mí para el desarrollo de este proyecto y todos los conocimientos adquiridos brindados.

Al Ing. Marlon Retana por toda la ayuda, amabilidad y disponibilidad para la ejecución de este trabajo.

A los ingenieros Geovanni Carmona y Gustavo Díaz por todas sus enseñanzas durante la carrera y su apoyo y paciencia a lo largo de este proceso universitario.

A la fundación FITTACORI por su contribución económica para poder realizar el proyecto.

A todo el personal de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno por el apoyo en todos los ensayos realizados en este lugar.

A mis padres Fressy Campos Méndez y Jaime Salazar Sánchez por su apoyo incondicional en esta etapa universitaria.

A Marilyn Sánchez Chávez por todo el amor, cariño y apoyo que me ha brindado en todo momento.

A la Universidad de Costa Rica por su apoyo económico que me permitió estudiar.

A Randall, Mónica y Ronny por todo lo que nos ha tocado que pasar en todos estos años universitarios tanto buenos y malos momentos.

ÍNDICE GENERAL

Dedicatoria	III
Agradecimientos.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
RESUMEN	X
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos	5
3. MARCO TEÓRICO.....	6
3.1. Cambio climático y su efecto en las actividades agropecuarias.....	6
3.2. La agricultura protegida	7
3.3. La tecnología de forraje verde hidropónico	8
3.4. Efecto de la radiación sobre la fotosíntesis	10
3.5. Luz diaria integrada (LDI)	13
3.6. Consumo hídrico de las plantas.....	13
3.7. Eficiencia en el uso del agua.....	14
3.8. Uniformidad de los sistemas de microaspersión	16
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
4.1. Descripción del módulo de siembra	18
4.2. Sistema de riego	19
4.3. Material vegetal.....	22
4.4. Procedimiento experimental para siembra del FVH en todos los ensayos.....	22
4.5. Ensayos de medición de la radiación fotosintéticamente activa.	23
4.6. Diseño experimental.....	25
4.7. Determinación de la evapotranspiración del FVH	26
4.8. Evaluación del sistema de microaspersión.....	28
4.8.1. Presiones del sistema.....	28

4.8.2.	Caudales del sistema	29
4.8.3.	Uniformidad de lámina aplicada de riego	29
4.9.	Modificaciones en el sistema de riego	30
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.1.	Ensayos de radiación.....	31
5.1.1.	Análisis de resultados del ensayo de radiación 1 (Estación lluviosa)	31
5.1.2.	Resultados de niveles de Radiación fotosintéticamente activa sobre el forraje en estación lluviosa.....	35
5.1.3.	Análisis de resultados del ensayo de radiación 2 (Estación seca).....	38
5.1.4.	Resultados de niveles de Radiación fotosintéticamente activa sobre el forraje en estación lluviosa.....	41
5.1.5.	Comparación entre estaciones seca y lluviosa	44
5.2.	Evapotranspiración en el desarrollo de FVH	48
5.3.	Eficiencia en el uso del agua.....	56
5.4.	Evaluación del sistema de riego	58
6.	CONCLUSIONES	66
7.	RECOMENDACIONES	68
8.	REFERENCIAS	70
9.	ANEXOS	80
9.1.	Resultados de cosecha y bromatológicos de ensayos de radiación PAR	80
9.2.	Glosario	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estante de producción de Forraje verde hidropónico en donde N1 a N5: Nivel 1 a nivel 5 y S1 a S3: Sección 1 a sección 3.	19
Figura 2. Diagrama Sistema de riego para cada sección del estante.	21
Figura 3. Componentes del sistema de riego (30).	21
Figura 4. Distribución de los niveles de sombreo y ubicación de bandejas evaluadas en el sistema (Vista superior del estante), donde R (1 a 2): repetición 1 y 2 y B: barrera lumínica.	25
Figura 5. Sistema de recolección de agua filtrada y pérdidas laterales. Vista lateral del estante de producción.	27
Figura 6. Valores LDI promedio, máximos y mínimos, en ensayo de radiación durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreo 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreo 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior), realizado en estación lluviosa.	36
Figura 7. Valores LDI promedio, máximos y mínimos, en ensayo de radiación durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreo 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreo 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior), realizado en estación seca.	42
Figura 8. Valores LDI promedio de ensayos de estación seca y lluviosa durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreo 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreo 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior).	47
Figura 9. Niveles de radiación fotosintéticamente activa acumulada durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreo 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreo 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior) para las estaciones seca y lluviosa.	47
Figura 10. Variaciones en la evapotranspiración del FVH por día en estación lluviosa.	50
Figura 11. Comportamiento interno (sección central, nivel 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la humedad relativa del estante de producción en estación lluviosa.	53
Figura 12. Comportamiento interno (sección central, nivel 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la temperatura del estante de producción en estación lluviosa.	53
Figura 13. Variaciones en la evapotranspiración del FVH por día en estación seca.	54
Figura 14. Comportamiento interno (sección central nivel, 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la humedad relativa del estante de producción en estación seca.	55
Figura 15. Comportamiento interno (sección central, nivel 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la temperatura del estante de producción en estación seca.	55
Figura 16. Pluviometría nivel 1 antes (Izq) y después (Der) de reparación.	62

Figura 17. Pluviometría nivel 2 antes (Izq) y después (Der) de reparación.....	63
Figura 18. Pluviometría nivel 3 antes (Izq) y después (Der) de reparación.....	63
Figura 19. Pluviometría nivel 4 antes (Izq) y después (Der) de reparación.....	64
Figura 20. Pluviometría nivel 5 antes (Izq) y después (Der) de reparación.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de cosecha de forraje verde hidropónico en ensayo de radiación 1.	31
Tabla 2. Resultados análisis bromatológico ensayo de radiación 1.	33
Tabla 3. Resultados de cosecha de ensayo de radiación 2.	38
Tabla 4. Resultados análisis bromatológico ensayo de radiación 2.	40
Tabla 5. Comparación estadística entre resultados promedio de todos los tratamientos de estación lluviosa y seca.	44
Tabla 6. Balance Hídrico en el sistema de producción de FVH durante los 15 días de desarrollo del forraje.	49
Tabla 7. EUA durante el ciclo de producción de FVH.	56
Tabla 8. Evaluación hidráulica del sistema de riego.	59
Tabla 9. Escala de clasificación de la uniformidad de los rangos de coeficientes de variación para caudal de emisores (53).	60
Tabla 10. Escalas de clasificación del desempeño de sistemas de riego por aspersión, con base en los coeficientes de uniformidad (36).	60
Tabla 11. Cosecha de ensayo de radiación en la estación lluviosa.	80
Tabla 12. Resultados bromatológicos de ensayo de radiación en estación lluviosa.	81
Tabla 13. Cosecha de ensayo de radiación en la estación seca.	82
Tabla 14. Resultados bromatológicos de ensayo de radiación en estación seca.	83

RESUMEN

Se realizó la evaluación de un sistema de producción de forraje verde hidropónico ubicado en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno para determinar los niveles de radiación fotosintéticamente activa y su efecto en la productividad del forraje. También se determinó el comportamiento de la evapotranspiración (ET_c) a lo largo del desarrollo del forraje y también el uso eficiente del agua por parte de este sistema. Por último, se realizó una evaluación de la eficiencia con que trabaja el sistema de riego instalado en el estante de producción. Para la determinación de los niveles de radiación fotosintéticamente activa, se llevaron a cabo dos ensayos en donde la siembra se hizo bajo 3 niveles de sombreado (Testigo, 50 % y 80%) y se obtuvieron para cada caso índices productivos y bromatológicos del forraje. Se realizaron 2 ensayos para determinar el agua consumida por el forraje para conocer la evapotranspiración y el uso eficiente del agua por parte de este cultivo y por último se hizo una evaluación del sistema de riego en términos de uniformidad de lámina aplicada, la presión del sistema y el caudal emitido por los emisores.

Se obtuvo un rango de radiación fotosintéticamente activa en el estante de producción que va en términos de luz diaria integrada de 0,21 a 9,2 mol/m²d en total para ambas estaciones y se encontró que esta variable no tiene efectos en las variables productivas y de calidad del forraje. Se encontró una ET_c para el forraje verde hidropónico de 3,4 l/m²d y de 3,54 l/m²d para las estaciones lluviosa y seca respectivamente y una eficiencia en el uso de agua de 389,8 kg_{PF}/m³ y 28,5 kg_{PS}/m³ junto con 365,3 kg_{PF}/m³ y 26,7 kg_{PS}/m³ respectivamente para las estaciones lluviosa y seca. Por último, el sistema de riego presentó condiciones

inaceptables en la lámina de riego aplicada y mediante una serie de mejoras en el sistema de tuberías y emisores, se logra mejorar este parámetro así como la uniformidad en el caudal emitido de los microaspersores.

1. INTRODUCCIÓN

En Costa Rica se cuenta con diversas actividades pecuarias dentro de las cuales se tiene la producción de ganado vacuno de leche y carne con un aproximado de 1 278 817 cabezas de ganado distribuidas en 37 171 fincas, ganado caprino con 12 852 animales en 2 348 fincas, ganado ovino con 35 800 en 1 792 fincas, ganado porcino con 435 243 en 14 355 fincas y 18 589 455 aves de corral en 37 208 fincas del país (1). En el caso del ganado vacuno y parcialmente en los demás mencionados, se dependen en gran parte de la alimentación a base de sistemas de pastoreo.

En nuestro país la ganadería ocupa una elevada fracción del recurso tierra, ya que el 69 % de las áreas de uso agropecuario se encuentran bajo pasturas. Además, existe una marcada concentración de las tierras ganaderas y la población bovina en la región Huetar Norte y la región Chorotega. Estas contabilizan más de la mitad del ganado y de las pasturas del país, 53 y 54% respectivamente (2).

Por otro lado, gran parte del Pacífico Norte de Costa Rica tiene como uno de los temas más críticos para su desarrollo, la falta de agua, especialmente en la estación seca, colocando en una situación difícil los procesos de generación de valor en todas las fases del ciclo ganadero y causando parálisis en los esfuerzos por incrementar la productividad del ganado durante esa estación. Periodos de sequía prolongados, mala distribución de lluvias y temperaturas por arriba del promedio, llevan a los productores a tomar medidas drásticas durante situaciones económicamente difíciles; una de ellas es el desalojo de ganado de sus fincas con el fin de contrarrestar temporadas malas de producción forrajera (3).

Uno de los problemas más comunes en los sistemas de producción ganadera de carne, es la baja calidad y la poca disponibilidad de los alimentos utilizados para la alimentación de los animales, principalmente en la estación seca, donde los pastos disminuyen su productividad (biomasa y calidad), ocasionando una baja productividad de estos sistemas (4). En innumerables ocasiones han ocurrido pérdidas importantes de ganado y de animales menores como consecuencia de déficits alimentarios o faltas de ensilajes, forraje, granos o heno para alimentación animal. Además, los fenómenos climatológicos como sequías prolongadas, inundaciones y las lluvias de cenizas volcánicas, han venido incrementando significativamente su frecuencia en estos últimos años, afectando negativamente la producción o limitando el acceso al forraje producido en forma convencional para la alimentación de los animales. Ello redundaría en la necesidad de contar con alternativas de producción de forraje que permitan prevenir pérdidas productivas especialmente a nivel de los pequeños y medianos productores ganaderos o de especies menores (5). Frente a estas circunstancias de déficit alimentario, surge como una alternativa importante, la implementación de un sistema de producción de forraje verde hidropónico (FVH) (6).

Según FAO (5), el FVH es una tecnología de producción de biomasa vegetal obtenida a partir del crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y crecimiento temprano de plántulas a partir de semillas viables. Este es de alta digestibilidad, calidad nutricional y muy apto para la alimentación animal.

Este mismo autor menciona que en este sistema de producción, el forraje es producido muy rápidamente (9 a 15 días), en cualquier época del año y en cualquier localidad geográfica,

siempre y cuando se establezcan las condiciones mínimas necesarias para ello y que además esta es una tecnología complementaria y no competitiva a la producción convencional de forraje a partir de especies aptas (alfalfa, avena, gramíneas, mezclas de trébol etc.) para cultivo forrajero convencional (5).

La siembra de forraje bajo sistemas tradicionales implica trabajos de adecuación que comprenden preparación de terreno, manejo agronómico del cultivo y obtención de cosechas de forraje que superan en tiempo más de 60 días; además de que la producción por metro cuadrado es mucho menor que en condiciones hidropónicas. Por otra parte para obtener entre 1 a 8 kg de materia seca de alimento utilizando especies forrajeras (avena, cebada, maíz, sorgo y trigo) en suelo se emplea un metro cúbico de agua, mientras que ese mismo volumen de agua en forraje verde hidropónico se obtienen alrededor de 100 kg (6).

Lo anterior, más la estacionalidad en la producción de forrajes en el trópico, las actuales sequías o el anegamiento de los terrenos por exceso de precipitaciones, limita por períodos prolongados la disponibilidad de forraje por parte de los animales causando en general, alta mortalidad y pérdidas de peso o de producción (7).

Dentro del contexto anterior, el FVH representa una alternativa de producción de forraje para la alimentación de diversidad de animales mayores y menores, de carácter industrial o domésticos y es especialmente útil durante períodos de escasez de forraje verde (7).

Dentro del invernadero de hortalizas ubicado en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno se encuentra un módulo de producción de forraje verde hidropónico el cual se ha venido empleando en forma conjunta para investigación por parte del Ministerio de

Agricultura y el Programa Nacional Sectorial de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos (ProNAP) , la Universidad Técnica Nacional, la Universidad Nacional de Costa Rica y la Universidad de Costa Rica con el objetivo de validar la tecnología y lograr así la promoción de este sistema en el país.

En este módulo se desconoce el comportamiento de variables abióticas específicas de especial interés en el desarrollo del FVH. Una de estas variables es la radiación disponible para las plantas en todos los sectores de siembra. Además de esto, no existe mucha información que establezca cuales deben ser los niveles aceptables de radiación para poder producir el forraje.

Por otro lado, no se ha determinado el consumo de agua del FVH en sus diferentes etapas de desarrollo, por lo que el riego se hace por periodos fijos en razón de falta de un sistema automatizado que permita mayor eficiencia en el uso del agua. Asociado a este problema, tampoco se le ha realizado una evaluación de la eficiencia con que trabaja este sistema de riego, por lo que se desconoce si se tiene o no uniformidad en las láminas de riego aplicadas sobre las plantas.

Lo mencionado anteriormente hace necesario el desarrollo de un trabajo que logre esclarecer estos vacíos de información para finalmente poder mejorar la propuesta que se le hará al productor nacional para el uso de este sistema.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la radiación y el uso eficiente del agua en un sistema de forraje verde hidropónico, en busca de mejorar las condiciones de uso de esta tecnología para los productores nacionales.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar los niveles de radiación fotosintéticamente activa disponible en el estante de siembra y como afecta la productividad y calidad del forraje verde hidropónico.
- Determinar el comportamiento de la evapotranspiración del forraje verde hidropónico a lo largo de su desarrollo y su relación con la estacionalidad.
- Realizar una evaluación hidráulica del sistema de riego para verificar la eficiencia con que este trabaja.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Cambio climático y su efecto en las actividades agropecuarias

De acuerdo con la Convención Marco sobre Cambio Climático (CMCC), el cambio climático se entiende como un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Además, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas (8).

Así como lo citan Aguirre et al. (9), se espera que el cambio climático incida sobre la actividad agropecuaria, en el balance hidrológico y el abastecimiento de insumos alimenticios. Además de esto, la producción agropecuaria está directamente influenciada por los factores climáticos como la temperatura, precipitación pluvial, aumento del nivel del mar y la frecuencia y severidad de fenómenos extremos (sequías, e inundaciones). También este autor menciona que se podría alterar el tipo, frecuencia e intensidad de varias enfermedades en plantas y animales. Por último, se podría ver afectada la disponibilidad y distribución de los suministros de agua para el consumo animal y riego, lo que incrementaría la erosión del suelo.

Como consecuencia del efecto invernadero, Campos (3) menciona que periodos secos prolongados y fuertes lluvias conllevan a pérdidas agrícolas importantes, desalojo de ganado, situaciones económicas críticas, aumento de incendios forestales, degradación del

suelo y efectos colaterales de pobreza. También Retana et al. (10) afirman que una mala distribución de lluvias y la elevación de temperatura ambiental por arriba del promedio inciden en una mala producción forrajera, problemas con plagas y enfermedades afectando el comportamiento productivo y reproductivo del hato ganadero.

Por otro lado, Porter et ál. (11) y Watson et ál. (12) están de acuerdo con lo anterior, al mencionar que los efectos del cambio climático tienen efectos indirectos que contribuyen al incremento de plagas en los cultivos, aumento de parásitos y/o enfermedades en la producción pecuaria, cambios en la dinámica de las comunidades biológicas y reducción de nutrientes en el suelo. Un ejemplo se muestra con los productores de Costa Rica y Nicaragua al momento en que se percibe un aumento en el daño de las pasturas causado por diversas plagas, entre ellas la langosta, *Schistocerca* spp., la cual provoca una alta defoliación del pasto (3).

3.2. La agricultura protegida

Se entiende por agricultura protegida, todos aquellos sistemas productivos que se llevan a cabo bajo estructuras cerradas o semi-cerradas, cubiertas por algún cierto tipo de material transparente o semi-transparente, que genere condiciones microclimáticas artificiales. Dentro de este tipo de estructuras se encuentran los microtúneles, macrotúneles, invernaderos, casa mallas y los umbráculos (13).

Los ambientes protegidos tienen la capacidad de generar modificaciones importantes sobre variables como: temperatura, radiación solar, humedad relativa, concentración de gases, entre otras (14). En el caso de la radiación solar, ciertas coberturas utilizadas en los

ambientes protegidos tienen la capacidad de alterar la composición y distribución (luz difusa) de la luz que ingresa en el ambiente, favoreciendo la entrada de las longitudes de onda que conforman el espectro de la radiación fotosintéticamente activa (PAR); esta filtración también favorece la reducción de la temperatura en el ambiente y el cultivo, por la restricción de la entrada del espectro infrarrojo cercano que se asocian con el incremento de la temperatura (14).

La capacidad de los ambientes protegidos para modificar las variables ambientales mencionadas, al punto de mantener sus valores relativamente estables en el tiempo, facilita el crecimiento de los cultivos en condiciones ideales, lo que permite obtener altos rendimientos y calidad de la producción, además, reducir costos en el control de plagas y enfermedades al evitar condiciones ambientales extremas (15).

3.3. La tecnología de forraje verde hidropónico

FAO (5), menciona que el forraje verde hidropónico (FVH) es una tecnología de producción de biomasa vegetal obtenida a partir del crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y crecimiento temprano de plántulas a partir de semillas viables. Este material es un forraje vivo, de alta digestibilidad, calidad nutricional y muy apto para la alimentación animal. El mismo autor indica que esta técnica consiste en la germinación de granos (semillas de cereales o de leguminosas) y su posterior crecimiento bajo condiciones ambientales controladas (luz, temperatura y humedad) en ausencia del suelo. Usualmente se utilizan semillas de avena, cebada, maíz, sorgo y trigo.

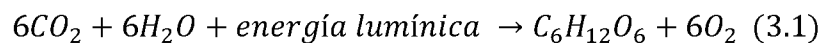
También se ha determinado que el FVH es un alimento verde (forraje vivo en pleno crecimiento), de alta palatabilidad para cualquier animal y excelente valor nutritivo. Un gran número de experimentos y experiencias prácticas comerciales han demostrado que es posible sustituir parcialmente la materia seca que aporta el forraje obtenido mediante métodos convencionales, así como también aquel proveniente de granos secos o alimentos concentrados por su equivalente en FVH por lo que ha demostrado ser una herramienta eficiente y útil en la producción animal (5).

Según Soria (16), el FVH es considerado una metodología de producción de alimento para el ganado que resulta propicia para evadir las principales dificultades encontradas en zonas áridas y semiáridas para la producción convencional de forraje. Las zonas áridas han sido consideradas como terrenos marginales para el desarrollo del sector agropecuario, siendo las razones principales para esta consideración la escasez permanente de lluvia, alta evaporación, y suelos y aguas de riego de baja calidad.

Consecuentemente según López et al. (17), la búsqueda de metodologías alternativas de producción de forraje en las cuales se considere el ahorro de agua, altos rendimientos por m² ocupado, calidad nutricional, flexibilidad en la transferencia y mínimos impactos negativos sobre el medio ambiente es de particular importancia. Considerando los puntos anteriores, se puede decir que el método FVH puede constituirse en una opción alternativa a los métodos convencionales de producción de forraje que contribuya a una actividad agropecuaria sostenible en zonas áridas y semiáridas.

3.4. Efecto de la radiación sobre la fotosíntesis

Según Castilla (18), la fotosíntesis es el proceso por el cual las plantas, usando la energía del sol, sintetizan compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas. La reacción esquemáticamente es:



Este mismo autor menciona que la fotosíntesis puede ser descrita como en el proceso en el cual se convierte la energía solar en energía química por la planta en presencia de clorofila. Esta energía química es almacenada en forma de diferentes compuestos (carbohidratos mayoritariamente, ATP y NADPH). Mediante este proceso, el carbono se fija en moléculas de carbohidratos y más tarde estas moléculas van a ser liberadas para ser usadas por la planta en la síntesis de aminoácidos, ácidos orgánicos y otros compuestos orgánicos más complejos. Todos estos compuestos son utilizados para llegar a formar parte de las estructuras de la planta contribuyendo así en la generación de biomasa (18).

La tasa fotosintética de una planta como lo indica Castilla (18) está influenciada por tres propiedades de la luz: la calidad de la luz; su intensidad y su duración. Menciona también este mismo autor que solo una fracción de la radiación solar global se usa en la fotosíntesis. Esta fracción se conoce como radiación fotosintéticamente activa (PAR). Esta tiene un rango de 400 nm a 700 nm de longitud de onda (14).

Según Berkovich (19), la radiación PAR es conocida por desempeñar roles importantes en el ciclo de vida de la planta como lo es: ser fuente de energía para la síntesis de

carbohidratos en la fotosíntesis, señal morfogénica que regula varios procesos en la planta y la conducción de reacciones bioquímicas dependientes de la luz.

Así como lo cita Castilla (18), existe una respuesta curvilínea de la fotosíntesis de las hojas a la PAR absorbida, si otros factores como el CO₂ y la temperatura no son limitantes. Es decir, estas se incrementan proporcionalmente hasta llegar a un punto en donde la fotosíntesis alcanza un máximo; este se le conoce como el punto de saturación de luz. Dentro de esta relación se concluye también que a bajos niveles de PAR, la fotosíntesis neta puede ser más baja que las pérdidas por respiración causando problemas en el desarrollo de las plantas, luego conforme se empieza a aumentar PAR, las ganancias y las pérdidas se igualan en lo que se conoce como punto de compensación de la radiación.

Bakker (20) menciona que en general, la baja intensidad de la luz es la restricción ambiental más importante para la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas, especialmente para cultivos dentro de invernaderos en la época de invierno. También el autor indica que, para doseles cerrados, la fotosíntesis no muestra alcanzar la saturación hasta intensidades de PAR de 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Sin embargo, existen indicios de que a irradiaciones extremadamente altas, la fotosíntesis neta de la hoja puede ser reducida por fotoinhibición cuando se tienen contenidos reducidos de agua en la hoja (21).

En el caso del efecto de la radiación en el desarrollo del FVH, Morgan et al. (22) encontraron que no se requiere luz para brotar (germinar) granos de cereal. Algo de luz en la segunda mitad del período de brotación fomenta un poco la fotosíntesis y el reverdecimiento de los brotes. Aunado a esto, Peer y Leeson (23) observaron que si las

plántulas crecen sin luz o con una intensidad de luz demasiado baja, la fotosíntesis es inexistente o mínima y las plántulas deben confiar en sus reservas de almidón y grasa para satisfacer su demanda de energía.

Trubey et al. (24) encontraron para semillas de avena, un incremento significativo en el peso fresco al sexto día de desarrollo para cuando estas fueron colocadas en la oscuridad (0 lux) en comparación con semillas sometidas a niveles de 800 lux debido a un efecto de etiolación de las plantas.

Refiriéndose a la materia seca (M.S.), Morgan et al. (22) encontraron poca diferencia entre los tratamientos en el contenido de M.S cuando el pasto era provisto con 1000 lux desde el día 2, 4, 6 u 8 trabajando con cebada. Trubey et al. (24) coinciden con el mismo comportamiento en el forraje producido a partir de semillas de avena. Ellos encontraron que la luz no tuvo un efecto significativo en el contenido de materia seca sometiendo el forraje a condiciones de 0 y 800 lux.

Otro de los efectos de la radiación sobre el FVH según Trubey et al. (24) se da en el porcentaje de proteína cruda. Estos autores encontraron que, para semillas de avena desarrolladas en la oscuridad, los valores de esta variable fueron significativamente más altos que cuando fueron sometidas a 800 lux. Según estos autores, como la determinación de la proteína cruda está basada en la cantidad total de nitrógeno, los contenidos más altos de proteína pueden ser resultado de la mayor cantidad de peso fresco de los germinados desarrollados en la oscuridad y, en consecuencia, más nitrógeno está siendo absorbido junto con mayor cantidad de agua.

Otra observación a resaltar la destacan Morgan et al. (22), en donde observa que el forraje provisto con luz desde el día 8 aparece con un poco atractivo color amarillo mientras que el nivel más alto de luz provocó una disminución en la altura del forraje, probablemente debido a la reducción en la etiolación.

3.5. Luz diaria integrada (LDI)

Luz diaria integrada (LDI) es la cantidad de radiación PAR recibida cada día como función de la intensidad de luz instantánea ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) y duración (día o 24 horas). La acumulación de LDI es usada eficientemente para determinar la respuesta de las plantas en cuanto a crecimiento, y por sus valores es expresada en moles de luz por metro cuadrado por día ($\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) (25).

Las plantas que crecen en condiciones limitantes de luz (baja LDI) presentan retrasos en el desarrollo reduciendo la acumulación de biomasa. El incremento en la LDI incrementa la tasa de crecimiento en diversas especies, reduciendo el tiempo de obtención de productos comercializables (26).

3.6. Consumo hídrico de las plantas

Como lo mencionan Cisneros et al. (27), la determinación del consumo hídrico por las plantas es importante en diversas áreas de la agricultura, tales como, estudios de la demanda y el manejo del riego, saneamiento agrícola, estimación de la producción y estudios hidrológicos en general. La evapotranspiración de cultivo (ET_c) está directamente relacionada a tales estudios y es definida como la cantidad de agua consumida por un determinado cultivo. Este mismo autor menciona también que la ET_c , es el resultado de dos

procesos que se presentan de forma individual, la evaporación y la transpiración. Estos actúan tanto sobre el sustrato como en el cultivo, generando la extracción de agua de estos.

Según Allen et al. (28), ET_c es la combinación de la evaporación (E), que es proveniente del suelo, y la transpiración (T), relacionada a la planta. Además de esto, el autor menciona que los procesos de evaporación y transpiración presentan a lo largo del ciclo de vida de un cultivo una relación inversamente proporcional, donde en primera instancia el proceso de evaporación cuenta con la mayoría de la cuota de la sustracción de agua, y conforme el cultivo se desarrolla pierde relevancia frente a la transpiración, llegando a ser la transpiración el proceso más importante hacia el final de ciclo de cultivo.

Tanto el proceso de transpiración como el proceso de evaporación se ven ampliamente influidos por variables ambientales como: la temperatura, la humedad relativa, la radiación incidente y la velocidad del viento, lo que permite considerar éstas variables ambientales como agentes moldeadores de la ET_c en un cultivo (29).

En un trabajo realizado por Ramírez (30), se obtuvieron valores de ET_c en maíz de 3,6, 3,1, y 5,1 l/m² en donde se aplicó nutrición nula, baja y alta respectivamente para un ciclo de 11 días de desarrollo del forraje.

3.7. Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia en el uso del agua (EUA) de las plantas menciona Medrano (31), puede entenderse de manera genérica como el volumen de agua que éstas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono

proveniente de la atmósfera (que se encuentra en forma de CO₂). De esta manera, la EUA de las plantas dependerá principalmente de dos factores: en primer lugar, de aquellas características propias de la especie y variedad que tengan relación con la capacidad de optimización de los procesos de asimilación de carbono y de evapotranspiración de agua; luego en segundo lugar, de las características del ambiente en el que crece y se desarrolla la planta. Por otra parte, continua el mismo autor, EUA también dependerá de la escala a la que se considere, ya sea a nivel de cultivo o de ecosistema.

Al-Karaki (32) encontró que el forraje producido hidropónicamente aumenta la EUA, ya que solo se necesita del 3 al 5% del agua para producir la misma cantidad de forraje en comparación con la cantidad producida en condiciones de campo. En este estudio, se descubrió que los cultivos de cebada y caupí usan agua de manera más eficiente que los otros cultivos probados ya que usaron solo 1,55 y 1,58 litros de agua, respectivamente, para producir un kilogramo de forraje verde hidropónico en comparación con 1,71, 1,80 y 1,92 litros de agua para producir un kilogramo de sorgo, trigo y alfalfa, respectivamente. Datos similares fueron reportados por Al-Karaki y Al-Momani (33).

Cuando se hace una comparación con cultivos de cebada y alfalfa cultivados en condiciones de campo, Al-Karaki y Al-Momani (33) informaron que la EUA fue de solo 14 y 12 kg de materia fresca /m³ de agua para cebada y alfalfa respectivamente mientras que en condiciones hidropónicas, se obtuvieron valores de 645 y 521 kg de materia fresca /m³ de agua en cebada y alfalfa respectivamente. Esto muestra la alta eficiencia en el uso del

agua cuando se produce forraje verde en condiciones hidropónicas en comparación con las condiciones de campo.

Ramírez (30) reporta para forraje verde hidropónico de maíz valores de uso eficiente de agua de 1,52, 1,54 y 1,43 litros de agua para producir un kilogramo de peso fresco para tratamientos con nutrición nula, nutrición baja y nutrición alta respectivamente.

3.8. Uniformidad de los sistemas de microaspersión

Según Merriam y Keller (34), una vez que se instala un sistema de riego, se deben evaluar las características hidráulicas conforme al diseño, como la presión de operación y los caudales de los emisores, de tal manera que el sistema hidráulico proporcione una uniformidad de aplicación del agua del 90%. Esto es válido para todo sistema de riego presurizado en cualquiera de sus variantes.

La uniformidad de riego o distribución según Tun et al. (35), se refiere a las especificaciones técnicas y se relaciona con la diferencia de presión. Todo sistema de riego a presión se proyecta para que la diferencia de volúmenes o láminas de riego en dos puntos extremos en una línea de aplicación no sea mayor al 10%, para una diferencia de presiones no mayor al 20%; esto garantiza que el agua suministrada tenga al menos un 90% de uniformidad.

Según Tuta (36), un parámetro principal para evaluar sistemas de riego es la uniformidad de aplicación de agua en la superficie del área irrigada, reflejándose directamente en el

manejo y desempeño del cultivo, en la calidad y cantidad de los productos, en la eficiencia del uso del agua, en el costo del riego y por tanto de la producción.

Una baja uniformidad de aplicación de agua causa crecimiento desigual de las plantas y en algunos casos contaminación del suelo con sales, lo cual repercute en la degradación del suelo (37). Esto también se relaciona con el exceso de agua en el suelo que causa lixiviación de nutrientes, reducción en la concentración de oxígeno disponible para las raíces y aumento en la incidencia de plagas y enfermedades; además, la escasez de agua aumenta los riesgos de salinización del suelo e inhibe el potencial productivo de las plantas (38).

Según Tun et al. (35), el coeficiente de uniformidad Indica el porcentaje de variación en la lámina o volumen de agua aplicado a la superficie del suelo de una unidad de riego. Oliveira (38) menciona que el primer coeficiente de uniformidad propuesto por Christiansen (1942) adoptó la desviación media como medida de dispersión (CUC), mientras que el coeficiente de uniformidad de distribución CUD propuesto por Merriam y Keller (34), considera la razón entre la media del 25 % de los menores valores de las láminas de irrigación y la lámina media recolectada. Bajos valores de CUC y CUD pueden deberse a diseños incorrectos de los sistemas de riego que limitan su desempeño y funcionamiento óptimo (36).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica ubicada en el distrito San José de Alajuela, Costa Rica (10° 01' N y 84° 16' W, 840 msnm), con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, 22°C y 78%, respectivamente.

4.1. Descripción del módulo de siembra

El módulo de producción de forraje verde hidropónico se ubica dentro del invernadero del departamento de Ambientes Protegidos de la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno. El mismo consiste en un estante de metal (perfil cuadrado) con 5 niveles de altura y subdividido en tres secciones horizontales de producción (figura 1). En total, la estructura tiene la capacidad para 100 bandejas plásticas de forraje con dimensiones de 30x55 cm (0,165 m²). Cada una de las tres secciones horizontales cuenta con su propio sistema de microaspersores accionados por 3 bombas centrífugas, estas son activadas por un mismo temporizador por lo que todo se maneja como un solo sistema de riego.

El estante tiene 2,4 m de altura y entre niveles se tiene 40 cm de separación. El primer nivel está separado 40 cm del suelo. El largo del estante es de 3,15 m y el ancho es de 1,2 m. La primera y última sección es de 0,95 m y la sección central de 1,25 m de largo. Cada lado del estante tiene una pendiente de 1% del centro hacia el exterior facilitando el escurrimiento del agua fuera de las bandejas. Toda la estructura de trabajo se encuentra protegida por una malla de sombreado verde de 70 % de transmisividad de radiación que la aísla del resto del invernadero.

4.2. Sistema de riego

Como se mencionó anteriormente, cada sección de trabajo del estante cuenta con su sistema de microaspersores propios que trabajan con diferente sistema de tuberías a las otras secciones (Figura 1) con el propósito de aplicar diferentes tratamientos de nutrición a las plantas. Los tres sistemas de riego son accionados simultáneamente por el mismo temporizador.

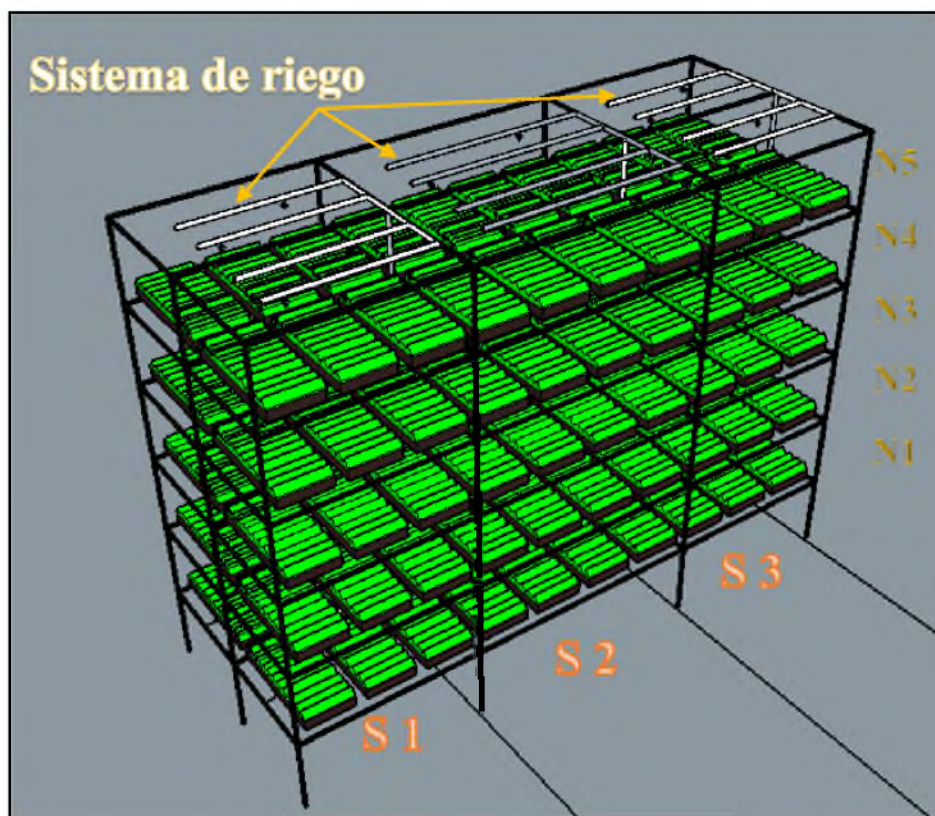


Figura 1. Estante de producción de Forraje verde hidropónico en donde N1 a N5: Nivel 1 a nivel 5 y S1 a S3: Sección 1 a sección 3.

Cada nivel por sección de trabajo cuenta con 4 microaspersores modelo Green Mist de la marca Naandanjain colocados en 4 líneas laterales de riego (polietileno) (figura 1), lo que hace un total de 20 microaspersores por sección y 12 microaspersores por nivel. Este modelo tiene un rango de caudales de 30 l/h a 40 l/h con presiones de 2 bar (200 kPa) a 3,5 bar (350 kPa) respectivamente y un diámetro de humedecimiento de 1,2 m (39). Todo el estante tiene un total de 60 microaspersores. La tubería de conducción (PVC 1,27 cm y polietileno 2,54 cm de diámetro) conecta 3 tanques de almacenamiento con los microaspersores. Cada sistema cuenta con una bomba hidráulica de 0,5 hp (372.85 W). Además, se cuenta con un filtro por sistema y una válvula reguladora de presión. En la entrada del estante, cada sistema tiene una válvula check para mantener la presión en el sistema cuando las bombas no son accionadas (Figura 2).

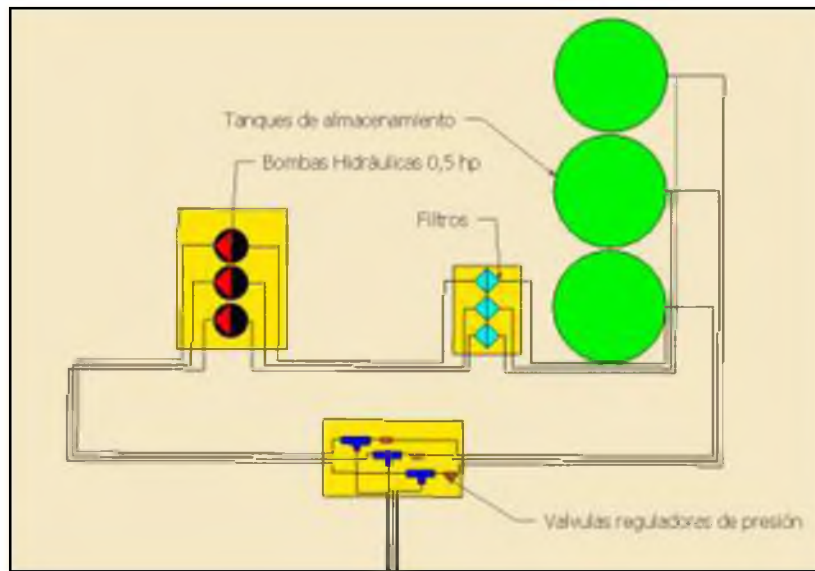


Figura 2. Diagrama Sistema de riego para cada sección del estante.



Figura 3. Componentes del sistema de riego (30).

Se observa en la figura 3, el sistema de riego se compone de: i-Tanques de almacenamiento, ii- bombas hidráulicas, iii- válvulas reguladoras de presión, iv- microaspersores y (v y vi)- sistema de tuberías de PVC y polietileno.

4.3. Material vegetal

Se utilizaron semillas de maíz (*Zea mays* L.) del genotipo Pico de Gallo. Este se adquirió de un productor de la zona de Pérez Zeledón. Este material ha sido usado en ensayos anteriores realizados por el Programa Nacional de Producción Agrícola Bajo Ambientes Protegidos (ProNAP-MAG) dentro de investigación concerniente al forraje verde hidropónico. Se reporta que este genotipo ha logrado dar buena respuesta en términos de variables de producción y calidad (F. Marín, com.Pers.).

4.4. Procedimiento experimental para siembra del FVH en todos los ensayos

Para preparar el material para cultivo se realizó un lavado del grano tres veces con agua de tubo para extraer insectos, granos flotantes y suciedad tipo polvo o fibra. Luego este se deja escurrir.

Seguido se inicia el proceso de imbibición por 6 horas en una solución de agua con cal viva ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 50 g/l.

Luego de las 6 horas de imbibición el maíz es desinfectado mediante una solución de Butrol 1 ml/L durante 2 minutos.

El siguiente paso es la siembra la cual se realiza con una densidad de siembra de 3 kg/m^2 en bandejas de $0,165 \text{ m}^2$ esparciendo bien la semilla sin que queden áreas descubiertas o cúmulos. Tapar las semillas con papel toalla de cocina para ayudar a la germinación.

La programación del riego se realizó por tiempos fijos mediante el uso de un programador (temporizador), con riegos cada 45 minutos con una duración de 20 segundos de 7:00 am a 5:30 pm. Con esto se logró mantener una adecuada humedad relativa para el FVH, evitando a su vez el exceso de humedad para el cultivo. El riego establecido se programó de esta forma debido a que se ha usado en ensayos anteriores en este mismo estante de producción mostrando buenos resultados en el desarrollo del forraje y abasteciendo las necesidades hídricas del cultivo según las condiciones climáticas características del lugar.

Durante 3 días, el grano se mantiene en proceso de germinación/emergencia para lo cual luego de la distribución el grano, se le colocó una toalla de papel para mejorar la retención de humedad y tratar de reducir la cantidad de luz incidente. Luego de este tiempo se retira la toalla de papel y se deja en desarrollo en el estante por 12 días más.

4.5. Ensayos de medición de la radiación fotosintéticamente activa.

Para determinar el efecto de la radiación sobre el desarrollo del forraje verde hidropónico, se realizaron 2 ensayos de radiación, uno en estación lluviosa y otro en estación seca. El primer ensayo se realizó del miércoles 27 de septiembre del 2017 al miércoles 11 de octubre del 2017, y el segundo ensayo se realizó del viernes 16 de marzo del 2018 al viernes 30 de marzo del 2018. Este ensayo de radiación consistió en la medición de valores

de radiación (PAR) en diferentes niveles del estante de producción bajo tres diferentes condiciones de sombreado.

Aprovechando las tres secciones en las que está dividido el estante (Figura 1), se colocó un sarán de 50 % de sombreado color negro para la primera sección, un sarán de 80% de sombreado negro para la sección central, y una sección testigo sin ningún tipo de sombreado (Figura 4). La determinación de la posición de cada nivel de sombreado en el estante se realizó de forma aleatoria. En las paredes divisoras de tratamientos, a modo de barrera lumínica, se colocó lámina plástica negra para evitar filtraciones de luz de un tratamiento a otro.

Para la medición de la radiación fotosintéticamente activa, se utilizaron 7 barras de 20 sensores PAR modelo APOgee LQS-20s ubicando 2 barras por tratamiento en los niveles 2 y 4. La séptima barra se colocó junto al estante fuera de los tratamientos, pero debajo del sarán de 70 % de sombreado que protege todo el sistema. Las barras se conectan a un registrador de datos Campbell Scientifics modelo CR10X con un multiplexor AM16/32A para aumentar la cantidad de canales para entrada de los sensores. Este se programó para el registro de datos cada 10 minutos. Adicionalmente al sistema de barras, se colocó un piranómetro APOgee para el registro de la radiación total y dos dataloggers para la medición de la temperatura y humedad relativa dentro y fuera del estante. Todo el equipo estuvo registrando datos los 15 días de desarrollo del forraje.

4.6. Diseño experimental

En el ensayo de radiación se utilizó un diseño irrestricto al azar, unifactorial, donde el nivel de sombreado correspondió a la variable dependiente, y la variable independiente al desarrollo de la especie vegetal. El módulo de producción fue dividido en tres sectores, asignando aleatoriamente uno de los 3 tratamientos para cada sector (Figura 4). Cada sector estuvo compuesto de 5 niveles, en los cuales cada nivel tuvo 2 repeticiones por nivel (Figura 4).



Figura 4. Distribución de los niveles de sombreado y ubicación de bandejas evaluadas en el sistema (Vista superior del estante), donde R (1 a 2): repetición 1 y 2 y B: barrera lumínica.

El día de la cosecha de ambos ensayos, 15 días después de la siembra, se muestrearon las 2 bandejas centrales (frontal y trasera) de cada sección en los 5 niveles como se muestran en la figura 4 en color rojo. Sobre estas bandejas de muestreo se encontraban las barras medidoras de radiación PAR. Se evaluó para cada bandeja; 1- El peso de la misma colocándola sobre una balanza electrónica marca UWE donde más tarde se les restaron a

los valores recolectados el peso de la bandeja y 2- La altura del forraje se obtuvo mediante la colocación de una regla en el fondo de la bandeja para registrar la altura observada del forraje. Por último, se obtuvieron muestras de las bandejas que se secaron mediante el uso de una estufa. A manera de criterio adicional cualitativo se evaluaron en la carpeta de raíces de las bandejas muestreadas los siguientes parámetros: olor a fermentación (si/no) mediante el sentido del olfato, oxidación de carpeta de raíces (20%-40%-60%-80%-100%) mediante observación y presencia de textura jabonosa (si/no) de forma manual. Luego de 8 días, las muestras en la estufa fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Productos Animales y Vegetales de la Universidad Nacional de Costa Rica para la realización de exámenes bromatológicos en donde se solicitaron pruebas de contenido de materia seca (105 °C), proteína cruda, fibra neutro detergente y contenido de lignina. Con el propósito de homogenizar por nivel, las 2 muestras recolectadas se unificaron de manera que se envió una sola muestra por nivel en cada tratamiento. Los resultados obtenidos se sometieron a un análisis de varianza mediante una prueba de Tukey ($P < 0,05$).

4.7. Determinación de la evapotranspiración del FVH

Se realizaron dos ensayos de uso del agua del forraje verde hidropónico, el primero en estación lluviosa realizado del miércoles 27 de noviembre al miércoles 12 de diciembre del 2017 y el segundo ensayo del martes 27 de febrero al martes 13 de marzo del 2018.

Se colocó un plástico transparente fijado con pegamento a la base del estante por debajo del primer nivel para poder recolectar el agua filtrada de las bandejas luego de cada riego. Un segundo sistema de plásticos fue colocado alrededor del estante para la captura del agua por

deriva. Toda el agua filtrada y por deriva se recolecta en una serie de baldes colocados en agujeros en la tierra cerca del estante de siembra. Para conducir el agua recolectada de los plásticos hacia los baldes, estos se interconectaron mediante la colocación de tubos de PVC (7,62 cm de diámetro) para llevar por medio de gravedad el líquido filtrado (Figura 5).

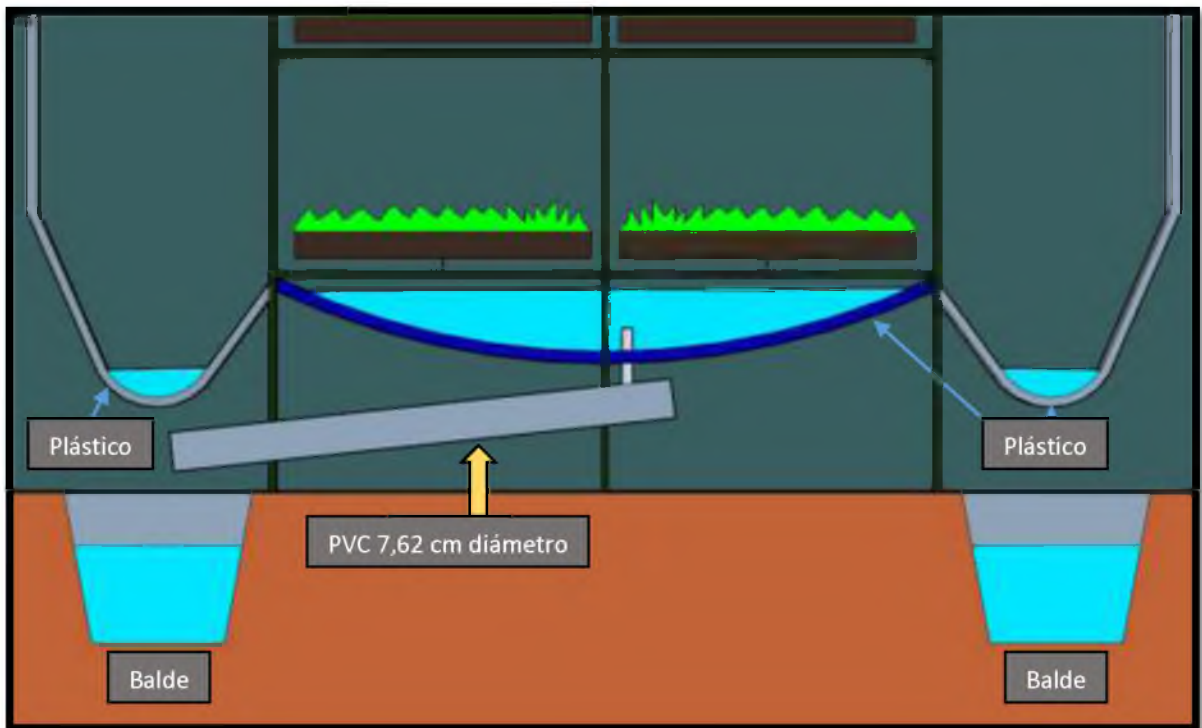


Figura 5. Sistema de recolección de agua filtrada y pérdidas laterales. Vista lateral del estante de producción.

Diariamente se recolectó el agua de los baldes. Se determinó la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) diariamente, a partir de un balance de agua en el sistema (Ecuación 2).

$$ET_c = R - D - PL \quad (4.1)$$

Dónde R y D fueron los volúmenes de riego y drenaje (l/m^2d) para dicho período, respectivamente, y PL correspondió a las pérdidas laterales de agua (l/m^2) en los bordes por deriva o debido al diámetro de cobertura de los micro aspersores según el procedimiento empleado en Soto (2013) citado por (30).

El día de la cosecha de ambos ensayos se siguió la misma metodología de muestreo para los ensayos de radiación tomando en cuenta que solo se requería el peso fresco promedio por bandeja por lo que se pesaron 30 bandejas correspondientes a las 2 bandejas centrales por nivel en cada sección del estante (Figura 4).

Estos ensayos fueron utilizados también para determinar la eficiencia en el uso del agua (EUA) por parte del FVH. La fórmula utilizada para obtener el EUA según la metodología usada por Al-Karaki (32):

$$EUA = \frac{\text{Total FVH producido (kg)}}{\text{Total de agua usada (l)}} \quad (4.2)$$

4.8. Evaluación del sistema de microaspersión

4.8.1. Presiones del sistema

Mediante el uso de un manómetro de aguja se midieron las presiones de los 3 sistemas de riego del sistema al final de cada línea de microaspersores. Esto se realizó en cada nivel del estante para los 3 sistemas.

4.8.2. Caudales del sistema

Se tomaron medidas de caudales de todos los aspersores del sistema mediante el uso de bolsas plásticas para la recolección del agua aplicada en un intervalo de tiempo de 20 segundos de riego.

4.8.3. Uniformidad de lámina aplicada de riego

Por nivel se colocó un set de 36 vasos de plástico en un arreglo de 9x4, se dejó caer un riego de 20 segundos y la lámina recolectada en cada recipiente se registró. Con los datos de lámina de riego recolectados se obtuvo el coeficiente de uniformidad (CUC) y el coeficiente de uniformidad de distribución (CUD) mediante las siguientes fórmulas:

$$CUC = 100x \left(1 - \frac{\sum Y}{mxn} \right) \quad (4.3)$$

Donde

- Cu: coeficiente de uniformidad (%).
- $\sum Y$: Suma de las diferencias entre la cantidad de agua caída en cada sitio de observación y el promedio de agua caída durante el tiempo de observación, (mm).
- m: Promedio de la cantidad de agua caída en los sitios o puntos de observación (mm).
- n: Número de puntos de observación.

$$CUD = \frac{x_{25}}{m} \quad (4.4)$$

Dónde:

- CUD: coeficiente de uniformidad de distribución (%).
- X_{25} : Lámina promedio del agua recogida en el 25% de los recipientes con menor cantidad de agua (mm).
- m: Pluviométrica media observada en el coeficiente de uniformidad (100% de los datos mm).

Con los datos de láminas de riego se realizó un mapeo mediante el programa Surfer 13.6.618 (Golden Software) con la finalidad de poder visualizar mejor el comportamiento de la lámina de riego aplicada en cada uno de los niveles del estante.

4.9. Modificaciones en el sistema de riego

Se realizaron entonces una serie de cambios con el propósito de lograr una mejora tanto en la uniformidad de la descarga como en la uniformidad de la lámina de riego aplicada por el sistema de riego. Se realizó un lavado de tuberías con una solución de yodo y cloro con el fin de deshacer cúmulos de sales depositadas en las tuberías con el paso del tiempo. Se hizo un lavado de filtros, se realizó un cambio de emisores en los casos donde los emisores presentaban los caudales emitidos menores y se realizó un reacomodo en la dirección de descarga de los aspersores pues se observó que muchos estaban direccionados hacia el exterior del estante lo que provocaba un desperdicio en el caudal emitido debido a su extenso diámetro de humedecimiento (39).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Ensayos de radiación

5.1.1. Análisis de resultados del ensayo de radiación 1 (Estación lluviosa)

Para este ensayo se evaluaron las siguientes variables de producción del forraje verde hidropónico; altura, peso fresco (P.F.) y materia seca (M.S.) (Tabla 1). Estas se tomaron el día de la cosecha del ensayo luego de haberse sometido las bandejas con las semillas de maíz a 15 días de desarrollo en el estante.

Tabla 1. Resultados de cosecha de forraje verde hidropónico en ensayo de radiación 1.

Sombreo	Altura (cm)	P.F (kg/m ²)	M.S %
Testigo sin sombreado	23,4 A	12,1 A	7,74 A
50% de sombreado	23,6 A	11,2 B	7,66 A
80% de sombreado	25,6 B	11,5 AB	7,17 A
CV	3,83	5,35	0,7
Valor p	< 0,0001	0,0157	0,3516
Medias con letras distintas son significativamente distintas			

Como se muestra en la tabla 1, los promedios de las alturas en los diferentes porcentajes de sombreado rondan entre los 23,4 cm y los 25,6 cm. El tratamiento del sombreado de 50% no tuvo diferencia significativa con respecto al tratamiento testigo. Mientras que el tratamiento con un 80% de sombreado sí presentó diferencias significativas con respecto a los otros 2

tratamientos. Las alturas obtenidas en este experimento concuerdan con las alturas obtenidas según Müller (40) en donde se obtuvieron rangos de 20 a 33 cm de altura en un correspondiente intervalo de cosecha de 10 a 20 días. Sin embargo para este trabajo citado, se utilizó una semilla de distinta variedad y el forraje fue sometido a una dosis de nutrición. El peso fresco dio cifras que van de los 11 a los 12 kg/m². El tratamiento testigo tuvo diferencias significativas con el tratamiento de 50 % de sombreo y no las tuvo con el tratamiento de 80 % de sombreo. Luego el tratamiento de 80% de sombreo no tuvo diferencias con respecto al tratamiento de 50 %. En general si se compara el rendimiento de kg por m² con el trabajo realizado por Ramírez (30), en donde se utilizó maíz de la variedad “Diamantes 8843” y se le aplicó nutrición al forraje, se ve una disminución de al menos 3 kg menos por m². Esto pudo haber ocurrido debido a que la semilla adquirida para este experimento presentaba ya algún grado de deterioro en su vigorosidad por el largo tiempo de almacenaje al que se había sometido, cercano a los 6 meses lo que además provocó que el maíz presentara insectos que se alimentan de los granos dañándolos y evitando que estos germinen. Además, la etapa de imbibición el cual debe realizarse con cal viva (óxido de calcio), se realizó con cal común, hidróxido de calcio, debido a un error del proveedor al brindar el producto equivocado el cual se usó en el proceso de imbibición sin haberse corroborado que era el incorrecto, la cual tiene un menor efecto debilitante de la cáscara de la semilla de maíz lo que dificulta la germinación de la misma.

En relación con el contenido de materia seca (M.S.), no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. Para este parámetro se obtuvieron valores que van

desde el 7,17 % al 7,74 %. Según la literatura revisada, se reportan valores de 12,4 % por Osorno (41). En otro trabajo realizado por Rivera et al. (42) en donde el maíz fue plantado en un ambiente de iluminación deficiente, se reportan valores de 16 % a 18 % de M.S. y Ramírez (30) obtuvo valores que van de 8,2 % a 9 % de M.S. En general los valores obtenidos en esta investigación son menores a la literatura citada, esto puede deberse según Osorno (41) y Rivera et al. (42), al uso de variedades diferentes ya que este parámetro se encuentra regido por control genético y es intrínseco de cada especie vegetal.

Tabla 2. Resultados análisis bromatológico ensayo de radiación 1.

Sombreo	PC %	FDN %	Lignina %
Testigo sin sombreado	14,99 A	29,00 A	4,19 A
50% de sombreado	14,59 A	29,97 A	3,38 B
80% de sombreado	15,31 A	29,14 A	3,50 AB
CV	5,04	6,72	11,44
Valor p	0,3535	0,7114	0,0214
Medias con letras distintas son significativamente distintas			

La tabla 2 muestra los resultados bromatológicos del ensayo de radiación 1 para las variables porcentaje de proteína cruda (PC), porcentaje de fibra detergente neutro (FDN) y porcentaje de lignina en base seca de las muestras de forraje enviadas al laboratorio. En el caso de la PC, se observa que no se presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos. Estos valores obtenidos son similares a los reportados en la literatura donde se tiene 12,23

% y 15,04 % según Salas et al. (43) para maíz forrajero con fertilización orgánica y 16,28% según Herrera et al. (44) con maíz forrajero y fertilización convencional.

En el contenido FDN, tampoco hubo diferencias significativas entre tratamientos. Los valores obtenidos rondan el 29 %. En el mismo trabajo realizado por Salas et al. (43) los valores de FDN fluctuaron entre el 38 y el 43 %. Este autor menciona que los mayores valores se dan para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilización y los menores valores para los que solo se les aplicó agua, tal y como fue el caso de este experimento donde solo se regaba con agua. Herrera et al. (44) mencionan que valores superiores al 55% de FDN dificultan la digestibilidad del forraje, limitando el aprovechamiento eficaz del contenido calórico del producto, por lo que se puede indicar que el FVH producido con el procedimiento aplicado se encuentra dentro de los límites aceptables de FND.

En cuanto al porcentaje contenido de lignina para las muestras de FVH se observa en la tabla 2 que el tratamiento testigo no tiene diferencias con respecto al tratamiento de sombreado al 80 %; sin embargo, sí presenta diferencias con el tratamiento de sombreado al 50 %. Mientras que el tratamiento 80 % no presenta diferencias significativas con respecto al tratamiento de 50 %. La lignina es un material indigestible, siendo su mayor implicación el hacer menos aprovechables a componentes como celulosa o hemicelulosa cuando está asociada con ellos. Herrera et al. (44) y Soto et al. (45) mencionan que niveles mayores al 5 % de contenido de lignina empieza a generar una reducción notoria en la digestibilidad de alimentos para animales. Los porcentajes en el contenido de lignina obtenidos en este ensayo son menores a los resultados presentados por Vargas (46) donde se obtuvieron

valores de 7,67 % para el caso del forraje verde hidropónico a base de maíz lo que implica una mayor digestibilidad del FVH; esto podría deberse a diferencias en las condiciones bajo las que se desarrolló el experimento.

5.1.2. Resultados de niveles de Radiación fotosintéticamente activa sobre el forraje en estación lluviosa.

Para la presentación de los niveles de radiación fotosintéticamente activa en los tratamientos del forraje se obtuvieron los valores de luz diaria integrada (LDI). En la figura 6 se presentan los valores promedio de luz diaria integrada que se obtuvieron en el sistema en las diferentes ubicaciones donde se colocaron las barras registradoras de radiación fotosintéticamente activa durante los 15 días de crecimiento del forraje. Además de esto se presentan los valores LDI de una estación ubicada dentro del invernadero y fuera del invernadero. Se observa también cómo se comporta el gradiente de radiación cuando esta se traslada del exterior del invernadero a donde se ubican las bandejas con el maíz sembrado en donde evidencia una disminución importante de los valores LDI conforme se aumenta el nivel de sombreado en cada localidad. Inclusive se puede observar que esta variable puede modificarse según se encuentre en niveles inferiores o superiores del estante, aunque estos se encuentren bajo el mismo sárán, esto debido a que los niveles superiores del estante se encuentran mayormente expuestos a la radiación solar que los niveles inferiores lo que implica una disminución de los valores DLI conforme bajamos el nivel de siembra en el estante. Junto con el valor promedio se observa también los valores máximos y mínimos registrados en cada localidad. Al observar estos valores tanto en el interior del estante como

en el exterior, se observa un efecto de homogenización de la cantidad de radiación diaria. Esto se debe al efecto propiamente de los saranes colocados donde controlan la entrada de energía evitando niveles muy altos de radiación. De León (38) menciona que una de las funciones de las mallas de sombreo es la de limitar los efectos extremos del clima provocados por exceso de viento y luz en los cultivos.

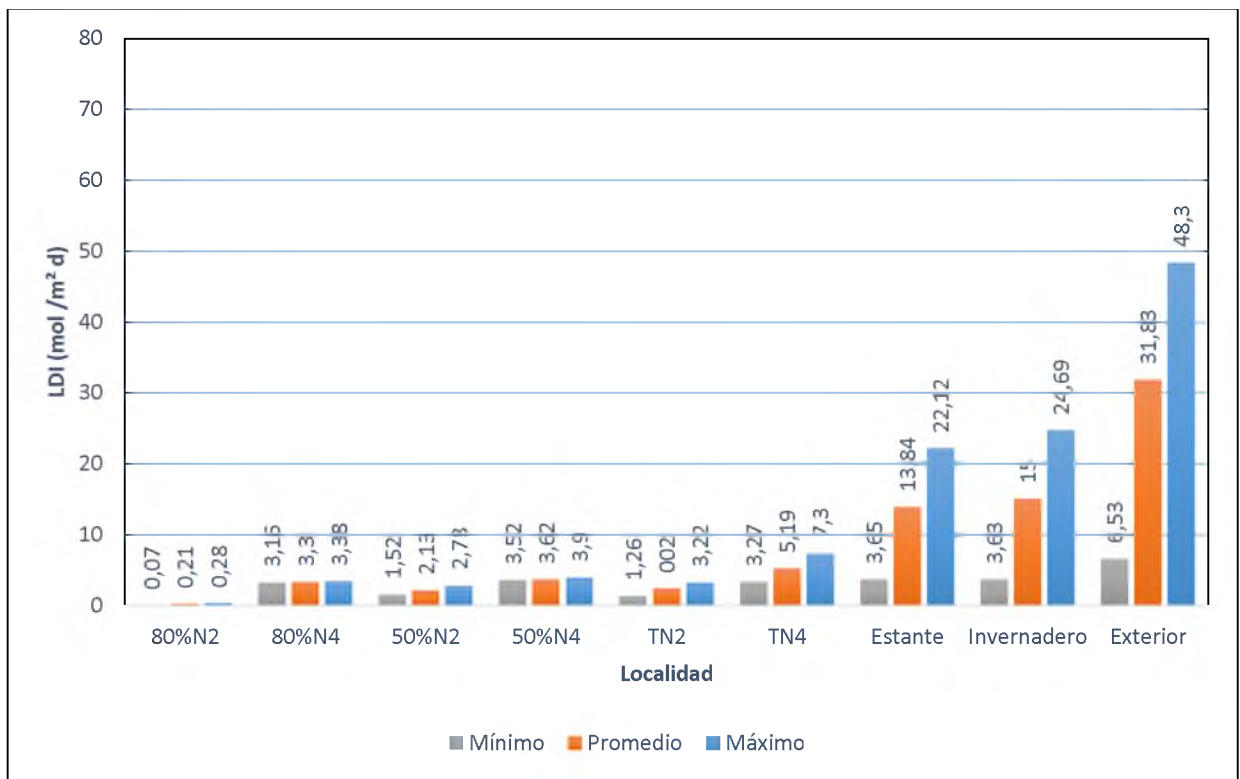


Figura 6. Valores LDI promedio, máximos y mínimos, en ensayo de radiación durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreo 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreo 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior), realizado en estación lluviosa.

Al relacionar los valores de radiación de la figura 6 y la altura de forraje de la tabla 1 se observa que esta última fue favorecida al tener menores niveles de radiación, esto puede verse ligado según Sánchez et al. (48) y Morgan et al. (22), a un efecto de etiolación por parte de las plantas de maíz. Ellos afirmaron que se observa un aumento en la altura promedio del forraje cuando se encuentra con niveles bajos de radiación lo que provoca una mayor altura de planta por efecto de elongación celular.

Para el rendimiento en peso fresco, se observa mejoría en el caso del tratamiento sin sombreado esto puede deberse a un aumento de los niveles de radiación fotosintéticamente activa. Como menciona Castilla (18); una de las finalidades de la fotosíntesis es la producción de biomasa en las plantas. Este autor menciona que existe una respuesta curvilínea de la fotosíntesis de las hojas a la PAR absorbida, si otros factores como el CO₂ y la temperatura no son limitantes. Es decir, estas se incrementan proporcionalmente hasta llegar a un punto en donde la fotosíntesis alcanza un máximo; este se le conoce como el punto de saturación de luz.

El análisis estadístico aplicado a la variable % M.S. aportó resultados sin diferencias significativas entre los métodos de cultivo. En un trabajo realizado por Rivera et al. (42) se menciona que los porcentajes de M.S. no se afectan drásticamente por factores externos y ambientales, ya que, este parámetro se encuentra regido por control genético y es intrínseco de cada especie vegetal. Esto explicaría por qué el nivel de radiación no afectó esta variable.

Dentro de los análisis bromatológicos, la única variable que se vio afectada fue la lignina. Esta aumentó en el tratamiento donde también presentaron mayores niveles de radiación sin embargo se mantuvo dentro de los niveles aceptables de esta variable de manera que no se afecte la digestibilidad de la misma como se menciona anteriormente según Soto et al. (45).

5.1.3. Análisis de resultados del ensayo de radiación 2 (Estación seca)

Para este ensayo también se evaluaron las siguientes variables de producción del forraje verde hidropónico; altura, peso fresco (P.F.) y materia seca (M.S.) (Tabla 1). Estas se tomaron el día de la cosecha del ensayo luego de haberse sometido las bandejas con las semillas de maíz a 15 días de desarrollo en el estante.

Tabla 3. Resultados de cosecha de ensayo de radiación 2.

Tratamiento	Altura (cm)	P.F (kg/m2)	M.S %
Test	20,3 A	19,3 A	6,15 A
50%	22,3 B	19,8 A	7,56 A
80%	23,2 B	18,7 A	7,57 A
CV	4,95	5,44	1,18
Valor p	<0,0001	0,0763	0,1022
Medias con letras distintas son significativamente distintas			

Como se muestra en la tabla 3, los promedios de las alturas en los diferentes porcentajes de sombreo rondan entre los 20,3 cm y los 23,2 cm. En este caso el tratamiento del sombreo

de 50% no tuvo diferencia significativa con respecto al tratamiento de 80 %. Mientras que el tratamiento testigo sí presentó diferencias significativas con respecto a los otros 2 tratamientos. Las alturas obtenidas en este experimento también concuerdan con las alturas obtenidas según Müller (40) en donde se obtuvieron rangos de 20 a 33 cm de altura. Sin embargo, para este trabajo citado, se utilizó una semilla de distinta variedad y el forraje fue sometido a una dosis de nutrición. Disminuciones relativas en la altura pueden deberse a la ausencia de aplicación de nutrición a las plantas, esto concuerda con Ramírez (30) en donde encontró mayores alturas en tratamientos de forraje con aplicación de nutrición y menores alturas en tratamientos en ausencia de esta usando maíz de la variedad “Diamantes 8843”. Se obtuvo un peso fresco entre los 18,7 a los 19,8 kg por m². En este caso el tratamiento 50 % fue el que presentó mejores resultados en comparación con los otros tratamientos, pero las diferencias fueron no significativas.

En el caso de la M.S. tampoco hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Para este parámetro se obtuvieron valores que van desde el 6,15 % al 7,57%. De nuevo estos valores son menores a los encontrados en la literatura según Osorno (41), Rivera et al. (42) y Ramírez (30). Esto puede deberse según estos mismos autores citados, al uso de variedades diferentes ya que este parámetro se encuentra regido por control genético y es intrínseco de cada especie vegetal.

Tabla 4. Resultados análisis bromatológico ensayo de radiación 2.

Tratamiento	PC %	FDN %	Lignina %
Test	13,43 A	34,16 A	4,02 A
50%	14,08 A	35,12 A	2,67 B
80%	14,27 A	33,12 A	3,42 AB
CV	6,02	6,00	14,26
Valor p	0,2925	0,3358	0,0029
Medias con letras distintas son significativamente distintas			

Como se muestra en la tabla 4, en el caso de la proteína cruda, se observa que al final de la cosecha no se presentaron diferencias entre tratamientos. Los valores reportados en la literatura son de 12.23 % y 15.04 % según Salas et al. (43) y 16.28% según Herrera et al. (44). Hay semejanza con los valores obtenidos en este ensayo.

En el caso de la fibra neutro detergente, no hubo diferencias significativas entre tratamientos. Los valores de FND en este trabajo rondan entre el 33,12 y el 34,16 %. En el mismo trabajo realizado por Salas et al. (43) los valores de FND fluctuaron entre el 38 y el 43 %. Este autor menciona que los mayores valores de esta variable se dan para los tratamientos a los cuales se les aplicó fertilización y los menores valores para los que solo se les aplicó agua, tal y como fue el caso de este experimento. En cuanto al porcentaje de lignina para las muestras de FVH se observa en la tabla 4 que el tratamiento testigo no tiene diferencias con respecto al tratamiento de sombra al 80 % sin embargo sí presenta

diferencias con el tratamiento de sombreo al 50 %. Mientras que el tratamiento 80 % no presenta diferencias significativas con respecto al tratamiento de 50 %. El porcentaje en el contenido de lignina concuerda con los resultados presentados según Vargas (46) donde se obtuvieron valores de 7,67 % para el caso del FVH a base de maíz.

5.1.4. Resultados de niveles de Radiación fotosintéticamente activa sobre el forraje en estación lluviosa.

En la figura 7 se tienen los valores de LDI promedio obtenidos en este caso para el ensayo de radiación realizado en estación seca. En este también se puede observar cómo cambia el gradiente de radiación conforme esta se va adentrando a las partes internas del estante de producción lo que evidencia una disminución importante de los valores LDI conforme se aumenta el nivel de sombreo en cada localidad. De nuevo se puede notar como varían los valores de un nivel a otro, aunque estos se ubiquen dentro del mismo tratamiento, es decir, hay variaciones en la radiación PAR entre niveles inferiores y superiores de un mismo nivel de sombreo debido a que los niveles superiores del estante se encuentran mayormente expuestos a la radiación solar que los niveles inferiores lo que implica una disminución de los valores DLI conforme bajamos el nivel de siembra en el estante.

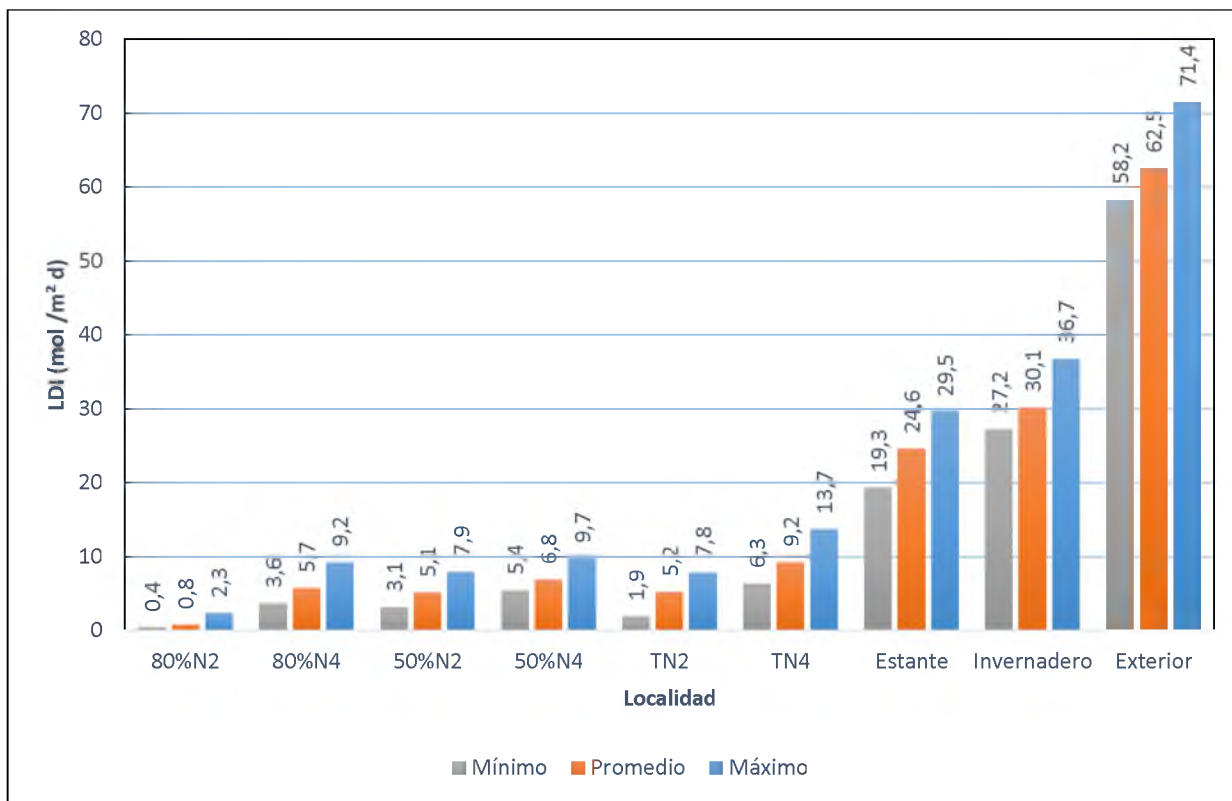


Figura 7. Valores LDI promedio, máximos y mínimos, en ensayo de radiación durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreado 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreado 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior), realizado en estación seca.

Se ve en los resultados de cosecha de la tabla 3 que la variable altura se vio favorecida en el tratamiento con menor cantidad de radiación, el cual corresponde al tratamiento con 80 % de sombreado. Esto puede deberse de nuevo, según Sánchez et al. (48) y Morgan et al. (22), a un efecto de etiolación por parte de las plantas de maíz como se mencionó anteriormente en el análisis del ensayo de estación lluviosa.

Para la variable de peso fresco no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de

sombreo. Esto puede deberse a que la actividad fotosintética en germinados es mínima por lo que la formación de biomasa por parte de este proceso no es significativa si se compara con la generación de biomasa por parte de las reservas de la semilla. Esto concuerda con Peer y Leeson (23), que mencionan que el desarrollo de germinados depende más de sus reservas de almidón y grasa que de su actividad fotosintética, ya que esta es mínima en esta etapa de desarrollo.

El análisis estadístico aplicado a la variable % MS, aportó también resultados sin diferencias significativas entre los métodos de cultivo en estación seca. Esto cual vuelve a afirmar lo mencionado por Rivera et al. (42) y Osorno (41), que explican que los porcentajes de MS no se afectan drásticamente por factores externos y ambientales, ya que, este parámetro se encuentra regido por control genético y es intrínseco de cada especie vegetal.

En cuanto a los resultados de los análisis bromatológicos, de nuevo la única variable afectada, fue el porcentaje de lignina en donde se observa un incremento de la misma para tratamientos con mayor cantidad de radiación. Según Herrera et al. (44) y Soto et al. (45) aún sigue dentro del límite en donde no se generarán problemas en la digestibilidad de FVH.

5.1.5. Comparación entre estaciones seca y lluviosa

Tabla 5. Comparación estadística entre resultados promedio de todos los tratamientos de estación lluviosa y seca.

Variables						
Estación	Altura (cm)	P.F (kg/m²)	M.S %	PC	FDN	Lignina
E. Lluviosa	24,2 A	11,63 A	7,52 A	14,97 A	29,37 A	3,69 A
E. Seca	21,93 B	19,33 B	7,09 A	13,93 B	34,14 B	3,37 A
C.V	6,46	6,02	13,44	5,62	6,24	18,06
Valor p	<0,0001	<0,0001	0,2419	0,0015	<0,0001	0,1831
Medias con letras distintas son significativamente distintas						

En la tabla 5 se resumen los resultados en promedio de todos los tratamientos de ambos ensayos realizados en estación seca y lluviosa comparados estadísticamente. Para la variable altura se observa una diferencia significativa entre estaciones. Esta variable se ve favorecida en la estación lluviosa lo cual puede deberse a una disminución en la radiación lo que provocaría un aumento en la etiolación de las plantas Morgan et al. (22).

La variable de rendimiento en peso fresco por metro cuadrado también presenta un cambio considerable entre estaciones. Sin embargo, es importante notar que los valores de peso fresco reportados en el ensayo de la estación lluviosa no tienen un comportamiento lógico según la cantidad de radiación recibida, es decir, no se puede afirmar que el peso fresco

tiene un comportamiento proporcional o inversamente proporcional a la cantidad de LDI registrada, mientras que para la estación seca no hubo diferencias significativas entre tratamientos para la variable de peso fresco por lo que es probable que la radiación no tenga un efecto en la producción peso fresco en el forraje verde hidropónico. Esto concuerda con Peer y Leeson (23), donde mencionan que el desarrollo de germinados depende más de sus reservas de almidón y grasa que de su actividad fotosintética, ya que esta es mínima en esta etapa de desarrollo. Por lo tanto, las diferencias significativas en el rendimiento de peso fresco presentadas entre tratamientos realizados en la estación lluviosa y estación seca, pudieron haber sido causadas en general por: 1- pérdidas en la vigorosidad de las semillas por largo tiempo de almacenaje y daños físicos causados por presencia de plagas detectadas en el grano Mendoza et al (49) y 2- problemas en la geminación debido al uso de hidróxido de calcio en lugar de óxido de calcio.

Con la materia seca no se presentan diferencias significativas entre estaciones. Lo cual coincide con los resultados de Morgan et al. (22) y Trubey et al. (24). Lo cual vuelve a afirmar lo mencionado por Rivera et al. (42) y Osorno (41) en tanto que los porcentajes de MS no se afectan por factores externos y ambientales, ya que, este parámetro se encuentra regido por control genético y es intrínseco de cada especie vegetal.

La PC sí presenta diferencias significativas y se ve desfavorecida en la estación seca. Esto puede deberse a un aumento de la biomasa por mayor vigorosidad de la semilla lo que provocaría según Acosta et al. (50), un rápido desarrollo de los órganos estructurales, por lo

que el nitrógeno se desplaza a las partes más jóvenes disminuyendo así la fracción de biomasa activa y a la vez promoviendo una dilución del N en la planta.

La FDN también presenta diferencias significativas entre estaciones viéndose favorecida en la estación seca. Explica Sawan et al. (51) que la FDN corresponde a la fracción química del material estructural de las células vegetales. Por lo tanto, si se tiene una mayor producción de biomasa, tal como es el caso de la estación seca, que genere una mayor cantidad de células, consecuentemente se aumentarían los materiales estructurales celulares compuestos por la FDN.

Para la variable lignina, no hubo diferencias significativas por lo que la digestibilidad del forraje no se vio afectada al cambiar la estación de siembra.

Como se puede observar en la figura 8 se tienen graficados los valores LDI promedio de todas las localidades para los ensayos realizados en estación seca y lluviosa. La figura 9 además presenta los niveles de energía acumulados en el total de los 15 días de siembra del forraje también para ambas estaciones en donde se realizó el ensayo de radiación. Observando estas figuras es notable el aumento de los valores de radiación en la estación seca con respecto a la lluviosa. Estas tienen un aumento de casi 2 veces los valores obtenidos en estación lluviosa tanto para los valores DLI como para los niveles acumulados de energía.

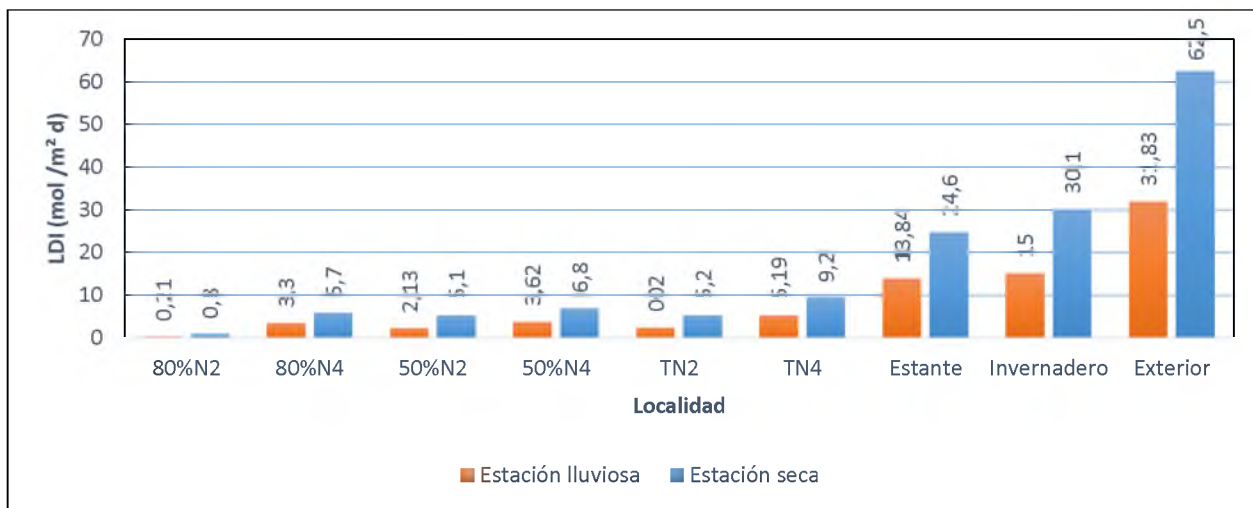


Figura 8. Valores LDI promedio de ensayos de estación seca y lluviosa durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreado 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreado 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior).

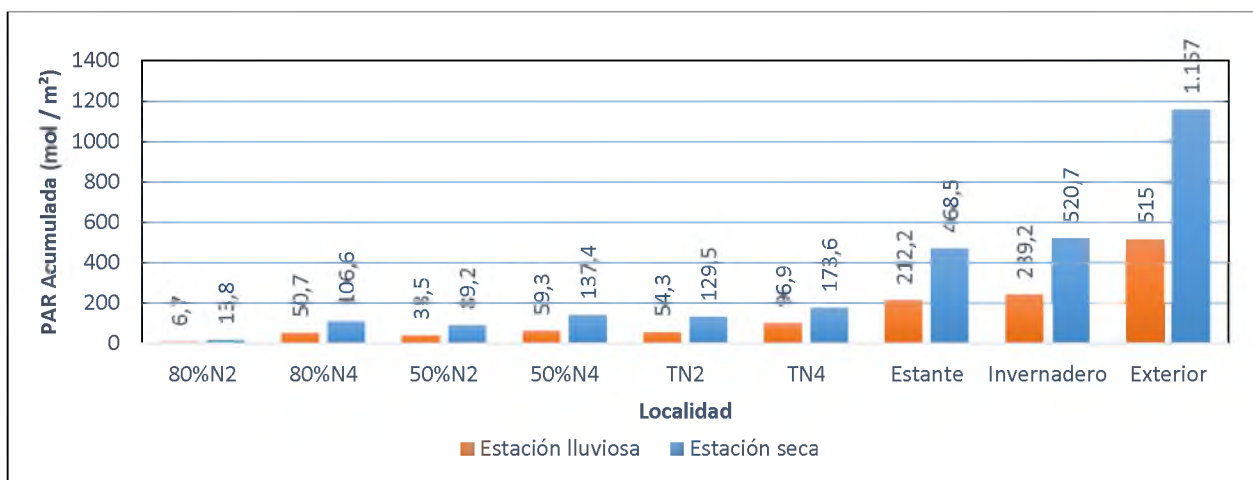


Figura 9. Niveles de radiación fotosintéticamente activa acumulada durante los 15 días de desarrollo del forraje en las ubicaciones de los tratamientos: sombreado 80 % en niveles 2 y 4 (80%N2 y 80%N4), Sombreado 50 % en niveles 2 y 4 (50%N2 y 50%N4), testigo nivel 2 y 4 (TN2 y TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior).

TN4), a un metro del estante (Estante), dentro del invernadero (Invernadero) y fuera del invernadero (Exterior) para las estaciones seca y lluviosa.

Los niveles de LDI registrados en este trabajo van desde los 0,21 a 9,2 mol/m²d (figura 8). Esto traduciéndolo en términos de luz PAR se obtiene un rango de 2,4 a 106,4 μmol/m²s. En un trabajo realizado por Bures et al. (52) en donde realizó una serie de ensayos con granos de cereales para determinar las intensidades en las que el forraje se desarrollaba mejor, se encontró que el rango óptimo va de 40 a 100 μmol/m²s lo cual se asemeja al rango registrado en esta investigación excepto en la evidente disminución del valor del límite inferior registrado para este trabajo. En términos de radiación PAR acumulada de obtuvieron valores de los 6,7 a los 173,6 mol/m² en las diferentes localidades del estate de producción como se observa en la figura 9.

5.2. Evapotranspiración en el desarrollo de FVH

La tabla 6 muestra todas las entradas y salidas de agua al sistema durante los 15 días de desarrollo del FVH para las 2 estaciones en donde se realizaron los ensayos para la determinación de la evapotranspiración.

Tabla 6. Balance Hídrico en el sistema de producción de FVH durante los 15 días de desarrollo del forraje.

Parámetro	Estación lluviosa	Estación seca
Entradas (l/m²)		
Riego	124,31	121,58
Salidas (l/m²)		
Drenaje + Pérdidas laterales	73,28	68,53
Evapotranspiración (l/m²)		
ET _c (14 días)	51,03	53,05
ET _c (diaria)	3,40	3,54

Los valores de ET_c medidos coinciden con los valores obtenidos por Ramírez (30) en donde se obtuvieron valores de 3,6 a 5,1 l/m²d para forraje producido a partir de maíz.

Se puede observar un incremento de la evapotranspiración en la estación seca con respecto a la estación lluviosa lo que refleja un mayor consumo de agua para esta estación. Esto puede deberse según López et al. (29), a que tanto el proceso de transpiración como el proceso de evaporación que conforman la ET_c, se ven ampliamente influenciados por variables ambientales como: la temperatura, la humedad relativa, la radiación incidente y la velocidad del viento, lo que permite considerar estas variables ambientales como agentes modificadores de la ET_c en un cultivo.

Castilla (18) explica que para la estación de verano se tiene un aumento en los niveles de radiación, déficit de presión de vapor y temperatura, lo que aumentaría los procesos de evaporación y de transpiración en las plantas.

El gráfico de la figura 10 muestra los cambios en la evapotranspiración del forraje lo cual evidencia como ocurren variaciones conforme avanzan los días de desarrollo.

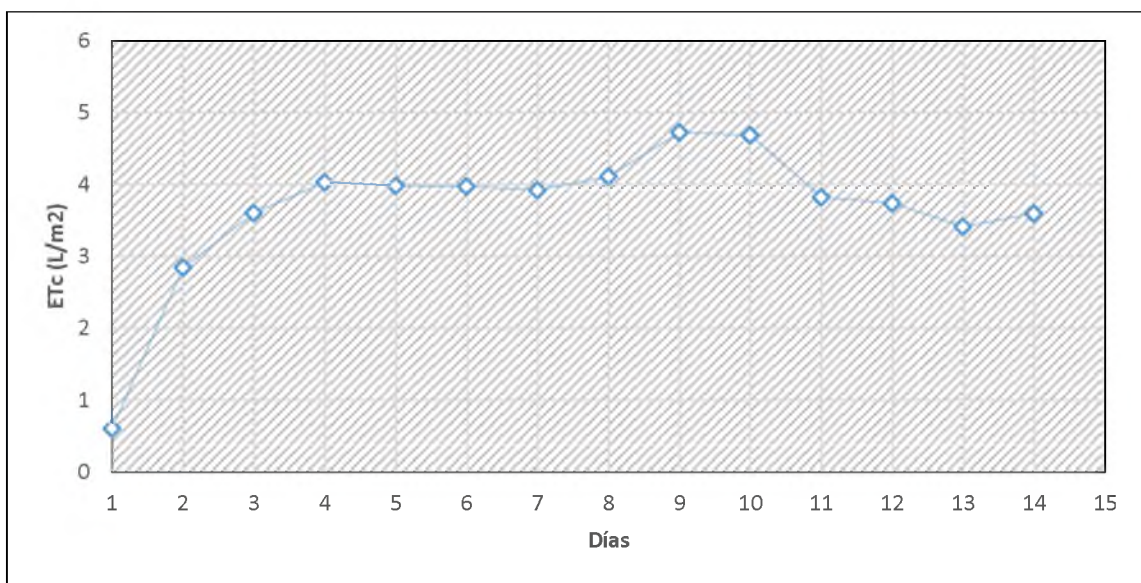


Figura 10. Variaciones en la evapotranspiración del FVH por día en estación lluviosa.

En general se puede ver cómo en un inicio se tienen los menores valores de evapotranspiración ya que la mayoría del material que se tiene en las bandejas son semillas que no transpiran, aunque si se tiene presente una actividad evaporativa del agua circundante en el medio lo cual contribuye al valor de evapotranspiración establecido. Esto coincide con Allen et al. (28), donde mencionan que los procesos de evaporación y transpiración presentan a lo largo del ciclo de vida de un cultivo una relación inversamente

proporcional, donde en primera instancia el proceso de evaporación cuenta con la mayoría de la cuota de la sustracción de agua, y conforme el cultivo se desarrolla pierde relevancia frente a la transpiración, llegando a ser la transpiración el proceso más importante hacia el final de ciclo de cultivo.

Conforme el follaje y el sistema de raíces del forraje empiezan a desarrollarse, a partir del octavo día se nota un importante incremento de esta variable hasta llegar al punto máximo de consumo. Luego de este punto hay una disminución del consumo de agua el cual llega a un mínimo y de ahí se mantiene estable hasta el día 15 de la cosecha.

Esta tendencia de disminución en evapotranspiración puede deberse a 2 factores. Primero, el forraje en los últimos días de crecimiento, logra desarrollar una cobertura que permite mantener un ambiente fresco en el interior de las bandejas. Esto provoca un aumento de la humedad relativa interna del sistema el cual puede apreciarse en la figura 11 donde se tiene graficados los valores de humedad relativa externos e internos al estante de producción. Este gráfico deja ver cómo conforme pasan los días, la humedad relativa aumenta en el sistema hasta llegar a establecerse al final con niveles mayores en comparación con los niveles de humedad relativa exterior al estante. Es decir, aunque se tengan niveles variables en la humedad relativa externa, el forraje mantendrá la humedad relativa interna

El ambiente fresco interno del estante gracias a la cobertura desarrollada del forraje también puede corroborarse al observar el gráfico de temperatura de la figura 12 donde se aprecia cómo la temperatura interna del estante siempre tiende a mantenerse por debajo de la temperatura externa. Luego, valores de humedad relativa altos implican niveles bajos de

déficit de presión de vapor lo que desfavorece la transpiración de las plantas y la evaporación en general lo que disminuye por defecto la evapotranspiración. Esto coincide con Castilla (18), donde menciona que cuando la humedad relativa del aire disminuye, el déficit de presión de vapor del agua aumenta y por lo tanto, la transpiración de las plantas también, implicando una disminución en los valores de ET_c . Este mismo autor también menciona que la energía requerida para evaporar el agua, básicamente, proviene de la radiación solar; por lo tanto, la transpiración está directamente relacionada con la radiación solar. Así mismo, la cobertura también puede estar disminuyendo los niveles de radiación en el estante conforme avanzan el desarrollo del cultivo.

El segundo factor puede deberse al desarrollo de la carpeta de raíces del forraje la cual llega a cumplir una función de sustrato para el forraje lo que permite de alguna forma, retener el agua en este cuerpo. Como se tiene una parcial retención de líquido en las raíces, al entrar más agua, esta no será absorbida por el sistema lo que disminuiría el consumo de agua de las plantas.

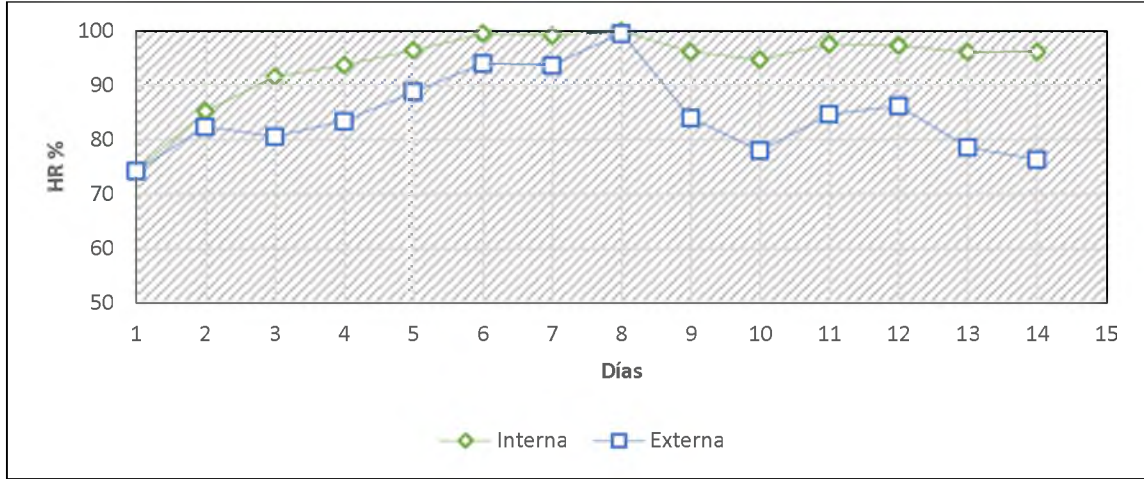


Figura 11. Comportamiento interno (sección central, nivel 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la humedad relativa del estante de producción en estación lluviosa.

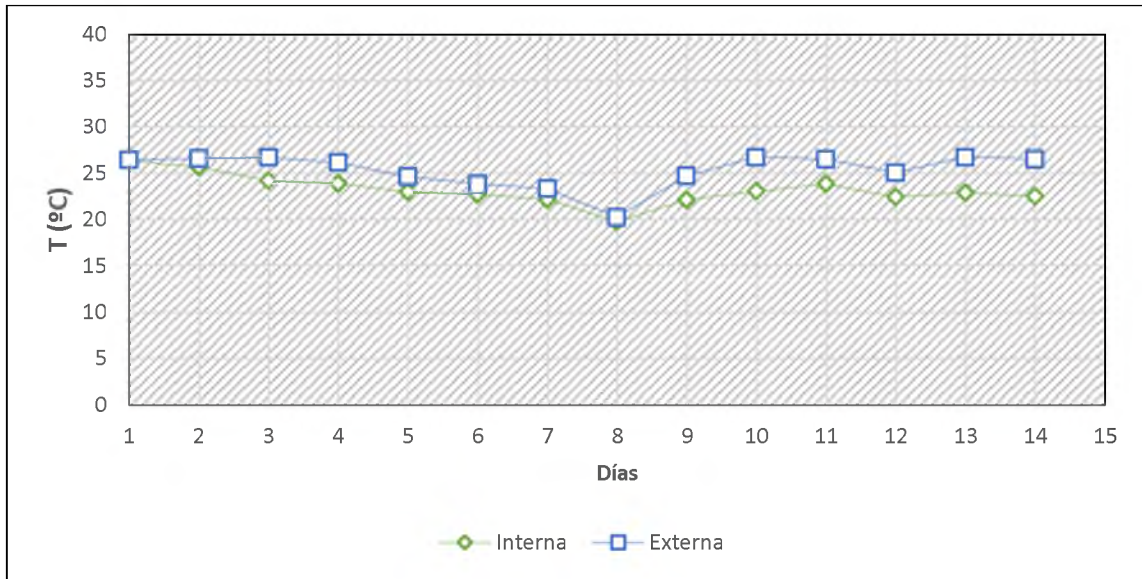


Figura 12. Comportamiento interno (sección central, nivel 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la temperatura del estante de producción en estación lluviosa.

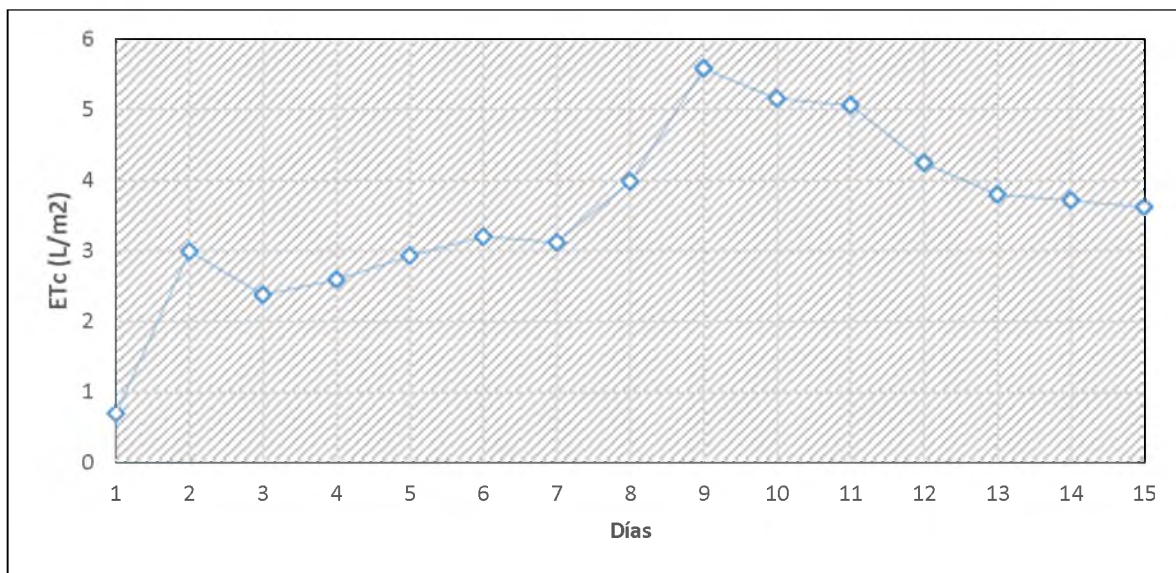


Figura 13. Variaciones en la evapotranspiración del FVH por día en estación seca.

En la figura 13 se tienen graficados los niveles de evapotranspiración para la estación seca. En general, se observa el mismo comportamiento de esta variable que el obtenido en estación lluviosa. Es decir, valores menos estables al inicio, un incremento que va de la mano con el desarrollo del forraje en términos de cobertura producida y finalmente una disminución que ubica a la evapotranspiración en un nivel estable hasta el día de la cosecha.

La figura 14 muestra cómo se produce un aumento de la HR interna cuando el forraje alcanza un buen desarrollo del follaje mientras que en el exterior la HR es menor. Este es un comportamiento similar para la estación lluviosa solo que en este caso la diferencia entre la HR externa e interna es mayor debido a las condiciones climáticas características de la estación seca. Y en el caso de la temperatura, se observa en la figura 15 que la temperatura siempre se mantiene por arriba de la externa.

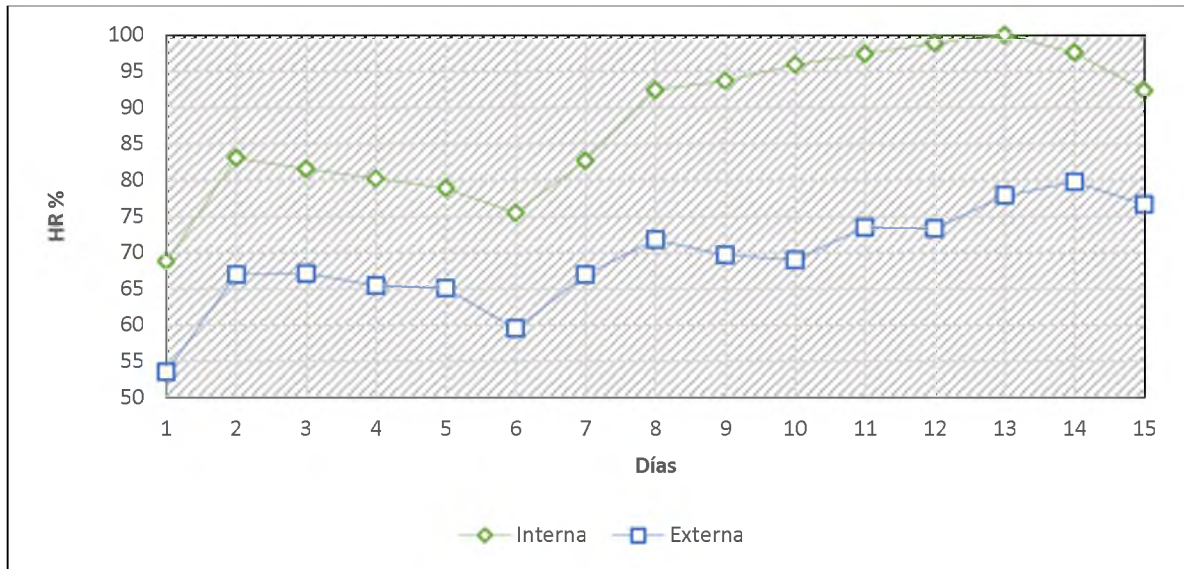


Figura 14. Comportamiento interno (sección central nivel, 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la humedad relativa del estante de producción en estación seca.

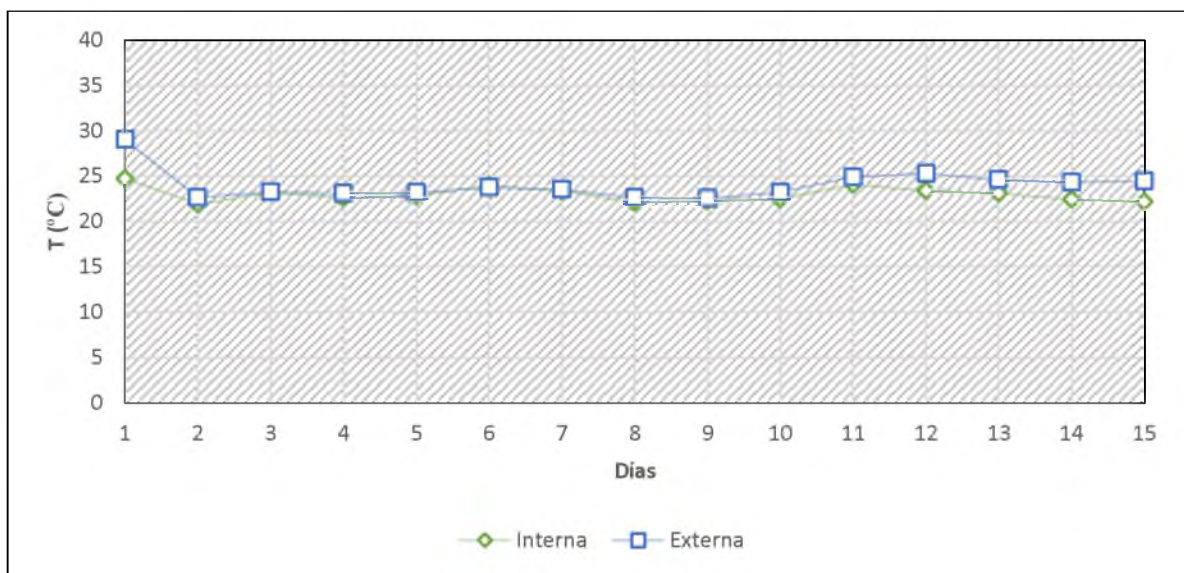


Figura 15. Comportamiento interno (sección central, nivel 3 del estante) y externo (1 metro de distancia del estante) de la temperatura del estante de producción en estación seca.

La figura 14 muestra cómo se produce un aumento de la HR interna cuando el forraje alcanza un buen desarrollo del follaje mientras que en el exterior la HR es menor. Este es un comportamiento similar para la estación lluviosa solo que en este caso la diferencia entre la HR externa e interna es mayor debido a las condiciones climáticas características de la estación seca. Y en el caso de la temperatura, se observa en la figura 15 que la temperatura interna siempre se mantiene por debajo de la temperatura externa.

5.3. Eficiencia en el uso del agua

En la tabla 7 se presentan los resultados obtenidos en el uso eficiente del agua (EUA) para los ensayos realizados en estaciones lluviosa y seca.

Tabla 7. EUA durante el ciclo de producción de FVH.

Parámetro	Estación lluviosa	Estación seca
Total agua usada (l)	841,9	875,4
Total agua usada (m ³)	0,84	0,88
Total peso fresco (kg)	328,14	319,8
Total materia seca (kg)	23,97	23,36
EUA _{PF} (kg peso fresco/m ³)	389,8	365,3
EUA _{MS} (kg materia seca/m ³)	28,5	26,7

Los valores de EUA_{PF} obtenidos fueron de 389,8 y 365,3 kg/m³ para las estaciones lluviosa y seca respectivamente. Al-Karaki y Al-Momani (33) reportan valores de 521, 645, 633, 585 y 552 kg de materia fresca /m³ de agua en alfalfa, cebada caupí, sorgo y trigo

respectivamente con aplicación de nutrición y Ramírez (30) valores de 658 kg de materia fresca /m³ en maíz de la variedad “Diamantes 8843” con presencia de nutrición.

La disminución de estos valores con respecto a la literatura pudo deberse a un aumento en la cantidad de biomasa producida asociado con el uso de fertilización en la literatura citada en comparación con los resultados de este trabajo en donde no se aplicó nutrición. Salas et al. (43) llegó a esta misma conclusión al producir FVH bajo tratamientos de nutrición con dosis variables con maíz forrajero aplicando fertilización orgánica. Mientras que con Al-Karaki y Al-Momani, hay una evidente diferencia que pudo deberse al uso de especies diferentes para producción de forraje.

Para EUA_{M.S} se obtuvieron valores de 28,5 a 26,7 kg/m³ en estación lluviosa y seca respectivamente. Mientras que Al-Karaki y Al-Momani (33) reporta 43, 110, 95, 111, y 97 Kg/m³ para alfalfa, cebada caupí, sorgo y trigo respectivamente y Ramírez (30) 52,08 Kg/m³ para maíz (Diamantes 8843). En este caso la disminución de este valor puede deberse a un cambio en la cantidad de M.S pues como lo menciona Rivera et al. (42), la M.S es un parámetro se encuentra regido por control genético y es intrínseco de cada especie vegetal.

Los valores de EUA para este ensayo cambian entre estación debido a una disminución en el consumo de agua como se ha demostrado anteriormente en el tema de evapotranspiración del FVH.

Aunque se tenga una disminución en la eficiencia del uso del agua para el genotipo utilizado en este trabajo, este no deja de tener relevancia en cuanto a un mejor uso del agua comparado con especies forrajeras producidas en campo. Ramírez (30) informa que la EUA en condiciones de campos fue de solo de 2,75 a 2,88 kg de materia seca /m³ para maíz. Esto muestra la alta eficiencia en el uso del agua cuando se produce forraje verde en condiciones hidropónicas en comparación con las condiciones de campo.

5.4. Evaluación del sistema de riego

En la tabla 8 se presentan los resultados de la evaluación hidráulica que se le realizó al sistema de riego del estante de producción, antes y después de realizar los arreglos, el cual incluye las 3 subdivisiones del sistema. En este caso se toma como un solo sistema debido a que no hay barreras entre una sección y otra dentro del estante que impida el paso del diámetro de humedecimiento de emisores de una sección a otra.

La medición de las presiones al final de las líneas laterales de los sistemas de riego presentó en promedio valores de 1,8 Bar como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. Evaluación hidráulica del sistema de riego.

Variables Analizadas	Sistema inicial	Sistema reparado
Q _p (l/h)	29,8	30,3
DesvEst (Q)	2,9	2,6
CV (Q)	0,099	0,085
CUC %	37,7	71,9
CUD %	19,3	63,0
Presión promedio	26,69 (psi) / 1,8 (Bar)/ 180 (kPa)	

Q_p: Caudal promedio; DesvEst: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; CUC: Coeficiente de uniformidad; CUD: Coeficiente de uniformidad de distribución.

En la prueba de caudales en promedio se obtuvieron caudales de 29,8 l/h con una desviación estándar de 2,9 l/h y un coeficiente de variación de 0,099. Se calcularon los coeficientes de uniformidad de Christiansen y el coeficiente de uniformidad de distribución en el cuarto más afectado (el 25% de los recipientes en los que se recolectó la menor cantidad de lámina de riego) del área por falta de riego y se obtuvieron valores de CUC y CUD de 37,7 % y 19,3 % respectivamente.

En la tabla 9 se presentan rangos de coeficientes de variación de los emisores en sistemas de riego para poder determinar si la uniformidad en la descarga es adecuada o no.

Tabla 9. Escala de clasificación de la uniformidad de los rangos de coeficientes de variación para caudal de emisores (53).

CV_t	Uniformidad (Keller 2005)
> 0,4	Inaceptable
0,4 – 0,3	Baja
0,3 – 0,2	Aceptable
0,2 – 0,1	Muy Buena
0,1 – 0	Excelente

De la misma forma que se presentan rangos para interpretar la uniformidad de descarga de los micro aspersores, para interpretar los valores obtenidos de CUC y CUD se usaron los parámetros de clasificación presentados en la tabla 10 (Bernardo *et al*, 2006) citado por (36), en donde se establecen rangos de coeficientes de uniformidad para sistemas aspersión para saber si el sistema tiene un buen o mal desempeño.

Tabla 10. Escalas de clasificación del desempeño de sistemas de riego por aspersión, con base en los coeficientes de uniformidad (36).

	Excelente	Bueno	Razonable	Malo	Inaceptable
CUC (%)	> 90	80 – 90	70 - 80	60 - 70	< 60
CUD (%)	> 84	68 – 84	52 - 68	36 - 52	< 36

Se determinó que la presión promedio del sistema estaba por debajo del rango óptimo de presión requerida por los emisores para poder trabajar con los caudales establecidos para ese modelo de microaspersor. Se puede observar que el caudal promedio de los emisores

tiene un valor por debajo del caudal establecido por el fabricante, lo cual puede deberse a la misma falta de presión en el sistema.

Otro de los problemas encontrados en el estante asociados al sistema de riego, fue que ciertas áreas de siembra se encuentran con apariencia de una ausencia de humedad a pesar de tener un emisor directamente sobre la zona con el problema. Se determinó que al hacer un aumento en la presión del sistema en general provocaría que los emisores pudieran descargar mayor cantidad de caudal y a la vez tener una mejor cobertura o uniformidad en la lámina de riego. Sin embargo, esto no fue posible ya que las bombas de 0,5 hp no estaban brindando la presión suficiente. El cambio de bombas no fue factible debido a que no se contaba con los recursos económicos para poder comprarlas.

Luego de aplicar los cambios mencionados en la metodología sobre el sistema de riego, se volvieron a medir caudales, presiones y todos los índices de eficiencia. Se observa en la tabla 8 que el caudal promedio aumentó, alcanzando así el rango de caudales óptimos de trabajo establecidos por el fabricante. Según la tabla 9 donde se establecen valores de coeficiente de variación para sistemas de riego, ya el sistema se ubicaba dentro del rango excelente con un valor de CV de 0,085. Con los cambios realizados se disminuyó aún más la variación entre caudales llegando a obtenerse un CV de 0,085.

Los coeficientes de uniformidad CUC y CUD (37,7% y 19,3% respectivamente) aumentaron con estos cambios, y pasaron de una condición inaceptable a una razonable según la tabla 10 citada por (36) pasando a valores de 71,9% y 63% respectivamente.

Para representar las mejoras en los coeficientes de uniformidad de la lámina de riego, se utilizó el programa Surfer de GoldenSoftware (54) y con los valores de pluviometría se realizaron mapas de contorno mediante un modelo de interpolación de datos. Con estos mapas (figuras 16-20) se pueden observar las mejoras en cuanto a uniformidad de lámina de riego, así como el aumento en general de la cantidad de agua que se aplica en el estante de producción.

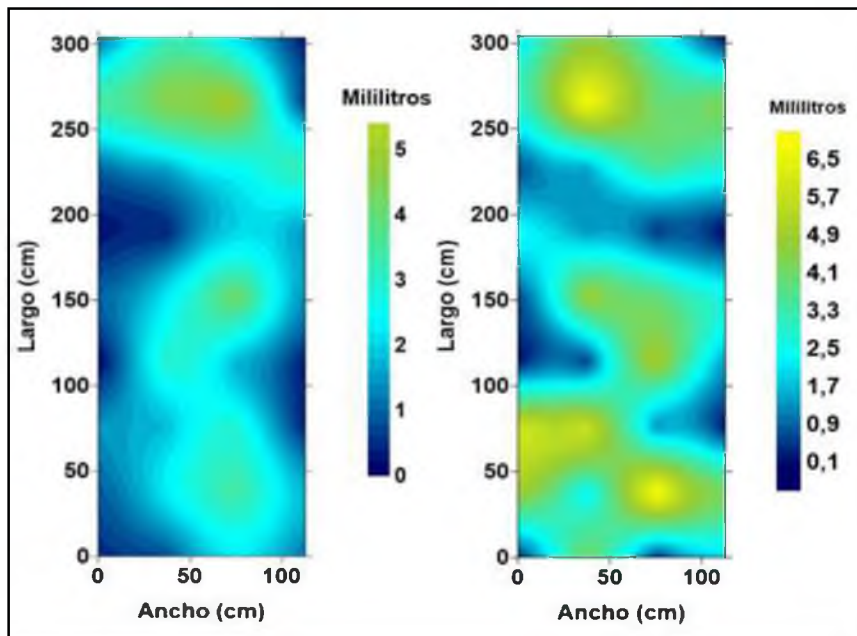


Figura 16. Pluviometría nivel 1 antes (Izq) y después (Der) de reparación.

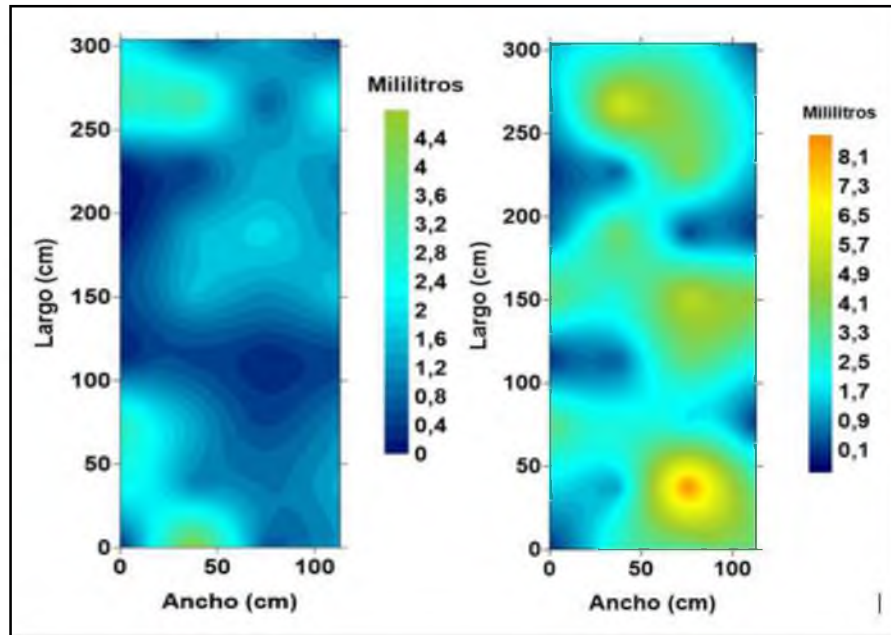


Figura 17. Pluviometría nivel 2 antes (Izq) y después (Der) de reparación.

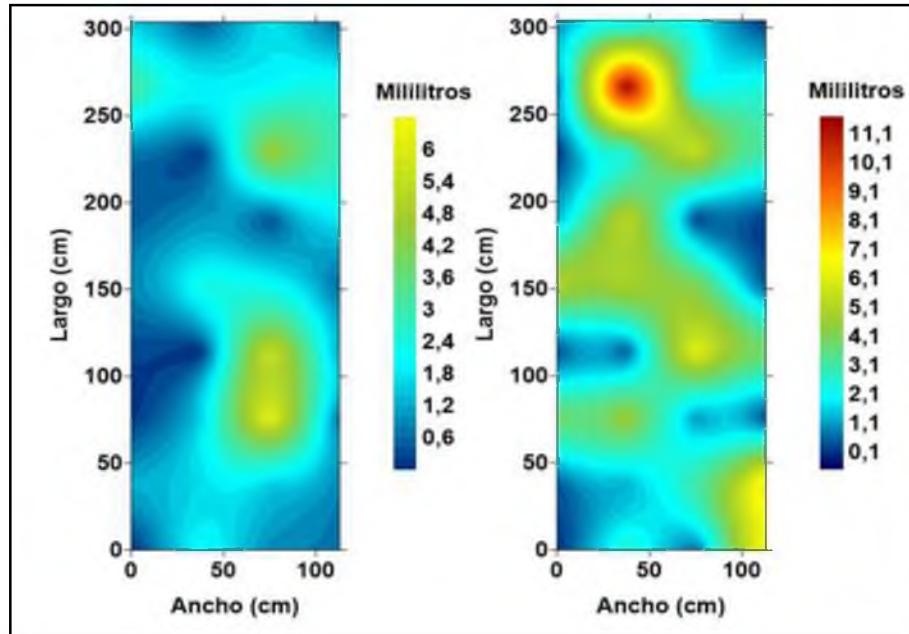


Figura 18. Pluviometría nivel 3 antes (Izq) y después (Der) de reparación.

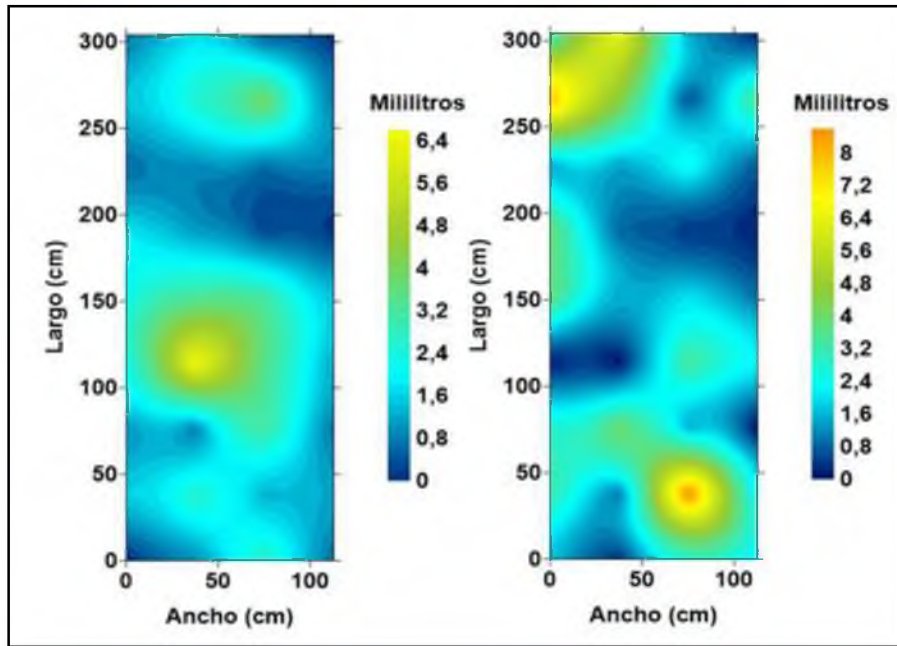


Figura 19. Pluviometría nivel 4 antes (Izq) y después (Der) de reparación.

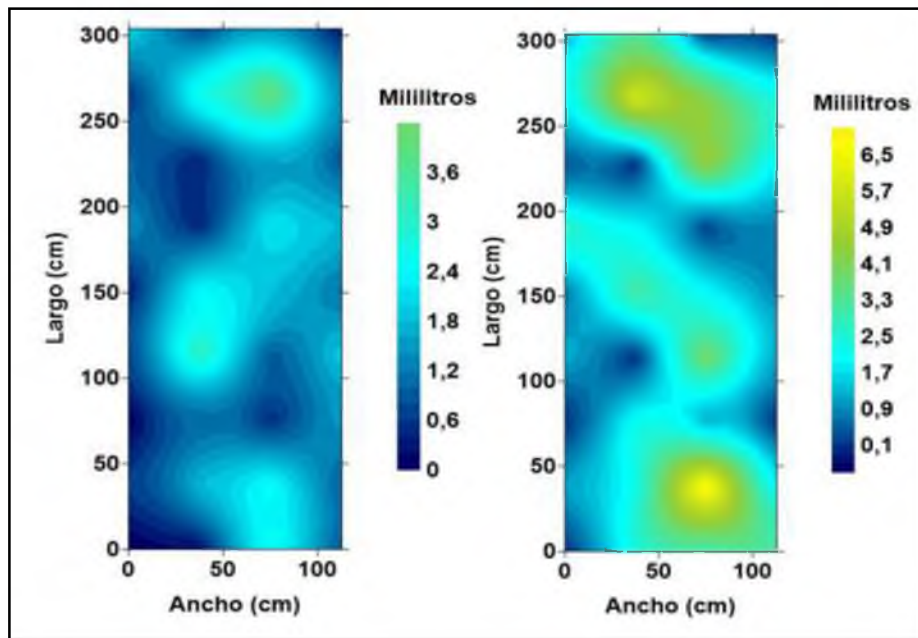


Figura 20. Pluviometría nivel 5 antes (Izq) y después (Der) de reparación.

En general se puede observar cómo por nivel se tiene un aumento en la lámina de riego, así como en la uniformidad de esta. Además es importante destacar como se logró corregir y disminuir las zonas en donde la lámina de riego era prácticamente nula o láminas de riego muy bajas. Esto ocurrió probablemente por: 1- la eliminación de obstrucciones en el sistema en general, tanto en la tubería como en los emisores, 2- al cambiar emisores que no cumplían con su diámetro de humedecimiento y descarga y 3- al darle un mejoramiento en la posición en la que estaban colocados los emisores pues estos estaban ligeramente inclinados lo que causaba que su diámetro de humedecimiento en ocasiones, se enfocara hacia el exterior del estante.

6. CONCLUSIONES

Los resultados de rendimiento en los forrajes producidos con base en las variables productivas y bromatológicas de peso fresco, materia seca, proteína cruda, fibra detergente neutro y lignina no indicaron diferencias significativas atribuibles a las cantidades de radiación fotosintéticamente activa disponibles en los tratamientos, pero sí al parecer por efecto en la disminución de la calidad de la semilla de una estación a otra lo que pudo haber ocurrido debido a que la vigorosidad de la semilla tuviera un efecto directo en la producción de biomasa, lo que a la vez afectó variables bromatológicas como la proteína cruda y la fibra detergente neutro.

Los resultados obtenidos muestran que el forraje verde hidropónico pudo desarrollarse en este estante de producción con niveles de radiación fotosintéticamente activa, en términos de luz diaria integrada, que van desde 0,21 a 9,2 mol/m²d, bajo las condiciones climáticas características del lugar.

Aunque hay variaciones con los resultados de otros experimentos, la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico a base de maíz con el fenotipo Pico de Gallo, podría considerarse aceptable para la alimentación animal obteniéndose valores de M.S de 7,52%, PC de 14,97%, FDN de 34,14% y lignina de 3,37%. Por lo que el material queda disponible para que los nutriólogos animales diseñen la dieta y los complementos para adecuar el material en términos alimentarios.

La evapotranspiración de las plantas de maíz en este sistema de producción de forraje verde hidropónico presentó cambios rápidos en el tiempo debido al veloz desarrollo del forraje pasando de semilla a un germinado, lo que influenció tanto su consumo de agua como el microclima dentro del estante de producción haciéndolo variar con respecto al clima externo. Se obtuvieron variaciones en la ET_c de 0,6 a 5,58 l/m^2d según el estado de desarrollo del forraje y en promedio se obtuvieron valores de ET_c de 3,4 y 3,54 l/m^2d para las estaciones lluviosa y seca respectivamente.

La eficiencia del uso del agua en el forraje verde hidropónico fue de 389,8 kg_{PF}/m^3 y 28,5 kg_{PS}/m^3 junto con 365,3 kg_{PF}/m^3 y 26,7 kg_{PS}/m^3 respectivamente para las estaciones lluviosa y seca. Además, este parámetro fue considerablemente mayor al compararse con forrajes producidos en condiciones de campo lo que lo convierte en una alternativa de producción de alimento para animales en zonas con escasas de agua, ahorrándose hasta un 90% del agua utilizada en campo para producir un kilogramo de materia seca a base de maíz.

La eficiencia del sistema de riego en términos de CUC y CUD mejoró de 37,7 a 71,9 % y de 19,3 a 63 % respectivamente luego de haber realizado acciones de mantenimiento como limpieza de tuberías y filtros y cambio de emisores dañados. Otro de los parámetros que mejoró luego de estos cambios, fue el coeficiente de variación de caudal emitido por los emisores pasando de 0,099 a 0,085. Esto demuestra que un adecuado mantenimiento es necesario para mantener la eficiencia del sistema de riego.

7. RECOMENDACIONES

Los resultados de los ensayos de radiación sugieren que no es necesaria la construcción de una estructura muy compleja para la producción de forraje verde hidropónico. Un galpón o galera que mantenga mediante tragaluces o láminas transparentes como mínimo niveles de radiación de $0,21 \text{ mol/m}^2\text{d}$, abastecerá los requerimientos lumínicos para un adecuado desarrollo del forraje.

Se recomienda realizar un estudio más a fondo y detallado del comportamiento de la lignina con respecto a los niveles de radiación PAR recibidos por el forraje verde hidropónico para conocer si esta variable es influenciada por este factor climático.

Se recomienda realizar un ensayo para determinar cuánto es el tiempo de almacenaje adecuado para la semilla de manera que se eviten pérdidas en la calidad de la semilla en términos de vigorosidad y porcentaje de germinación.

Debido a la variación en el consumo de agua del forraje en el tiempo, se recomienda la variación de la lámina de riego para evitar desperdicios en este recurso. Mientras no se logre contar con un sensor altamente especializado para determinar el consumo de agua del forraje, la observación es herramienta fundamental.

Se recomienda realizar una serie de riegos esporádicos durante la noche para mantener la humedad del sistema. De manera que los primeros riegos de la mañana serán aprovechados por el forraje solamente.

En el actual caso, se recomienda un cambio de las bombas hidráulicas del sistema de riego para subir los niveles de presión logrando así una mayor descarga de los emisores para evitar problemas de cobertura en los niveles del estante de producción. Por ello, también sería prudente recomendar un nuevo diseño de riego donde se unifiquen los 3 sistemas de manera que sean accionados por una sola bomba hidráulica de mayor potencia bajando así los costos en la compra y mantenimiento de 3 bombas. Sin embargo, al tratarse de un módulo experimental para evaluar diferentes tratamientos, y bajo la actual capacidad de inversión, debe aceptarse un error intrínseco en el sistema.

8. REFERENCIAS

1. INEC. Publicaciones | INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA Y CENSOS [Internet]. 2018 [cited 2018 Apr 10]. Available from: http://inec.cr/publicaciones?keys=&fuente_tid=All&field_area_tematica_documento_tid=26&field_periodo_tid=All&field_anio_documento_value%5Bvalue%5D%5Bdate%5D=
2. FGG/MAG. Plan estratégico para el desarrollo de la agrocadena de la ganadería bovina de carne en la Región Chorotega. 2007;
3. Campos P. Evaluación de la toma de decisiones de productores ganaderos respecto a las medidas de adaptación a cambio climático en Guanacaste, Costa Rica. CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA; 2011.
4. Jiménez JA. Diseño de sistemas de producción ganaderos sostenibles con base a los sistemas silvopastoriles (SSP) para mejorar la producción animal y lograr la sostenibilidad ambiental. 2007.
5. FAO. Manual Técnico Forraje verde hidropónico. Vol. 066. Santiago, Chile: OFICINA REGIONAL DE LA FAO PARA AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE;

- 2001.
6. González E, Ceballos J, Orlando Benavides. Producción de forraje verde hidropónico de maiz *Zea mays*. L. en invernadero con diferentes niveles de silicio. 2015;32(1):75–83.
 7. Programa Nacional de Producción Agrícola bajo Ambientes protegidos (ProNAP). BOLETÍN DEL PROGRAMA NACIONAL SECTORIAL DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA BAJO AMBIENTES PROTEGIDOS Año 10 (número 58) [Internet]. San José; 2016 [cited 2018 Nov 8]. Available from: http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/estructura/oficinas/prog-nac-aprot.html
 8. Benavides H, León G. INFORMACIÓN TECNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO. IDEAM–METEO/008-2007. 2007;
 9. Aguirre J, Bonilla J, Carrillo F, Corredor A, Escalera F, Rivas M, et al. LIVESTOCK ALTERNATIVES IN THE FACE CLIMATE CHANGE IN NAYARIT. ABANICO Vet ISSN 2448-6132. 2015;5(2):28–37.
 10. Retana J, Rosales R. Efecto de la variabilidad climática sobre la producción bovina de carne en la Región Chorotega de Costa Rica. Tópicos Meteorológicos y Ocean. 2001 Jan 1;7:1–20.
 11. Porter JH, Parry ML, Carter TR. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests. Agric For Meteorol [Internet]. 1991 Dec 1 [cited 2018 Nov

12];57(1-3):221-40. Available from:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192391900888>

12. Watson RT, Zinyowera MC, Moss RH. IPCC SPECIAL REPORT THE REGIONAL IMPACTS OF CLIMATE CHANGE: An assessment of vulnerability Summary for Policymakers. 1998.
13. Santos BM, Obregón-Olivas HA, Salamé-Donoso TP. Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos: Estructuras para la Agricultura Protegida [Internet]. [cited 2018 Nov 13]. Available from:
https://horticulture.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk1816/files/extension_material_files/Santos_academic_paper_estructuras_para_la_agricultura_protegida.pdf
14. Baudoin W, Nono-Womdim R, Lualadio N, Hodder A, Castilla N, Leonardi C, et al. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. 2013. 616 p.
15. Canakci M, Yasemin Emekli N, Bilgin S, Caglayan N. Heating requirement and its costs in greenhouse structures: A case study for Mediterranean region of Turkey. Renew Sustain Energy Rev [Internet]. 2013 Aug [cited 2018 Nov 14];24:483-90. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113001858>
16. Soria ET, Luis H, Flores S. OPTIMIZACIÓN DE ÁREAS DE RIEGO EN BASE A HIDROLOGÍA ESTOCÁSTICA Y SISTEMAS HIDROPÓNICOS EN LA COMUNIDAD CENTRO RIVERA , RÍO. 2015;25-34.

17. López RA, Murillo BA, Rodríguez GQ. EL FORRAJE VERDE HIDROPÓNICO (FVH): UNA ALTERNATIVA DE PRODUCCIÓN DE ALIMENTO PARA EL GANADO EN ZONAS ÁRIDAS. *Interciencia*. 2009;34:121–7.
18. Castilla N. *Greenhouse Technology and Management*, 2nd edition. Vol. 53. 2013. 1689-1699 p.
19. Berkovich YA, Konovalova IO, Smolyanina SO, Erokhin AN, Avercheva OV, Bassarskaya EM, et al. LED crop illumination inside space greenhouses. *Reach - Rev Hum Sp Explor* [Internet]. 2017 Jun [cited 2018 Nov 12];6:11–24. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S235230931730010X>
20. Bakker JC. GREENHOUSE CLIMATE CONTROL: CONSTRAINTS AND LIMITATIONS. *Acta Hort* [Internet]. 1995 Mar [cited 2018 Apr 10];(399):25–36. Available from: https://www.actahort.org/books/399/399_2.htm
21. Kaiser WM. Effects of water deficit on photosynthetic capacity. *Physiol Plant* [Internet]. 1987 Sep [cited 2018 Nov 13];71(1):142–9. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1399-3054.1987.tb04631.x>
22. Morgan J V., Hunter RR, O. H. ire R. Limiting factors in hydroponic barley grass production. *Proc 8th Int Congr Soil Cult Hunter’ s Rest, South Africa, 2-9 Oct* [Internet]. 1993 Sep 16 [cited 2018 Apr 10];1992:241–61. Available from: <https://geoscience.net/research/002/885/002885958.php>
23. Peer DJ, Leeson S. FEEDING VALUE OF HYDROPONICALLY SPROUTED

- BARLEY FOR Experiment 1 The apparent metabolizable energy concentration of sprouted and un-. 1985;13:183–90.
24. Trubey CR, Rhykerd CL, Noller CH, Ford DR, George JR. Effect of Light, Culture Solution, and Growth Period on Growth and Chemical Composition of Hydroponically Produced Oat Seedlings1. *Agron J* [Internet]. 1969 [cited 2018 Nov 13];61(5):663. Available from: <https://www.agronomy.org/publications/aj/abstracts/61/5/AJ0610050663>
 25. Torres AP, Lopez RG, Web De Floricultura P. HO-000-W Medición de Luz Diaria Integrada en Invernaderos Purdue extension [Internet]. [cited 2018 Oct 4]. Available from: www.hort.purdue.edu
 26. Lambers H, Pons TL, Chapin FS. *Plant physiological ecology*. Springer Verlag; 2008. 604 p.
 27. Cisneros Zayas EI, Reinaldo Rey García DI, Roberto Martínez Varona DI, Teresa López Seijas DI, Felicita González Robaina DI. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo para el cafeto en la provincia de Pinar del Río Evapotranspiration and crop coefficients for coffee trees in Pinar del Río province [Internet]. Vol. 24. [cited 2018 Nov 14]. Available from: <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v24n2/rcta04215.pdf>
 28. Allen RG, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Evapotranspiración del cultivo : guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos [Internet]. Organización de las Naciones

- Unidas para la Agricultura y la Alimentación; 2006 [cited 2018 Nov 14]. Available from: <http://www.fao.org/docrep/009/x0490s/x0490s00.htm>
29. López Avendaño JE, Díaz Valdés T, Watts Thorp C, Rodríguez JC, Castellanos Villegas AE, Partida Ruvalcaba L, et al. Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoam* [Internet]. 2015;33(3):209–19. Available from: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792015000300209&lng=es&nrm=iso&tlng=es
 30. Ramírez CA. “ Efecto de la nutrición sobre la calidad del Forraje Verde Hidropónico en la zona de Alajuela , Costa Rica ”. 2016.
 31. Medrano Gil H, Bota Salort J, Cifre Llompart J, Flexas Sans J, Ribas Carbó M, Gulías León J. Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Investig Geográficas* [Internet]. 2007;43(43):63–84. Available from: <http://hdl.handle.net/10045/10196>
 32. Al-Karaki GN, Al-Hashimi M. Green Fodder Production and Water Use Efficiency of Some Forage Crops under Hydroponic Conditions. *ISRN Agron* [Internet]. 2012;2012(December 2011):1–5. Available from: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/924672/>
 33. Al-Karaki GN, Al-Momani N. Evaluation of Some Barley Cultivars for Green Fodder Production and Water Use Efficiency under Hydroponic Conditions. *Jordan J Agric Sci* [Internet]. 2011;7(3):448–57. Available from:

<https://journals.ju.edu.jo/index.php/JJAS/article/download/2584/2342>

34. Merriam JL, Keller J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management [Internet]. Logan, Utah (USA) Utah State Univ., Dept. of Agricultural and Irrigation Engineering; 1979 [cited 2018 Nov 15]. Available from: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016027644>
35. Tun Cruz J de la C, Ramírez Jaramillo G, Cano González A de J, Sánchez Cohen I. Manejo Eficiente Del Riego Por Microaspersión En Huertas De Naranja Dulce Del Sur De Yucatán. 2014.
36. Flórez Tuta N, Zution Gonçaves I, Rodrigues Calvacante FD, Agnellos Barbosa EA, Ponciano de Deus F, Ribeiro MD, et al. Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión. *Agrociencia* [Internet]. 2013;47(2):107–19. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n2/v47n2a1.pdf>
37. Cunha FF, Pordeus RV. Manejo De Micro-Irrigação Baseado Em Avaliação Do Sistema Na Cultura Do Meloeiro . Management of Micro-Irrigation Based on Evaluation of the System in Cultivation of Melons . 2008;
38. Paulino MADO, Figueiredo FP De, Fernandes RC, Maia JTLS, Guilherme DDO, Barbosa FS. Evaluation of the uniformity and efficiency of water application in systems of irrigation for sprinkle irrigation. *Rev Bras Agric Irrig - RBAI* [Internet]. 2009;3(2):48–54. Available from:

http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/download/18/pdf_13

39. Naandanjain irrigation company. Catalogo Microaspersores [Internet]. 2014.
Available from: www.naandanjain.com
40. Müller L, Manfron P, Santos O, Medeiros S, Valdecir H. Growth and bromatologic composition of hydroponic corn fodder in differents dates of harvest and sowing densities. (January 2014).
41. Osorno R, González LM. Producción y calidad de la biomasa de Zea mays, Sorghum bicolor, Oriza sativa en alfombra forrajera hidropónica. UNIVERSIDAD NACIONAL GRARIA FACULTAD DE CIENCIA ANIMAL DEPARTAMENTO DE SISTEMAS INTEGRALES DE PRODUCCIÓN ANIMAL; 2012.
42. Rivera A, Moronta M, González Estopiñán M, González D. Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootec Trop* [Internet]. 2010;28(1):33–41. Available from:
http://static.encribd.net/files/www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/forraje_hidroponico/05-iluminacion.pdf
43. Salas L, Preciado P, Esparza JR, Álvarez VDP, Palomo A, Rodríguez N, et al. Rendimiento y calidad de forraje hidropónico producido bajo fertilización orgánica. *Terra Latinoam*. 2010;355–60.
44. Herrera AMA, Depablos LAA, López RM, Benezra MAS, Ríos LDÁ.

- Degradabilidad y digestibilidad de la materia seca del forraje hidropónico de maíz (Zea mays). Respuesta animal en términos de consumo y ganancia de peso. Rev Cient la Fac Ciencias Vet la Univ del Zulia. 2007;17(4):372–9.
45. Soto MAC, Juárez Reyes AS, Rivera Ahumada JA, Guerrero Cervantes M, Ramirez Lozano RG, Barragán HB, et al. Biomass production and nutritional value of hydroponic green forage of wheat and oat. Interciencia. 2012;37(12):906–13.
46. Vargas CFR. Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz arroz y sorgo negro forrajero. Agron Mesoam. 2008;19(2):233–40.
47. De León M. Influencia del Sombreado y la Fertilización sobre el Crecimiento y Productividad del Forraje Verde Hidropónico de Maíz (Zea mays L .). UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”; 2005.
48. Sánchez F, Castillo D, Del E, Moreno Pérez C, Contreras Magaña E, Morales Gómez J. PRODUCCIÓN DE FORRAJE HIDROPÓNICO DE TRIGO Y CEBADA Y SU EFECTO EN LA GANANCIA DE PESO EN BORREGOS HYDROPONIC WHEAT AND BARLEY FODDER YIELDS AND THEIR EFFECT ON WEIGHT GAIN IN SHEEP. Rev Chapingo Ser Hortic [Internet]. 2013 [cited 2018 Oct 10];19(4):35–43. Available from: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v19n4/v19n4a3.pdf>
49. Mendoza M., Latournerie L., Moreno E., Castañón G., Carrillo J. Cambios en la calidad de la semilla de maíz durante su desarrollo y maduración. Agron Mesoam.

2004;15(2):155–60.

50. Acosta NV, Lima Orozco R, Castro Alegría A, Humberto J, Cevallos A, Gregorio Y, et al. Evaluación de diferentes sistemas de producción de biomasa hidropónica de maíz. Cent Agrícola [Internet]. 2016 [cited 2018 Nov 16];43(4):57–66. Available from: <http://scielo.sld.cu/pdf/cag/v43n4/cag08416.pdf>
51. Sawan ZM, Hafezb, SA, Basyony AE, Alkassas A-E-ER, Alkassas A-E-ER. Cottonseed: protein, oil yields, and oil properties as influenced by potassium fertilization and foliar application of zinc and phosphorus. Grasas y Aceites [Internet]. 2007 Mar 30 [cited 2018 Nov 16];58(1):40–8. Available from: <http://grasasyaceites.revistas.csic.es/index.php/grasasyaceites/article/view/777>
52. Bures S, Urrestarazu M, Kotiranta S. Artículo técnico Iluminación artificial en agricultura. 2018;(January):0–46.
53. Martello M, Bortolini L, Morabito J. Uniformidad de distribución del riego por goteo en vid: su impacto sobre los índices de vegetación, la cantidad y calidad de la producción. Caso de estudio en Mendoza, Argentina. :1–17.
54. Surfer® | 2D & 3D mapping, modeling & analysis software for scientists and engineers [Internet]. [cited 2018 Oct 14]. Available from: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer>

9. ANEXOS

9.1. Resultados de cosecha y bromatológicos de ensayos de radiación PAR

Tabla 11. Cosecha de ensayo de radiación en la estación lluviosa.

Bandeja	Biomasa total		Raíces		
	P. Fresco (g)	Altura (cm)	Olor (si/no)	Oxidación (1-5)	T. babosa (si/no)
T1R2N1	1 862	24	no	2	si
T1R1N1	1 970	24	si	1	si
T1R2N2	1 891	23	si	2	si
T1R3N2	2 041	24	si	1	si
T1R4N3	1 899	23	si	2	si
T1R1N3	2 097	23	no	2	no
T1R3N4	2 021	22	no	3	no
T1R1N4	2 020	23	no	2	si
T1R3N5	2 040	24	no	2	si
T1R1N5	2 160	24	no	2	si
T2R3N1	1 962	26	si	3	si
T2R4N1	1 982	26	si	4	si
T2R4N2	2 022	26	no	2	si
T2R1N2	1 892	27	si	3	si
T2R4N3	1 921	26	si	2	si
T2R1N3	1 779	25	no	3	si
T2R1N4	1 927	26	si	2	si
T2R4N4	1 822	27	no	3	si
T2R3N5	1 726	23	no	4	si
T2R4N5	1 928	24	no	3	si
T3R3N1	1 867	24	si	4	si
T3R1N1	1 742	23	no	3	si
T3R1N2	1 966	23	si	4	si
T3R2N2	1 650	23	no	4	si
T3R3N3	1 910	23	no	3	si
T3R2N3	1 835	23	si	4	si
T3R1N4	2 003	24	no	2	si
T3R2N4	1 815	24	si	4	si
T3R3N5	2 028	25	no	2	si
T3R4N5	1 812	24	si	3	si

T1: Tratamiento testigo; T2: Tratamiento con sombreado de 80 %; T3: Tratamiento con sombreado de 50 %.

Tabla 12. Resultados bromatológicos de ensayo de radiación en estación lluviosa.

Muestra	M.S %	PC %	FDN %	Lignina %
T1N1	92,57	16,26	31,18	4,77
T1N2	91,93	15,14	27,01	4,75
T1N3	92,23	15,18	29,28	3,69
T1N4	92,92	14,29	27,41	3,43
T1N5	91,65	14,09	30,13	4,32
T2N1	92,54	15,25	28,64	3,32
T2N2	92,99	15,08	27,71	3,58
T2N3	93,75	14,7	27,85	3,32
T2N4	92,32	16,11	32,92	3,52
T2N5	92,56	15,42	28,58	3,16
T3N1	93,44	14,18	29,2	3,24
T3N2	92,98	13,94	28,01	3,02
T3N3	92,01	15,97	33,24	3,92
T3N4	91,54	14,79	29,3	3,62
T3N5	91,72	14,09	30,09	3,7

T1: Tratamiento testigo; T2: Tratamiento con sombreado de 80 %; T3: Tratamiento con sombreado de 50 %.

Tabla 13. Cosecha de ensayo de radiación en la estación seca.

Biomasa total			Raíces		
Bandeja	P. Fresco (g)	Altura (cm)	Olor (si/no)	Oxidación (1-5)	T. babosa (si/no)
T1R2N1	3 462	22	si	3	si
T1R1N1	3 018	22	si	3	si
T1R2N2	3 222	22	si	2	si
T1R1N2	3 242	22	si	2	si
T1R2N3	3 008	21	si	2	si
T1R1N3	3 396	23	si	2	si
T1R2N4	3 296	23	si	2	si
T1R1N4	3 208	23	si	2	si
T1R2N5	2 916	23	si	1	si
T1R1N5	3 214	23	si	3	si
T2R2N1	3 166	21	si	2	si
T2R1N1	2 958	20	si	2	2
T2R2N2	3 340	21	si	3	si
T2R1N2	3 180	21	si	1	si
T2R2N3	3 230	20	si	3	si
T2R1N3	3 085	21	si	3	si
T2R2N4	3 082	21	si	2	si
T2R1N4	3 038	22	si	3	si
T2R2N5	2 832	21	si	5	si
T2R1N5	2 954	21	si	4	si
T3R2N1	3 385	21	si	1	si
T3R1N1	3 224	22	si	3	si
T3R2N2	3 198	21	s	2	si
T3R1N2	3 342	21	no	1	si
T3R2N3	3 391	21	si	1	si
T3R1N3	3 193	21	si	2	si
T3R2N4	3 472	21	si	1	si
T3R1N4	3 292	21	si	1	si
T3R2N5	3 420	23	si	1	si
T3R1N5	2 794	21	s	4	si

T1: Tratamiento testigo; T2: Tratamiento con sombreo de 80 %; T3: Tratamiento con sombreo de 50 %.

Tabla 14. Resultados bromatológicos de ensayo de radiación en estación seca.

Muestra	M.S %	PC %	FDN %	Lignina %
T1N1	95,04	13,04	31,64	3,96
T1N2	93,37	13,65	33,45	3,91
T1N3	92,99	14,02	32,94	3,85
T1N4	93,48	14,23	35,53	4,48
T1N5	94,35	12,22	37,25	3,91
T2N1	93,46	14,11	32,38	3,84
T2N2	92,11	13,94	31,63	3,91
T2N3	94,22	14,65	34,92	3,22
T2N4	90,26	13,87	30,7	2,58
T2N5	92,12	14,77	35,98	3,56
T3N1	93,02	13,5	33,73	2,45
T3N2	93,42	13,88	34,22	2,62
T3N3	91,92	15,01	34,21	2,21
T3N4	91,54	15,38	35,81	2,42
T3N5	92,28	12,61	37,65	3,67

T1: Tratamiento testigo; T2: Tratamiento con sombreo de 80 %; T3: Tratamiento con sombreo de 50 %.

9.2. Glosario

CUC: Coeficiente de uniformidad de Christiansen indica el porcentaje de variación en la lámina o volumen de agua aplicado a la superficie del suelo de una unidad de riego.

CUD: Coeficiente de uniformidad de distribución indica el porcentaje de variación en la lámina o volumen de agua aplicado a la superficie del suelo de una unidad de riego considera la razón entre la media del 25 % de los menores valores de las láminas de irrigación y la lámina media recolectada.

CV: Coeficiente de variación se utiliza cuando se desea hacer referencia a la relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable.

ETc: Evapotranspiración del cultivo definida como la cantidad de agua consumida por un determinado cultivo.

EUA: Eficiencia en el uso de agua es el volumen de agua que las plantas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono proveniente de la atmósfera.

FVH: Forraje verde hidropónico es una tecnología de producción de biomasa vegetal obtenida a partir del crecimiento inicial de las plantas en los estados de germinación y crecimiento temprano de plántulas a partir de semillas viables.

HR: Humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua contenida en el aire y la máxima cantidad que el aire sería capaz de contener a esa temperatura.

LDI: Luz diaria integrada es la cantidad de radiación PAR recibida cada día como función de la intensidad de luz instantánea ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$) y duración (día o 24 horas).

PAR: Photosynthetic active radiation o radiación fotosintéticamente activa es la fracción de la radiación solar global que las plantas usan en la fotosíntesis la cual tiene un rango de 400 a 700 nm de longitud de onda.

T: Temperatura es el grado o nivel térmico de un cuerpo o de la atmósfera.