

Guatemala, 29 de noviembre, 2018

Señor Director
Dr. Erwin Humberto Calgua Guerra
Director General de Investigación
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Adjunto a la presente el informe final , coordinado por la Ing. Jeniffer Adela Carolina Silva Yat y avalado por el Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales (IIA) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Este informe final fue elaborado con base en la guía de presentación de la Dirección General de Investigación, el cual fue revisado su contenido en función del protocolo aprobado, por lo que esta unidad de investigación da la aprobación y aval correspondiente.

Así mismo, la coordinadora del proyecto, se compromete a dar seguimiento y cumplir con el proceso de revisión y edición establecido por Digi del **informe final y del manuscrito científico**. El manuscrito científico debe enviarse, por la coordinadora del proyecto, para publicación al menos en una revista de acceso abierto (*Open Access*) indexada y arbitrada por expertos en el tema investigado.

Sin otro particular, suscribo atentamente.

“Id y enseñad a todos”

Firma
Coordinadora del proyecto de investigación

Firma y sello
Director del Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales (IIA)
Facultad de Agronomía



Universidad de San Carlos de Guatemala
Dirección General de Investigación
Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición

Informe final

Evaluación de sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas que minimicen la inseguridad alimentaria en Camotán, Chiquimula

Equipo de investigación

Jeniffer Adela Carolina Silva Yat
Coordinadora del proyecto

Andrea Carolina Meño Canel
Auxiliar de investigación II

Guatemala, 29 de noviembre, 2018

Unidad de investigación avaladora
Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales (IIA)

Otras instituciones participantes
Escuela de Ciencias Matemáticas y Físicas (ECMF)
Laboratorio de Ciencias Aplicadas, Facultad de Arquitectura
Multidisciplinary Laboratory, International Centre for Theoretical Physics (ICTP)
Departamento de Historia del Arte, Universidad de Granada
Industrial Artificial Intelligence Laboratory, Department of Industrial & Management Systems
Engineering, Kyung Hee University

Dr. Erwin Humberto Calgua Guerra
Director General de Investigación

Ing. Agr. MARN Julio Rufino Salazar
Coordinador General de Programas

Ing. Liuba Cabrera Ovalle de Villagran
Coordinadora del Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición

Ph.D. Jeniffer Adela Carolina Silva Yat
Coordinadora del proyecto

Andrea Carolina Meoño Canel
Auxiliar de investigación II

Otros colaboradores

Alejandra Rosales, Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala

Iván Morales, Escuela de Ciencias Matemáticas y Físicas (ECMF) y Laboratorio de Ciencias Aplicadas, Facultad de Arquitectura, Universidad de San Carlos de Guatemala

Byron Paiz, Escuela de Ciencias Matemáticas y Físicas (ECMF), Universidad de San Carlos de Guatemala

Luis García, Multidisciplinary Laboratory, International Centre for Theoretical Physics (ICTP)

Siomara Bonilla, Escuela de Humanidades, Ciencias Sociales y Jurídicas, Departamento de Historia del Arte, Universidad de Granada

Josué Obregón, Industrial Artificial Intelligence Laboratory, Department of Industrial & Management Systems Engineering, Kyung Hee University

Bitzel Cortez, Industrial Artificial Intelligence Laboratory, Department of Industrial & Management Systems Engineering, Kyung Hee University

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación, 2018. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada por la Dirección General de Investigación de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la Partida Presupuestaria 4.8.63.7.12 durante el año 2018 en el Programa Universitario de Investigación en Alimentación y Nutrición.

Financiamiento aprobado por Digi:_____ Financiamiento ejecutado:_____

Índice de contenido general

| | |
|---|-----------|
| 1. Resumen y palabras clave | 3 |
| 2. Palabras clave | 4 |
| 3. Abstract and keywords | 4 |
| 4. Introducción | 5 |
| 5. Planteamiento del problema | 6 |
| 6. Preguntas de investigación | 7 |
| 7. Delimitación en tiempo y espacio | 8 |
| 7.1 Ubicación geográfica | 8 |
| 7.2 Zonas de vida | 8 |
| 7.4 Suelos..... | 8 |
| 7.3 Capacidad de uso de la tierra | 9 |
| 7.4 Flora | 11 |
| 8. Justificación | 11 |
| 9. Marco teórico y estado del arte | 12 |
| 9.1 Seguridad alimentaria y nutricional | 12 |
| 9.1.1 Dimensiones primordiales de la seguridad alimentaria..... | 12 |
| 9.1.2 Categorías generales de inseguridad alimentaria | 13 |
| 9.2 Agricultura vertical..... | 14 |
| 9.3 Sistemas controlados | 14 |
| 9.4 Estado del arte | 16 |
| 10. Objetivo general | 18 |
| 11. Objetivos específicos | 18 |
| 12. Hipótesis | 19 |
| 13. Materiales y métodos | 19 |
| 13.1 Enfoque y tipo de investigación..... | 19 |
| i. Enfoque de la investigación | 19 |
| ii. Alcance de la investigación | 20 |
| 13.2 Recolección de datos | 20 |
| 13.3 Técnicas e instrumentos..... | 23 |
| 13.4 Operacionalización de las variables | 27 |
| 13.5 Procesamiento de datos y plan de análisis | 28 |
| 14. Vinculación, difusión y divulgación | 28 |
| 15. Productos, hallazgos, conocimientos o resultados | 30 |
| 15.1 Desarrollo de un prototipo con diseño construido con materiales de bajo costo y un sistema constructivo que pueda ser replicado | 30 |
| 15.2 Efecto del prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada sobre el ciclo de producción de los cultivos | 35 |
| 15.3 Comparación de rendimientos de producción de cultivos por medio de los sistemas de agricultura vertical y a campo abierto | 35 |
| 16. Análisis y discusión de resultados | 36 |
| 17. Conclusiones | 37 |
| 18. Impacto esperado | 38 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 19. Recomendaciones | 39 |
| 20. Referencias | 40 |
| 21. Apéndice | 46 |

Índice de tablas

| | |
|---|-----------|
| Tabla 1. Condiciones climáticas y topografía de las zonas de vida bh-S(t) y bs-S | 8 |
| Tabla 2. Tipos de suelos, superficie, y porcentaje que ocupan en el Municipio de Camotán | 9 |
| Tabla 3. Capacidad de uso del suelo, características, superficie, y porcentaje que ocupan en el Municipio de Camotán | 10 |
| Tabla 4. Operacionalización de variables | 27 |

Índice de figuras

| | |
|--|-----------|
| Figura 1. Longitudes de onda que más absorben las plantas..... | 15 |
| Figura 2. Distribución espacial de los tratamientos con sus repeticiones..... | 22 |
| Figura 3. Construcción del prototipo de sistema de agricultura vertical. | 23 |
| Figura 4. Vista de módulos de iluminación LED dentro del prototipo de sistema de agricultura vertical..... | 24 |
| Figura 5. Vista de sección frontal del prototipo de sistema de agricultura vertical.... | 25 |
| Figura 6. Actividades de vinculación, difusión y divulgación. | 29 |
| Figura 7. Vista frontal del prototipo de sistema de agricultura vertical. | 30 |
| Figura 8. Vista de planta del prototipo de sistema de agricultura vertical. | 31 |
| Figura 9. Vista lateral del prototipo de sistema de agricultura vertical. | 32 |
| Figura 10. Vista de sección frontal del prototipo de sistema de agricultura vertical.. | 33 |
| Figura 11. Vista de sección lateral de la instalación de aire acondicionado en el prototipo del sistema de agricultura vertical. | 34 |
| Figura 12. Vista de interfaz web..... | 35 |

Apéndice

| | |
|--|-----------|
| Apéndice 1. Manual de uso de interfaz web. | 46 |
|--|-----------|

Título del proyecto: “Evaluación de sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas que minimicen la inseguridad alimentaria en Camotán, Chiquimula”

1. Resumen y palabras clave

Sobre la base de crecimiento actual de la población, la producción de alimentos debe aumentar 50% para el año 2030 y 100% para el año 2050 para satisfacer las demandas proyectadas a nivel mundial. Aunado a esto, la inseguridad alimentaria tiene alta prevalencia en varios países de Latinoamérica y el Caribe. La inseguridad alimentaria es un problema de acceso a los alimentos, ya sea por pobreza, disponibilidad, o desnutrición. Por ello es indispensable generar conocimiento, tecnología, y herramientas alternativas económicas y accesibles, para asegurar la producción independiente de cultivos agrícolas y medicinales que satisfagan las necesidades nutricionales de las familias para que les permita enfrentar la inseguridad alimentaria.

El presente estudio se centra en desarrollar un prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada, evaluar su funcionamiento y probar parcialmente su aplicación en campo. El proyecto pretende generar lineamientos para la construcción, instalación, y mantenimiento del prototipo; analizar y validar su adaptación y aplicación en las áreas donde se ejecute la prueba parcial del prototipo; analizar la eficiencia de producción a través de un registro del funcionamiento durante el ciclo de diez especies de cultivos: chipilín (*Crotalaria longirostrata*), quilete (*Solanum americanum* Mill.), amaranto (*Amaranthus hybridus* L.), remolacha (*Beta vulgaris* var. *esculenta*), puerro (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*), cebollín (*Allium schoenoprasum*), espinaca (*Spinacia oleraceae*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), lechuga romana (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), escarola amarilla (*Lactuca sativa* var. *capitata*), escarola morada (*Lactuca sativa* var. *capitata*); comparar la eficiencia y productividad del prototipo de sistema agricultura vertical contra un sistema de cultivo tradicional; y capacitar personal para el uso y mantenimiento del prototipo de sistema de agricultura vertical.

2. Palabras clave

Agricultura sostenible, producción autosustentable, sistemas innovadores de cultivo, automatización, hidroponía, producción protegida.

3. Abstract and keywords

Based on the current population growth, food production should increase 50% by 2030 and 100% by 2050 to meet projected global demand. In addition to this, food security has a high prevalence in several countries in Latin America and the Caribbean. Food insecurity is a problem of access to food, whether due to poverty, availability, or malnutrition. It is therefore essential to generate knowledge, technology, and affordable and accessible alternative tools, to ensure the independent production of agricultural and medicinal crops that meet the nutritional needs of families to enable them to face food insecurity.

The present study focuses on the development of an automated prototype of vertical agriculture controlled with advanced technology, evaluating its operation and partially testing its application in the field. This research project aims to generate guidelines for the construction, installation, and maintenance of the prototype; analyze and validate its adaptation and application in the areas where the partial test of the prototype is executed; analyze the production efficiency through a sensor recording of the operation during the cycle of ten crop species: Chipilín (*Crotalaria longirostrata*), macuy (*Solanum americanum* Mill.), amaranth (*Amaranthus hybridus* L.), beet (*Beta vulgaris* var. *esculenta*), leek (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*), chives (*Allium schoenoprasum*), spinach (*Spinacia oleraceae*), chard (*Beta vulgaris* var. *cicla*), Romaine lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), yellow escarole (*Lactuca sativa* var. *capitata*), purple escarole (*Lactuca sativa* var. *capitata*); compare the efficiency and productivity of the vertical agriculture system prototype against a traditional farming system; and train personnel for the use and maintenance of the vertical agriculture system prototype.

Keywords: Sustainable agriculture, self-sustainable production, innovative farming systems, automation, hydroponics, protected production.

4. Introducción

La demanda mundial de alimentos es causada por la creciente población mundial, la pérdida de tierras agrícolas por el crecimiento urbano, y el cambio climático (Eigenbrod & Gruda, 2014; Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2015; Lambin et al., 2013; Parry & Hawkesford, 2010; United Nations [UN], 2017). Uno de los fenómenos climáticos que más ha afectado a Latinoamérica, el Caribe y Guatemala es El Niño. Dicho fenómeno climático es caracterizado por el calentamiento anormal de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico Ecuatorial Central y Oriental, se produce de cada dos a siete años y puede durar hasta 18 meses (Yeh et al., 2009). Durante los episodios de El Niño, los patrones normales de precipitaciones y de circulación atmosférica tropical se ven perturbados, desencadenando eventos climáticos extremos en todo el planeta; los principales sectores de la economía que son afectados son la agricultura y la inseguridad alimentaria (FAO, 2017a). Por ello, es de urgente necesidad desarrollar alternativas innovadoras que mejoren la eficiencia de la producción agrícola y de este modo ayudar a enfrentar y reducir la inseguridad alimentaria.

La agricultura vertical ha sido propuesta como una solución para incrementar la productividad por área al cambiar la dimensión horizontal por la vertical, así mejorando la eficiencia del uso del suelo para la producción agrícola (Eigenbrod & Gruda, 2014), además de incrementar la producción usando menos área de suelo (Hochmuth & Hochmuth, 2001; Resh, 2012). Algunos ejemplos de sistemas de agricultura vertical incluyen el uso de columnas (Linsley-Noakes, Wilken, & de Villiers, 2006), bolsas de cultivo verticalmente suspendidas (Neocleous, Kaittanis, Seraphides, & Polycarpou, 2010), sistemas de crecimiento apilados impulsados por transportadores (Mahdavi, Kafi, Naderi, & Sadat, 2012), diseños de estructuras-A (Hayden, 2006), y enfoques de fábricas de plantas (Kato et al., 2010).

A pesar de que estos estudios han reportado el aumento de la producción de cultivos y además de ser más eficientes en comparación con hidroponía horizontal (Touliatos, Dodd, & McAinsh, 2016), es escaso el enfoque de desarrollar sistemas de agricultura vertical sostenibles para enfrentar la inseguridad alimentaria.

Por ello, los objetivos del presente estudio son desarrollar un prototipo de agricultura vertical con un diseño modificado de los reportados hasta hoy, con el uso materiales de bajo costo, y un sistema de control automatizado para luz, temperatura, riego, humedad relativa, y ventilación, priorizando la ejecución de la prueba parcial en el Centro Universitario de Oriente (Cunori) que se encuentra en el corredor seco de Guatemala, para validar su funcionamiento. Por otra parte, busca reducir el tiempo de producción de los cultivos, para ayudar a complementar las necesidades alimenticias de los agricultores afectados por la sequía. Y por último, comparar los rendimientos de producción agrícola en el prototipo del sistema de agricultura vertical con el sistema tradicional a campo abierto.

5. Planteamiento del problema

En Latinoamérica el 20% del territorio posee un uso de suelo agrícola, y alrededor del 21% de la población activa trabaja directamente en la agricultura. No obstante su importancia, la agricultura es una de las actividades más vulnerables frente a los fenómenos de la naturaleza, incluyendo la sequía (FAO, 2000). En los climas más cálidos el aumento de la temperatura llega a ser perjudicial al aumentar el estrés térmico y acelerar inadecuadamente los ciclos de desarrollo de los cultivos (FAO, 2000).

El impacto del fenómeno climático El Niño ha sido uno de los más intensos y generalizados en los últimos cien años. Debido a que este fenómeno se caracteriza por el calentamiento anómalo en el Océano Pacífico Ecuatorial Oriental, tiene teleconexiones climáticas globales, siendo la característica más dominante de la variabilidad cíclica del clima en escalas subdecádicas (Yeh et al., 2009). Las temperaturas anómalas asociadas con El Niño demuestran que la variabilidad climática y extremos afectan la agricultura, la seguridad alimentaria y el estado nutricional (FAO, International Fund for Agriculture Development [IFAD], United Nations Children's Fund [UNICEF], World Food Program [WFP], & World Health Organization [WHO], 2018), y a pesar de que el pico de este fenómeno climático ha pasado y actualmente está disminuyendo, su impacto sigue creciendo, las cosechas en varias partes del mundo ya han fracasado y se había previsto que fracasarían en otras áreas (FAO, 2016). En los años 2014 y 2015, el daño en la agricultura guatemalteca por la sequía fue

entre 70 y 80%, y en el año 2016 se calcularon pérdidas del 90% en la cosecha de maíz y 60% en frijol (Felipe, 2016).

Los pequeños productores y las comunidades rurales son las más vulnerables a la sequía, convirtiéndola en un fenómeno socioeconómico importante por sus efectos en la pérdida de medios de vida, la descapitalización de las pequeñas economías familiares y el empobrecimiento (FAO, 2017b). Los mayores problemas de desnutrición y hambre se encuentran entre los menores de cinco años y mujeres pertenecientes a minorías étnicas y hogares pobres que habitan en zonas rurales (FAO, 2014). Referente al informe del Estado de Inseguridad Alimentaria para el año 2014, se observó que la proporción de la población total subalimentada en Guatemala durante el período 2012-2014 era de 14.3%, mientras que en el anterior período 2012-2014 era de 14.7%. Indicando que en Guatemala siguen existiendo 2.2 millones de personas subalimentadas, habiendo permanecido este índice casi inalterado por más de dos décadas. De igual manera, los índices de desnutrición crónica se sitúan entre los más altos de Latinoamérica, con aproximadamente el 45% de los niños menores de cinco años afectados (FAO, 2014).

Sin embargo, los intentos de desarrollar herramientas alternativas innovadoras que ayuden a reducir la inseguridad alimentaria en Guatemala han sido limitados hasta la fecha.

6. Preguntas de investigación

- ¿Qué diseño de prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada proporciona mejor resultado que un cultivo tradicional a campo abierto?
 - ¿Con qué materiales debe construirse el prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada para que pueda ser replicado a un precio accesible por la población?
- ¿Cómo se puede acelerar el ciclo de producción de los cultivos?
 - ¿Cómo aumentar el rendimiento de producción por área?
- ¿En cuánto aumenta el rendimiento de producción de cultivos de alto valor nutricional por medio de la agricultura vertical?

7. Delimitación en tiempo y espacio

7.1 Ubicación geográfica

El municipio de Camotán se encuentra ubicado en el Departamento de Chiquimula, al noreste del país (Programa de Emergencia por Desastres Naturales [Pedn], Unidad de Políticas e Investigación Estratégica [Upie], & Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [Maga], 2001). Su extensión territorial es de 230.81 Km² y limita al norte con el Municipio de La Unión, Zacapa; al Sur con Olopa; al Este con Jocotán; y al Oeste con Honduras (Pedn, Upie, & Maga, 2001).

7.2 Zonas de vida

Según De la Cruz (1976), Camotán se ubica dentro de las zona de vida, bosque húmedo subtropical templado bh-S(t) y bosque seco subtropical bs-S. Las condiciones climáticas y la topografía de estas zonas de vida se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones climáticas y topografía de las zonas de vida bh-S(t) y bs-S

| | Período de lluvias | Precipitación promedio anual (mm) | Biotemperatura media anual (°C) | Evapotranspiración potencial | Topografía | Elevación (msnm) |
|---------|---------------------------|--|--|-------------------------------------|---|-------------------------|
| bh-S(t) | Mayo a noviembre | 1110 a 1949 | 20 a 26 | 1 | De relieve ondulado a accidentado y escarpado | 650 a 1700 |
| bs-S | Junio a octubre | 500 a 855 | 19 a 24 | 1.5 | De relieve plano hasta accidentado en la parte baja de la Sierra de las Minas | 400 a 1200 |

Tomado de Orteaga (2013).

7.4 Suelos

Según Simmons, Tárano & Pinto (1959) la clasificación de suelos del Municipio de Camotán presenta cinco tipos de suelos. La superficie y porcentaje que ocupan se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de suelos, superficie, y porcentaje que ocupan en el Municipio de Camotán

| Municipio | Serie de suelos | Superficie (Ha) | Porcentaje (%) |
|--------------|----------------------|-----------------|----------------|
| Camotán | Chol | 5914.01 | 25.62 |
| | Jalapa | 1338.96 | 5.80 |
| | Subinal | 11107.17 | 48.12 |
| | Suelos de los valles | 2014.61 | 8.73 |
| | Tahuainí | 2706.64 | 11.73 |
| <i>Total</i> | | <i>23081.39</i> | <i>100</i> |

Adaptado de Pedn, Upie, & Maga (2001).

7.3 Capacidad de uso de la tierra

Según el sistema de clasificación de tierras por United States Department of Agriculture (Usda) (Klingebiel & Montgomery, 1961) el Municipio de Camotán presenta tres tipos de capacidad de uso. La superficie y porcentaje que ocupan se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Capacidad de uso del suelo, características, superficie, y porcentaje que ocupan en el Municipio de Camotán

| Municipio | Capacidad de uso | Características | Superficie (Ha) | Porcentaje (%) |
|--------------|------------------|---|-----------------|----------------|
| Camotán | VI | Los suelos de esta clase poseen continuas limitaciones que no pueden ser corregidas. Debido a dichas limitaciones los suelos, por lo general, no son aptos para cultivos, pero pueden ser utilizados en pasturas, bosques, y reservas de tierras vírgenes. | 196.71 | 0.85 |
| | VII | Los suelos de esta clase tienen muy severas limitaciones, que no pueden ser corregidas, que los incapacitan para los cultivos y limitan su uso exclusivamente para pasturas, bosques, o reservas de tierras vírgenes, bajo un manejo apropiado. | 21345.77 | 92.48 |
| | VIII | Los suelos y formas del terreno de esta clase tienen limitaciones, que no pueden ser corregidas, que impiden su uso para producción de cultivos comerciales y lo restringen a la de tierras vírgenes, abasteciendo de agua, áreas de esparcimiento, y parques nacionales. | 1538.91 | 6.67 |
| <i>Total</i> | | | <i>23081.39</i> | <i>100</i> |

Adaptado de Pedn, Upie, & Maga (2001).

7.4 Flora

La vegetación natural indicadora está constituida especialmente por *Pinus oocarpa*, *Curatella americana*, *Quercus sp.*, y *Byrsonimia crassifolia*. en la zona de vida bh-S(t), y por *Cochlospermum vitifolium*, *Swietenia humilis*, *Alvaradoa almorphides*, *Sabal mexicana*, *Phylocarpus septentrionalis*, *Ceiba aescutifolia*, *Albizia caribaea*, *Rhizophora mangle*, y *Avicennia nítida* en la zona de vida bs-S (Orteaga, 2013).

El sistema de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada busca ayudar a reducir la inseguridad alimentaria en el municipio de Camotán, en el departamento de Chiquimula, ya que es uno de los municipios del Oriente de Guatemala más afectados tanto por las sequías como por la inseguridad alimentaria.

La creación, implementación, y medición de resultados se desarrollará en un período de diez meses, iniciando en febrero del año 2018, y concluyendo en noviembre del mismo año. El trabajo de gabinete se realizará en las instalaciones de la Facultad de Agronomía y las oficinas de Cunori. El trabajo de campo se realizará en el espacio asignado por la Cunori. El monitoreo de los cultivos se realizará en coordinación con personal del proyecto y apoyo de Cunori. Para la construcción del prototipo el equipo tendrá la restricción del presupuesto con el objetivo que sea una proyecto replicable con una inversión considerable de acuerdo a los ventajas que ofrece.

8. Justificación

El municipio Camotán pertenece al departamento de Chiquimula, y es una de las áreas con mayor vulnerabilidad a las sequías recurrentes, con poca infraestructura viaria, poblaciones indígenas marginadas y repetidos episodios de desnutrición aguda y hambrunas (FAO, 2009). En 2016, el Maga estableció que entre el 50 y 70% de las cosechas se perdieron en esta área (Felipe, 2016).

Los sistemas tradicionales de cultivo hacen uso del suelo en forma horizontal con siembras cuyo crecimiento y desarrollo dependen de las condiciones de la naturaleza, permitiendo una cosecha para al menos el consumo propio. Mientras que nuevas tecnologías cultivo permiten

abordar la baja fertilidad del suelo y/o disponibilidad de agua, optimizar el cultivo en espacios reducidos (Orsini, Kahane, Nono-Womdimmg, & Gianquinto, 2013), adoptar sistemas integrados y orgánicos (Prain, 2006), reducir en un 16 a 20% el uso de agua para riego (Orsini et al., 2013), facilitar el manejo del cultivo, reducir el esfuerzo de la mano de obra (Mahdavi et al., 2012) y aumentar el rendimiento de los cultivos de dos a tres veces por metro cuadrado (Liu, Chen, & Liu, 2005), puede lograr una reducción en el uso de la tierra hasta 50 veces comparando el rendimiento anual de las agricultura vertical con sistemas tradicionales de cultivo (Podmirseg, 2015).

9. Marco teórico y estado del arte

9.1 Seguridad alimentaria y nutricional

Seguridad alimentaria es una situación que existe cuando todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico, social y económico a alimentos suficientes, seguros y nutritivos que satisfacen sus necesidades energéticas y preferencias alimentarias para una vida activa y saludable (FAO, 2001; Schmidhuber & Tubiello, 2007).

9.1.1 Dimensiones primordiales de la seguridad alimentaria

FAO (2001) señala que la definición de seguridad alimentaria se compone de cuatro dimensiones primordiales: disponibilidad, acceso, utilización, y estabilidad.

La primera dimensión se refiere a la disponibilidad física de los alimentos, es decir, a la capacidad general del sistema agrícola para satisfacer la demanda de alimentos (Schmidhuber & Tubiello, 2007). Sus subdimensiones incluyen los fundamentos agroclimáticos de la producción de cultivos y pastos (Tubiello, Soussana, & Howden, 2007) y toda la gama de factores socioeconómicos y culturales que determinan dónde y cómo los agricultores se desempeñan en respuesta a los mercados (Schmidhuber & Tubiello, 2007).

La segunda dimensión, el acceso, se refiere el acceso de los individuos a los recursos adecuados, para adquirir alimentos apropiados para una dieta nutritiva (Schmidhuber & Tubiello, 2007).

La tercera dimensión, la utilización, se refiere a la forma en la que el cuerpo aprovecha los diversos nutrientes presentes en los alimentos (FAO, 2011). El ingerir energía y nutrientes suficientes es el resultado de buenas prácticas de salud y alimentación, la correcta preparación de los alimentos, la diversidad de la dieta, y la buena distribución de los alimentos dentro de los hogares (FAO, 2011). Sus subdimensiones están relacionadas con la salud, incluyendo las condiciones sanitarias en toda la cadena alimentaria (Schmidhuber & Tubiello, 2007) .

Y la cuarta dimensión, la estabilidad, hace referencia a la estabilidad en el tiempo de las tres dimensiones anteriores, incluso en el caso de que su ingesta de alimentos sea adecuada en la actualidad, se considera que no gozan de completa seguridad alimentaria si no tienen asegurado el acceso a los alimentos de manera periódica, porque la falta de tal acceso representa un riesgo para la condición nutricional (FAO, 2011).

9.1.2 Categorías generales de inseguridad alimentaria

- **Inseguridad alimentaria transitoria**

Se da a corto plazo y es de carácter temporal, ocurre cuando hay una caída repentina de la capacidad de producir o acceder a una cantidad de alimentos suficiente para mantener un buen estado nutricional. Es el resultado de fluctuaciones a corto plazo en la disponibilidad y acceso de los alimentos, incluidos factores tales como las variaciones de año a año en la producción de alimentos a nivel nacional, los precios de los alimentos, y los ingresos a nivel del hogar (FAO, 2011).

- **Inseguridad alimentaria crónica**

Se da a largo plazo o de forma persistente, ocurre cuando las personas no tienen capacidad para satisfacer sus necesidades alimentarias mínimas durante un período prolongado. Es el resultado de largos períodos de pobreza, la falta de activos y de acceso a recursos productivos o financieros (FAO, 2011).

9.2 Agricultura vertical

Es un método para el cultivo de plantas, usualmente sin suelo ni luz natural (Frazier, 2017), que usa el espacio de la altura de un invernadero además del espacio del suelo (Mahdavi et al., 2012). Entre las ventajas de la agricultura vertical podemos mencionar que logra mayores rendimientos y tasas de crecimiento más rápidas, es posible mantener una producción durante todo el año, es resistente al cambio climático, utiliza hasta un 98% menos de agua en comparación con la agricultura de campo abierto, y promueve la restauración de ecosistemas dañados (Association for Vertical Farming, 2016).

9.3 Sistemas controlados

9.3.1 Luz

La función de la luz es indispensable para lograr un balance térmico favorable y para activar la fotosíntesis al transmitir parte del espectro visible (FAO, 2002). La luz se emite como ondas de fotones que son esencialmente haces de energía. Un número específico de fotones se puede medir como un mol, 6.023×10^{23} partículas. La cantidad de energía en cada fotón determina la longitud de la onda de cresta a cresta. Aunque las longitudes de onda pueden variar de nanómetros a metros, los pigmentos vegetales sólo pueden utilizar longitudes de onda específicas. La mayoría de esas longitudes de onda útiles producen entre 400 y 700 nanómetros (nm) en el espectro (Bright Agrotech, 2017).

La eficiencia de la luz es la cantidad de luz que las plantas pueden usar por watt o kilowatt de electricidad. La radiación fotosintética activa es la luz más útil para las plantas. Los pigmentos vegetales absorben la luz a longitudes de onda específica y usan la energía en la fotosíntesis. Los tres pigmentos principales son: 1) *clorofila a*, sus picos de absorción son a longitudes de onda entre 430 y 662 nm; 2) *clorofila b*, sus picos de absorción son a longitudes de onda entre 453 y 642 nm; 3) *carotenoides*, sus picos de absorción son a longitudes de onda entre 450 y 454 nm. Las longitudes de onda que más absorben las plantas están entre el rango de 450 y 660 nm (Bright Agrotech, 2017, Figura 1).

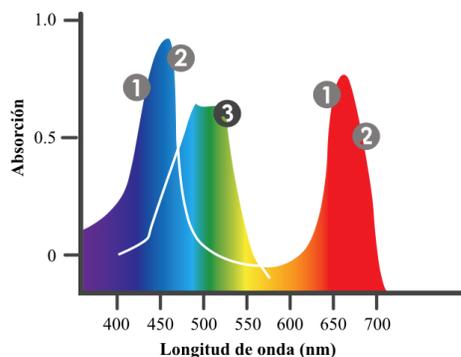


Figura 1. Longitudes de onda que más absorben las plantas. Adaptado de Bright Agrotech (2017).

9.3.2 Temperatura

La temperatura afecta directamente las funciones de fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración, y actividades enzimáticas. La temperatura óptima varía según las especies, pero casi siempre está comprendida entre 10 y 25 centígrados. Las plantas pueden tolerar temperaturas más bajas durante períodos cortos de tiempo, pero debe evitarse acercarse a estos valores porque pueden ser letales. Si el cultivo dispone de suficiente luz, la temperatura es el factor de mayor influencia en las tasas de crecimiento y desarrollo de las plantas. La tasa de crecimiento de las plantas aumenta con la temperatura hasta llegar a un nivel deseado óptimo (FAO, 2002).

9.3.3 Ventilación

El intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero incide en el clima del cultivo. No solamente cambia el balance de energía, por lo tanto la temperatura del aire, sino que también afecta el contenido de vapor de agua y de dióxido de carbono (CO₂) (FAO, 2002). La ventilación regula el aire húmedo, la temperatura por el flujo de la radiación solar o de la fuente de luz, mantiene los niveles de concentración de dióxido de carbono (CO₂), y proporciona un flujo de aire uniforme a lo largo de todo el invernadero (Guerrero, 2011).

9.3.4 Humedad

El aire del invernadero es enriquecido con vapor de agua por evaporación desde el suelo y por transpiración de las plantas. Conforme la temperatura decrece en el invernadero, y puesto que la humedad relativa varía inversamente con la temperatura para un contenido absoluto de vapor de agua constante en el aire, la humedad relativa aumenta y puede alcanzar valores cercanos a la saturación. Durante el día por efecto del calor que genera la luz del sol, la humedad absoluta aumenta porque la apertura de los estomas aumenta la transpiración. Al mismo tiempo la humedad relativa puede disminuir con el aumento de la temperatura y alcanzar valores muy bajos, especialmente si la ventilación es adecuada (FAO, 2002).

9.3.5 Dióxido de carbono (CO₂)

Es el nutriente más importante de los cultivos puesto que contiene aproximadamente un 44% de carbono y de oxígeno. El aire es la única fuente de CO₂ para las plantas, y su contenido no excede el 0.03% (300 ppm) (FAO, 2002).

9.4 Estado del arte

Sistemas de agricultura vertical

Los sistemas de agricultura vertical se han propuesto como una solución de ingeniería para aumentar la productividad por unidad de área de tierra cultivada, extendiendo la producción de cultivos a la dimensión vertical (Touliatos, Dood, & McAinsh, 2016).

Los sistemas de agricultura vertical se caracterizan por ser cultivos sin un medio sólido como sustrato que puede ser orgánico e inorgánico (Gruda, 2009; Gruda & Tanny, 2014), y materiales innovadores como bolsas, mats, contenedores, y usando soluciones nutritivas (Eigenbrod & Gruda, 2014).

Las tecnologías que se han utilizado dentro de los sistemas de agricultura vertical han sido tres: riego por goteo, hidroponía, aeroponía, (Despommier, 2009; Kalantri, Tahir, Lahijani, & Kalantri, 2017) y algunas modificaciones derivadas de estas tres tecnologías.

Los sistemas de agricultura vertical se han probado con una diversidad de especies vegetales incluyendo *Gerbera jamesonii* cv. Antibes (Mahdavi, Kafi, Naderi, & Sadat, 2012), *Lactuca sativa* L. (Touliatos, 2016), *Solanum lycopersicum* (Benke & Tomkins, 2017), *Fragaria x ananassa* (Benke & Tomkins, 2017), *Solanum tuberosum* (Frazier, 2017), *Ipomoea batatas* (Frazier, 2017), *Allium cepa* (Frazier, 2017), *Cucumis sativus* L., *Ocimum basilicum* L. (Song, Tan, & Tan, 2018), *Capsicum annum* L. (Song, Tan, & Tan, 2018), entre otros.

Algunos países han iniciado el uso de los sistemas de agricultura vertical con fines de lucro son Singapur y Canadá desde 2009, Japón y Holanda desde 2011, Suecia desde 2012, China desde 2016 (Kalantri, Tahir, Joni, & Fatemi, 2017). En Latinoamérica, algunos países que han iniciado el uso de sistemas de agricultura vertical con fines de investigación son Chile (Nieto, 2001), Brasil (Sociedade Nacional de Agricultura [SNA], 2017), y México (De Anda & Shear, 2017).

Algunos aspectos de tecnología que se controlan son sistemas acuapónicos y cultivo de peces, sistemas hidropónicos, sistemas aeropónicos, uso de biogás generado de un biodigestor anaeróbico, controles automatizados de temperatura, iluminación LED, fertilización y riego (Kalantri, Tahir, Joni, & Fatemi, 2017).

En Guatemala se han empezado algunos estudios sobre técnicas de acuaponía con diferentes chiles nativos (Valdez-Sandoval & Guerra-Centeno, 2016) y diferentes variedades de frijol (Valdez-Sandoval, Guerra-Centeno, & Díaz-Rodríguez, 2017).

Sin embargo, dada la importancia de las características de los sistemas verticales la implementación de sistemas verticales para ayudar a contrarrestar la inseguridad alimentaria sigue siendo escasa.

Plantas guatemaltecas utilizadas en la alimentación humana

Los centros de origen y diversidad de plantas cultivadas como Mesoamérica, del cual Guatemala forma parte, se caracterizan por ser centros de alta diversidad biológica, acompañada de alta riqueza cultural (Azurdía, 2016).

Las especies nativas poco explotadas se caracterizan por poseer contenidos nutricionales sobresalientes, a tal grado que superan considerablemente al contenido nutricional de las especies cultivadas introducidas (Azurdia, 2016). Algunas de estas especies nativas son chipilín (*Crotalaria longirostrata*), verdolaga (*Portulaca oleraceae*), berros (*Calandrinia micrantha*), colinabo (*Brassica campestris*), hierba madre (*Jalomata procumbens*), cerraja (*Sonchus oleraceus* L.), mácare (*Galinsoga parviflora*), malvilla (*Anoda cristata*), anillito (*Rytidostylis gracilis*), y castanichaj (*Solanum wendlandii*) (Azurdia, 2016).

La agrobiodiversidad útil en alimentación humana puede contribuir a la seguridad alimentaria en tres formas: Primero, en forma inmediata como suplemento alimenticio; segundo, a través de la generación de ganancias económicas mediante la creación de valor agregado; y tercero, a través de la investigación científica y tradicional que permita un proceso de domesticación que a su vez preserve los altos contenidos nutricionales y que proteja a los homólogos silvestres (Azurdia, 2016).

10. Objetivo general

Evaluar un sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas que minimicen la inseguridad alimentaria en Camotán, Chiquimula.

11. Objetivos específicos

- Identificar un prototipo que cuente con un diseño construido con materiales económicos y un sistema constructivo que pueda ser replicado por la población y proporcione mejor resultado que un cultivo tradicional a campo abierto.
- Determinar el efecto del prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada sobre el ciclo de producción de los cultivos agrícolas de alto valor nutricional.
- Comparar los rendimientos de producción de cultivos agrícolas de alto valor nutricional en los sistemas de agricultura vertical mediante un prototipo establecido y a campo abierto.

12. Hipótesis

El prototipo de sistema de agricultura vertical mejora el rendimiento de la producción de plantas de alto valor nutricional y además se aprovecha el espacio vertical que permite el incremento de la biomasa para consumo humano.

13. Materiales y métodos

13.1 Enfoque y tipo de investigación

Se utilizó el tipo de investigación experimental, la cual se define como una descripción y análisis de lo que en el futuro sucederá si se verifican ciertas condiciones bien controladas. En la investigación experimental el investigador manipula una o varias variables independientes en condiciones rigurosas de control, prediciendo lo que pasará en una o varias variables dependientes (Achaerandio, 2012).

Selección de los factores y sus respectivo niveles

- *Condiciones ambientales:* Sistema de agricultura vertical (condiciones *Controladas*), agricultura a campo abierto (condiciones *No Controladas*)
- *Especies:* Chipilín (*Crotalaria longirostrata*), quilete (*Solanum americanum* Mill.), amaranto (*Amaranthus hybridus* L.), remolacha (*Beta vulgaris* var. *esculenta*), puerro (*Allium ampeloprasum* var. *porrum*), cebollín (*Allium schoenoprasum*), espinaca (*Spinacia oleraceae*), acelga (*Beta vulgaris* var. *cicla*), lechuga romana (*Lactuca sativa* L. var. *longifolia*), escarola amarilla (*Lactuca sativa* var. *capitata*), escarola morada (*Lactuca sativa* var. *capitata*).

Selección de la unidad experimental

La unidad experimental corresponde a una estructura vertical, en cada unidad estuvieron en observación once y veintidós plantas de la misma especie, las cuales fueron sujetas a medición por medio de un sub-muestreo.

i. Enfoque de la investigación

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo. Utilizó la recolección de datos semanales sobre la producción de cultivos en los sistemas de agricultura vertical y en campo

abierto, para comprobar la hipótesis sobre la eficiencia de la producción del sistema de agricultura vertical sobre el sistema de agricultura abierto.

ii. Alcance de la investigación

La investigación tuvo un alcance explicativo, ya que según Sampieri, Collado y Lucio (2010):

Están dirigidos a responder a las causas de los eventos físicos o sociales.

...su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da éste, o por qué dos o más variables están relacionadas.

Las investigaciones explicativas son más estructuradas que las demás clases de estudios y de hecho implican los propósitos de ellas (exploración, descripción y correlación), además de que proporcionan un sentido de entendimiento del fenómeno a que hacen referencia. (p 65-66).

En esta investigación se buscó comparar la producción generada de los sistemas de agricultura vertical y convencional a campo, y determinar cuál de las dos produce mejores rendimientos. Al mismo tiempo se buscó determinar el resultado de la producción agrícola de campo abierto, expuesta a las condiciones naturales del clima y la producción agrícola vertical controlada por un sistema de tecnología avanzada que controló las condiciones del clima como luz, humedad relativa, temperatura y el riego.

En esta investigación se buscó comparar los sistemas de agricultura vertical con el convencional a campo abierto evaluando en ambos el crecimiento de las plantas de cada cultivo (número de hojas, largo y diámetro de tallo) y biomasa (peso seco foliar y radicular), esperando que el sistema de agricultura vertical aumentara o mejorara la producción.

13.2 Recolección de datos

En la investigación del rendimiento de la biomasa de las diez especies de interés se utilizó el diseño experimental cuadrado greco latino, esperando estudiar el comportamiento de las especies en posición vertical: superior, media y baja, para el caso de sistema vertical (bajo

condiciones *Controladas*) para el caso del sistema convencional (bajo condiciones *No Controladas*) se incluye el sub-nivel “p” debido a que se encuentra en el suelo (piso) directamente. Se estudiaron los efectos de cada factor, considerando como bloques las condiciones *Controladas* y *No Controladas* a las que estuvieron sometidos. Este diseño fue el que presentó mayor ajuste para conocer los efectos de las condiciones *Controladas* y *No Controladas* sobre las especies vegetales en estudio.

Repeticiones

Se utilizaron tres repeticiones por conveniencia. Además de acoplarse al espacio disponible para la realización del experimento.

Aleatorización

Las unidades experimentales fueron distribuidas de forma aleatoria dentro del área experimental, con el objetivo de obtener independencia de los datos como se muestra en la Figura 2, enlistando las unidades experimentales que estuvieron sujetas al proceso de aleatorización.

| Especies | Distribución | Sistema | Repeticiones | | | Tratamientos con repeticiones | | |
|----------|--------------|---------|--------------|----|----|-------------------------------|----------|----------|
| E1 | S | C | R1 | R2 | R3 | E1SR1C | E1SR2C | E1SR3C |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E1MR1C | E1MR2C | E1MR3C |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E1BR1C | E1BR2C | E1BR3C |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E1PR1NC | E1PR2NC | E1PR3NC |
| E2 | S | C | R1 | R2 | R3 | E2SCR1 | E2SCR2 | E2SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E2MCR1 | E2MCR2 | E2MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E2BCR1 | E2BCR2 | E2BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E2PNCR1 | E2PNCR2 | E2PNCR3 |
| E3 | S | C | R1 | R2 | R3 | E3SCR1 | E3SCR2 | E3SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E3MCR1 | E3MCR2 | E3MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E3BCR1 | E3BCR2 | E3BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E3PNCR1 | E3PNCR2 | E3PNCR3 |
| E4 | S | C | R1 | R2 | R3 | E4SCR1 | E4SR1R2 | E4SR2R3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E4MCR1 | E4MCR2 | E4MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E4BCR1 | E4BCR2 | E4BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E4PNCR1 | E4PNCR2 | E4PNCR3 |
| E5 | S | C | R1 | R2 | R3 | E5SCR1 | E5SCR2 | E5SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E5MCR1 | E5MCR2 | E5MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E5BCR1 | E5BCR2 | E5BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E5PNCR1 | E5PNCR2 | E5PNCR3 |
| E6 | S | C | R1 | R2 | R3 | E6SCR1 | E6SCR2 | E6SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E6MCR1 | E6MCR2 | E6MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E6BCR1 | E6BCR2 | E6BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E6PNCR1 | E6PNCR2 | E6PNCR3 |
| E7 | S | C | R1 | R2 | R3 | E7SCR1 | E7SCR2 | E7SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E7MCR1 | E7MCR2 | E7MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E7BCR1 | E7BCR2 | E7BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E7PNCR1 | E7PNCR2 | E7PNCR3 |
| E8 | S | C | R1 | R2 | R3 | E8SCR1 | E8SCR2 | E8SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E8MCR1 | E8MCR2 | E8MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E8BCR1 | E8BCR2 | E8BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E8PNCR1 | E8PNCR2 | E8PR2R3 |
| E9 | S | C | R1 | R2 | R3 | E9SCR1 | E9SCR2 | E9SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E9MCR1 | E9MCR2 | E9MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E9BCR1 | E9BCR2 | E9BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E9PNCR1 | E9PNCR2 | E9PNCR3 |
| E10 | S | C | R1 | R2 | R3 | E10SCR1 | E10SCR2 | E10SCR3 |
| | M | C | R1 | R2 | R3 | E10MCR1 | E10MCR2 | E10MCR3 |
| | B | C | R1 | R2 | R3 | E10BCR1 | E10BCR2 | E10BCR3 |
| | P | NC | R1 | R2 | R3 | E10PNCR1 | E10PNCR2 | E10PNCR3 |

Figura 2. Distribución espacial de los tratamientos con sus repeticiones. *S = superior, M = medio, B = bajo, P = piso. Sistema: C = controlado, NC = no controlado

Modelo Estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijk}$$

μ : Media del efecto global

α_i : Es el efecto incremental sobre la media causado por el nivel i del factor de especies

β_j : Es el efecto incremental sobre la media causada por el nivel j del factor distribución

γ_k : Es el efecto incremental sobre la media causado por el nivel k del factor sistema

ε_{ijk} : error aleatorio

13.3 Técnicas e instrumentos

La construcción del sistema de agricultura vertical consiste en un edificio de 13.82 metros cuadrados con una altura de 3.14 metros, con materiales de larga duración que permitan una vida útil de por lo menos 20 años (Figura 3).

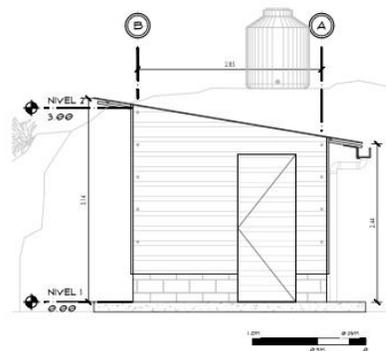


Figura 3. Construcción del prototipo de sistema de agricultura vertical.

El sistema de agricultura vertical consta de tres módulos de tubería pvc (Figura 4). Los dos módulos de los extremos constan de 12 estructuras verticales con 11 posturas para cultivo cada una, en uno de sus lados. Y el módulo interior consta de 12 estructuras verticales con 22 posturas de cultivo (11 de cada lado).

Entre los módulos de cultivo se colocaron módulos de iluminación LED, direccionados individualmente a cada módulo de cultivo (Figura 4).

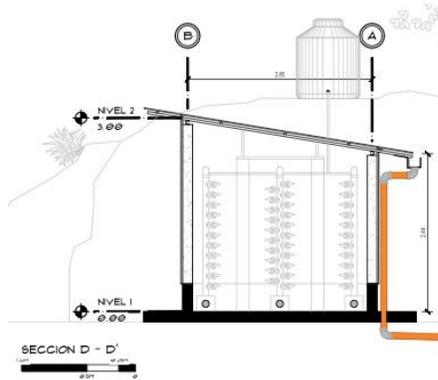


Figura 4. Vista de módulos de iluminación LED dentro del prototipo de sistema de agricultura vertical.

Este sistema fue expuesto a condiciones controladas de luz, temperatura, riego, humedad relativa, y ventilación.

13.3.3 Instrumento

El registro de la información se realizó por medio de la observación semanal de las unidades de análisis, utilizando una tabla de recolección datos. Este trabajo se realizó con el apoyo de Cunori.

13.4 Operacionalización de las variables

Tabla 4. Operacionalización de variables

| Objetivo específico | Variabes | Técnicas | Instrumentos | Medición |
|---|-----------------------|---|---|--|
| Identificar un prototipo que cuente con un diseño construido con materiales económicos y un sistema constructivo que pueda ser replicado por la población y proporcione mejor resultado que un cultivo tradicional a campo abierto. | Producción | Conteos semanales, utilizando submuestreo por cada unidad experimental | Calculadora, tabla de datos | Número de plantas |
| Determinar el efecto del prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada sobre el ciclo de producción de los cultivos de plantas nativas de alto valor nutricional. | Rendimiento y biomasa | Sub muestreo por cada unidad experimental, y utilización de métodos directos | Etiquetas, balanza analítica, escalímetro, hojas de registro, horno de convección | Peso seco foliar (gr), peso seco radicular (gr), tamaño de hojas (cm), tamaño de tubérculos (cm) |
| Comparar los rendimientos de producción de plantas nativas de alto valor nutricional de forma cultivo tradicional a campo abierto y por medio de la agricultura vertical mediante un prototipo establecido | Tamaño | Mediciones directas semanales, utilizando sub muestreo por cada unidad experimental | Vernier | Diámetro (mm) |
| | | | Escalímetro | Largo tallo (cm) |
| | | | Tabla de datos | Número de hojas |
| | | | Hojas de cálculo (Excel) | --- |

13.5 Procesamiento de datos y plan de análisis

La ordenación de datos, análisis generales de las variables respuesta por especie de acuerdo al tratamiento, se utilizó estadística descriptiva (medidas de resumen, gráficas de dispersión, etc.), generando tablas en formato Excel para el manejo de la base de datos.

Se aplicó análisis de varianza (Andeva) para comprobar las hipótesis estadísticas, es decir, obteniendo los resultados preliminares del comportamiento de las variables respuesta registradas de acuerdo al tratamiento sometido, cuando se obtuvo evidencia estadística significativa, se procedió a la comparación de medias considerando, utilizando el análisis post hoc. En base a los resultados de homogeneidad de varianza y medias, se evaluó si era conveniente la utilización de la prueba de Tukey o Games Howell para determinar cuál de los factores influía significativamente en el comportamiento del rendimiento de las especies de interés. Dichas herramientas se utilizaron con un nivel de significancia de 5% (definida por el investigador).

Para el procesamiento de datos se utilizaron los softwares Infostat/E versión 20170.1.2 y SPSS versión 15.2

14. Vinculación, difusión y divulgación

El proyecto buscó establecer alianzas estratégicas entre la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Cunori, la ECMF, y el ICTP. En el ámbito académico el grupo de investigadores estuvo formado por representantes de la Universidad Granada (España), la Universidad Kyung Hee (Corea del Sur), y el International Centre of Theoretical Physics (Italia) que colaboraron con asesoramiento técnico y científico. Para cumplir los objetivos del proyecto, el desarrollo de los sistemas control avanzado se ejecutaron por el equipo multidisciplinario de investigadores voluntarios guatemaltecos, que actualmente residen en el extranjero, de las instituciones descritas anteriormente. Para ello, fue necesaria la visita de al menos uno de ellos para integrar el sistema de control desarrollado en el prototipo construido en las instalaciones en Cunori, Chiquimula. Producto de ello se realizaron charlas – talleres técnico-científicas sobre uso de instrumentación eléctrica aplicada a la agricultura en Cunori (Figura 6).



Figura 6. Actividades de vinculación, difusión y divulgación.

Como estrategia de difusión se elaboró un informe final de investigación con la descripción del proceso realizado para la construcción del prototipo y los resultados del monitoreo realizado en los cultivos producidos. En la Universidad de San Carlos de Guatemala se publicará un artículo en la revista *Agro* de la Facultad de Agronomía.

En el ámbito nacional, Cunori realizará publicaciones digitales en su página web. En el ámbito internacional se publicará un artículo en una revista de acceso abierto (*Open Access*) indexada y arbitrada por expertos en el tema investigado. Se realizaron diferentes presentaciones de resultados e implementación en Cunori. Como apoyo a esta divulgación se elaboraron manuales de construcción y mantenimiento del prototipo, y de uso de interfaz web (Apéndice 1).

15. Productos, hallazgos, conocimientos o resultados

15.1 Desarrollo de un prototipo con diseño construido con materiales de bajo costo y un sistema constructivo que pueda ser replicado

Se desarrolló un prototipo construido con materiales de larga duración, de por lo menos 20 años, y un sistema constructivo disponible para ser replicado. El prototipo cubre una superficie de 13.82 metros cuadrados (m^2) y una altura máxima de 3.14 m (Figura 7).

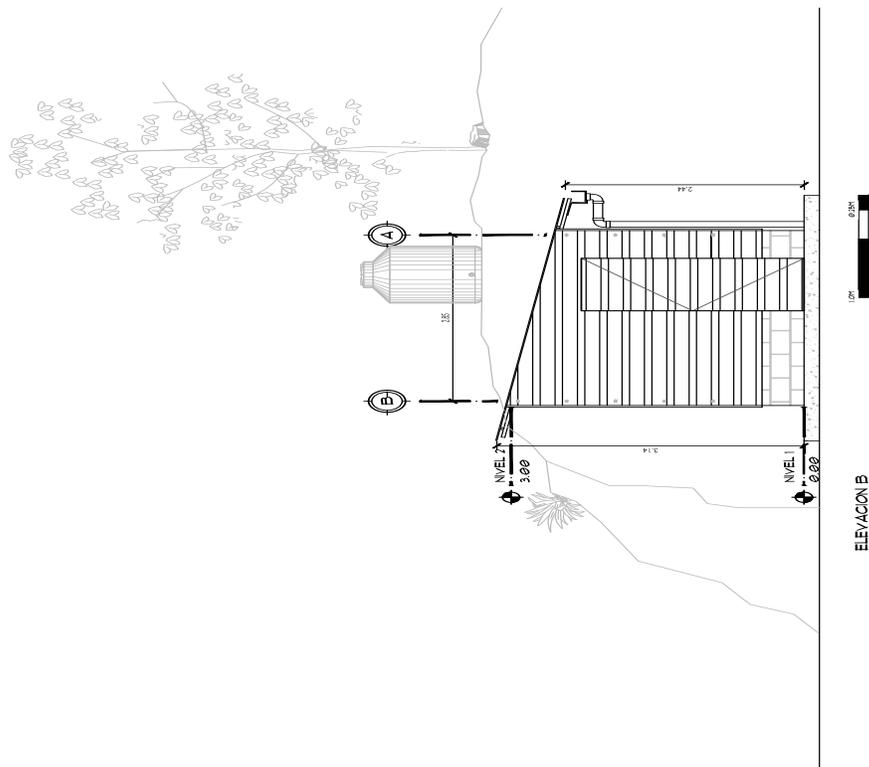


Figura 7. Vista frontal del prototipo de sistema de agricultura vertical.

Se inició con una base de concreto, de 0.1 m de espesor, donde se asentaron ocho columnas fundidas, reforzadas con varillas de hierro, a una distancia de 1.62 m una de otra, cuatro de 2.44 m de altura al costado derecho, y cuatro de 3.14 m de altura al costado izquierdo (Figura 8). Cada columna cuenta con una zapata y la estructura se amarró en la parte inferior por medio de una solera de humedad.

Se levantó un muro de 0.6 m de altura de block de concreto. Sobre este muro se asentaron paneles Isobox (Figura 8), que consisten de una fachada de doble revestimiento metálico con aislamiento de espuma rígida de poliuretano, adecuado para los fines del prototipo que exige una temperatura controlada. La cubierta consistió de lámina galvanizada calibre 28.

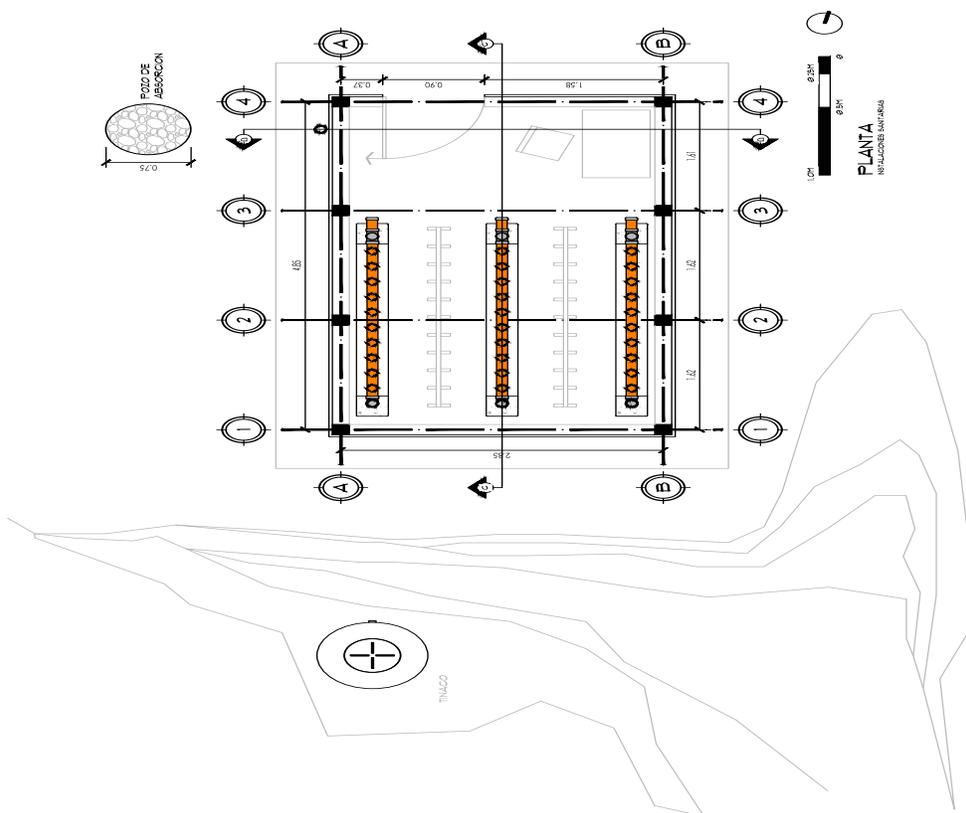


Figura 8. Vista de planta del prototipo de sistema de agricultura vertical.

En su interior se levantaron tres bases de 0.1 m de altura. Sobre cada una de las bases se suspendieron los módulos de cultivo que consisten de 12 tubos de PVC de 4" de diámetro, unidos por yee sanitarias y codos a los extremos. Cada tubo de PVC tiene 11 agujeros de 2 3/8" de diámetro donde se colocaron las plantas (Figura 9).

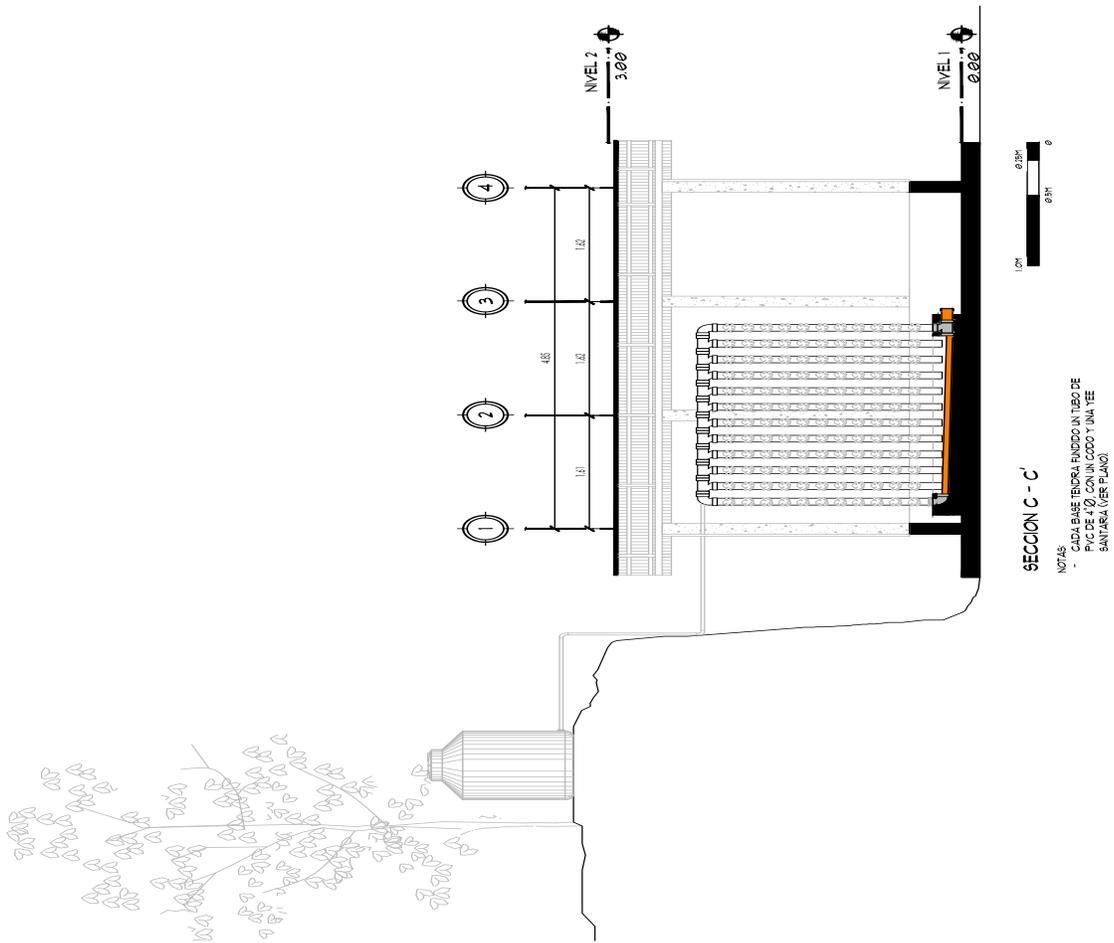


Figura 9. Vista lateral del prototipo de sistema de agricultura vertical.

Entre los módulos de cultivo se colocaron módulos de iluminación LED roja, que corresponde a longitud de onda larga de 450 – 660 nm, siendo este el rango de longitud de onda que más absorben las plantas. El fotoperiodo utilizado fue de 20/4 (L/O) (Figura 10).

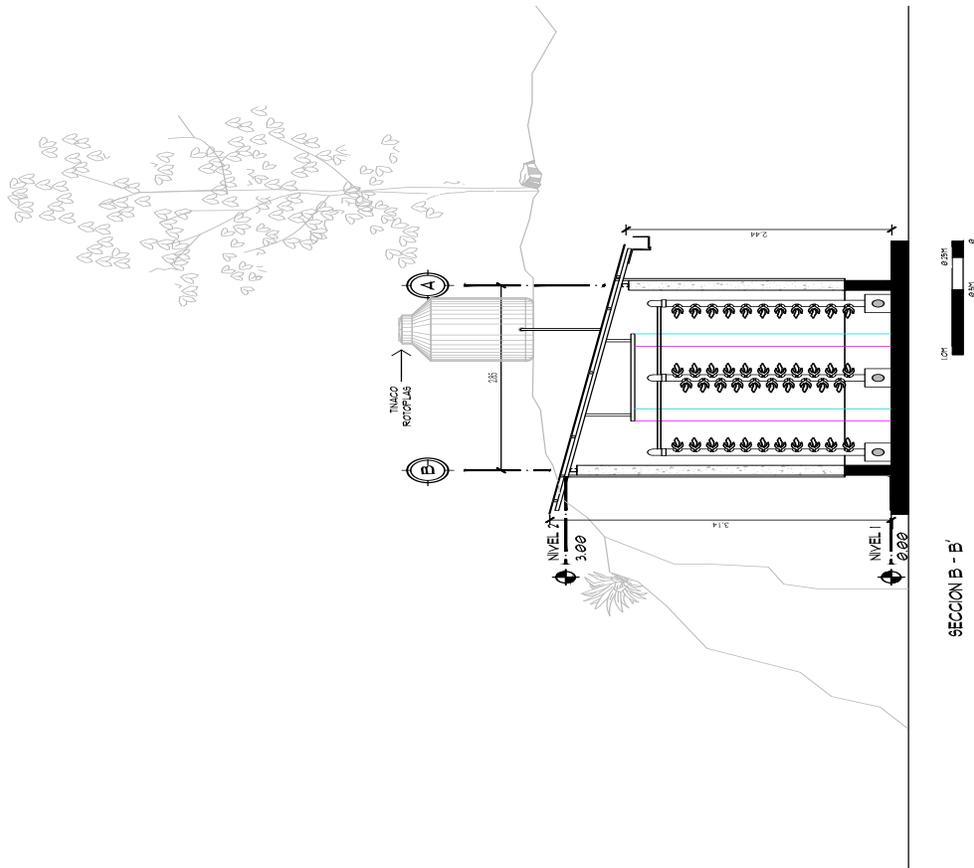


Figura 10. Vista de sección frontal del prototipo de sistema de agricultura vertical.

En la parte trasera superior central se colocó el aire acondicionado que mantuvo un rango de temperatura de 22 – 25 °C (Figura 11).

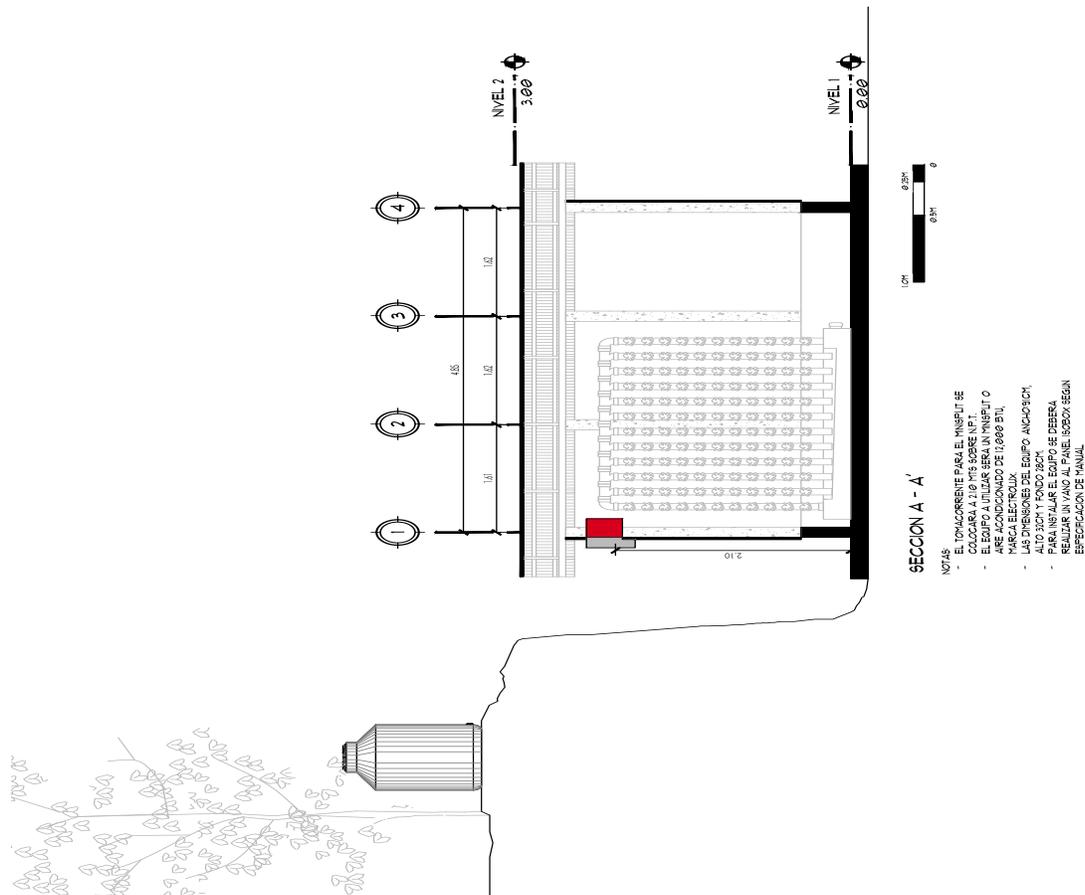


Figura 11. Vista de sección lateral de la instalación de aire acondicionado en el prototipo del sistema de agricultura vertical.

En cada columna de tubo de PVC se colocó un sensor, distribuyéndolos en posición superior, media, y baja, con el objetivo de estudiar el comportamiento y monitorear la humedad y riego de las especies en posición vertical. La red de sensores en todo momento monitorea la humedad de cada uno de los módulos de cultivo, y envía estos datos a un servidor principal (broker) para ser almacenados en una tabla que puede ser descargada desde cualquier dispositivo electrónico que pueda visualizar una página web (teléfono, computadora o tablet). También pueden ser descargados datos de humedad del aire (relativa), presión atmosférica (hPa) y temperatura ambiental (°C). Para visualizar y descargar dichos datos, además de poder modificar otros parámetros como la frecuencia con la que se toman estos datos, la fecha y hora del sistema, se desarrolló una página web (esta

puede ser vista sin necesidad de internet) la cual incluye tres pestañas principales que permiten al usuario monitorear datos, o bien modificar parámetros (Figura 12).

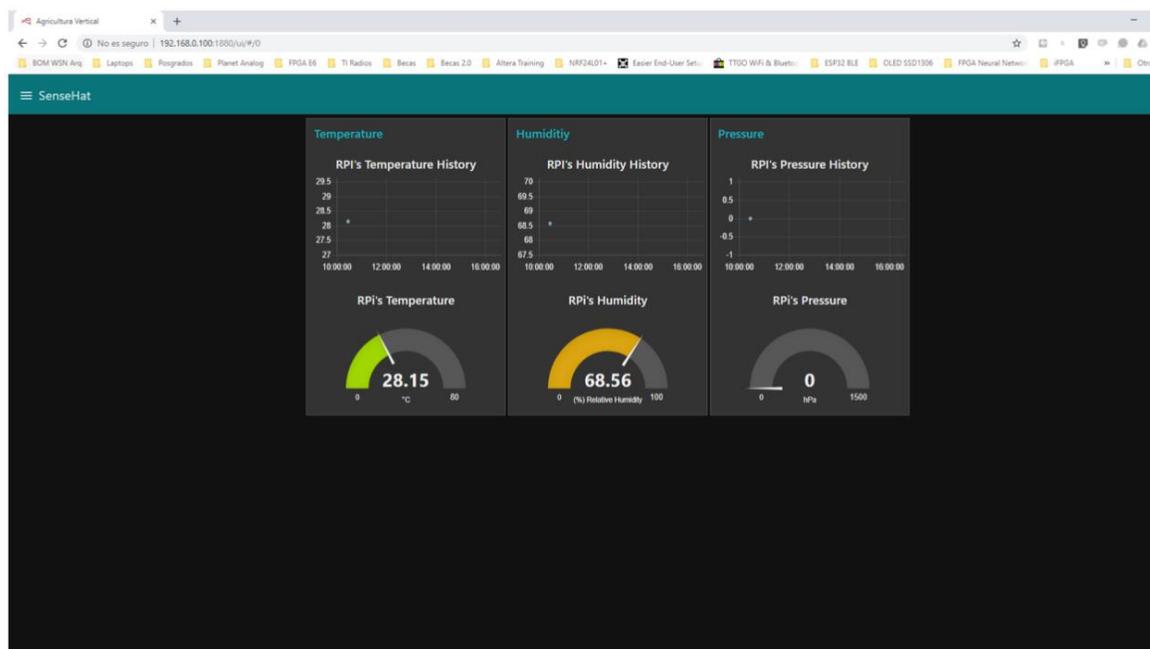


Figura 12. Vista de interfaz web.

15.2 Efecto del prototipo de agricultura vertical controlado con tecnología avanzada sobre el ciclo de producción de los cultivos

El ciclo de producción de los cultivos en relación al tiempo se redujo a la mitad comparado con lo reportado en cultivos convencionales a campo abierto. Se asume que este efecto es derivado de las condiciones controladas dentro del prototipo, principalmente por la exposición intensiva a luz con un fotoperíodo 20/4.

15.3 Comparación de rendimientos de producción de cultivos por medio de los sistemas de agricultura vertical y a campo abierto

Existen diferencias significativas entre los rendimientos del sistema de agricultura vertical bajo condiciones controladas comparado con el sistema convencional a campo abierto. Se asume que estas diferencias se presentan porque dentro del prototipo de sistema de agricultura vertical la densidad de plantas es mayor, el ciclo de producción de los cultivos es

reducido, y las condiciones de crecimiento como luz, temperatura y riego, son intensivas, controladas y constantes.

16. Análisis y discusión de resultados

La alternativa de sistema de agricultura vertical ha sido propuesta para incrementar la productividad por área, usando menos área de suelo, conllevando a hacer eficiente el uso del suelo (Eigenbrod & Gruda, 2014; Hochmuth & Hochmuth, 2001; Resh, 2012). Diversidad de sistemas de agricultura vertical se han desarrollado usando columnas (Linsley-Noakes, Wilken, & de Villiers, 2006), bolsas de cultivo verticalmente suspendidas (Neocleous, Kaittanis, Seraphides, & Polycarpou, 2010), sistemas de crecimiento apilados impulsados por transportadores (Mahdavi, Kafi, Naderi, & Sadat, 2012), diseños de estructuras-A (Hayden, 2006), y enfoques de fábricas de plantas (Kato et al., 2010). A pesar de que estos estudios reportan aumento de la producción de cultivos y mayor eficiencia en comparación con hidroponía horizontal (Touliatos, Dodd, & McAinsh, 2016), es escaso el enfoque de desarrollar sistemas de agricultura vertical sostenibles para enfrentar la inseguridad alimentaria.

En este proyecto, el enfoque fundamental fue desarrollar un prototipo de sistema de agricultura vertical que pueda ser replicado para asegurar la producción agrícola, y así contribuir a minimizar la inseguridad alimentaria, especialmente en Camotán, Chiquimula que es una de las áreas en Guatemala más vulnerables a la sequía y que, consecuentemente, sufre de forma agravada problemas de desnutrición y hambre.

El desarrollo del prototipo de sistema de agricultura vertical tecnificado fue exitosamente desarrollado. Se utilizaron materiales de bajo costo con un tiempo de vida útil de por lo menos 20 años, y un sistema constructivo disponible para ser replicado. Observamos que el rendimiento está asociado a las condiciones controladas dentro del prototipo de sistema de agricultura vertical. El ciclo de producción de los cultivos en relación al tiempo se redujo a la mitad comparado con lo reportado en cultivos convencionales a campo abierto que va de entre 50 – 70 días.

Adicionalmente, en este estudio, desarrollamos una efectiva interfaz web para monitorear la humedad de cada uno de los módulos de cultivo, que envía los datos a un servidor principal (broker) para ser almacenados en una tabla que puede ser descargada desde cualquier dispositivo electrónico que pueda visualizar una página web. También pueden ser descargados datos de humedad del aire (relativa), presión atmosférica (hPa) y temperatura ambiental (°C).

En resumen, reportamos el desarrollo exitoso de un prototipo de sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas, con materiales de bajo costo y una durabilidad de largo plazo. El funcionamiento del prototipo fue validado con diez especies y comparado con un sistema convencional a campo abierto. El efecto del prototipo de sistema de agricultura vertical tecnificado en el rendimiento de las especies fue significativo en comparación con el sistema convencional a campo abierto. Adicionalmente desarrollamos una interfaz web que monitorea los módulos de cultivo, y envía los datos a un servidor principal para ser almacenados en una tabla que estará disponible desde cualquier dispositivo electrónico que pueda visualizar una página web. Este prototipo pretende ser una herramienta alternativa efectiva que contribuya a minimizar la inseguridad alimentaria en Camotán, Chiquimula.

17. Conclusiones

- El prototipo de sistema de agricultura vertical construido con materiales de larga duración, con un tiempo de vida útil de por lo menos 20 años, fue posible desarrollarlo. Por consiguiente puede ser replicado efectivamente para la producción de diversos cultivos agrícolas.
- El prototipo de sistema de agricultura vertical ofrece directa e indirectamente las cuatro dimensiones primordiales de la seguridad alimentaria definidas por FAO (2001): 1) *Disponibilidad* física de los alimentos, 2) *acceso* de los individuos para adquirir alimentos apropiados, 3) *utilización*, forma en que el cuerpo aprovecha los nutrientes de los alimentos, y 4) *estabilidad* en el tiempo de las tres dimensiones anteriores.

- La red de sensores y la interfaz web desarrolladas para visualizar el comportamiento de humedad del aire (relativa), humedad del suelo (%), presión atmosférica (hPa) y temperatura ambiental (°C) dentro del prototipo, pueden ser replicadas y utilizadas efectivamente.
- Resultados preliminares indican que el ciclo de producción de los cultivos estudiados en relación al tiempo se reduce a la mitad comparado con lo reportado en cultivos convencionales a campo abierto.
- Resultados preliminares mostraron diferencias significativas en los rendimientos del sistema de agricultura vertical bajo condiciones controladas comparado con el sistema convencional a campo abierto. Se asume que estas diferencias se presentaron porque dentro del prototipo la densidad de plantas es mayor, el ciclo de los cultivos fue reducido, y las condiciones de crecimiento como luz, temperatura y riego, son intensivas, controladas, y constantes. Siendo posible producir más en menos espacio.
- Los resultados del presente estudio permiten inferir que este sistema de agricultura vertical tecnificado para producción de cultivos agrícolas puede ser utilizado efectivamente para contribuir a minimizar la inseguridad alimentaria en las áreas más afectadas en Chiquimula. Debido a que asegura y mejora la productividad agrícola, lo que conllevará a minimizar la inseguridad alimentaria y mejorar el estado nutricional, el nivel de vida rural, y eventualmente un crecimiento de la economía nacional.

18. Impacto esperado

Con este proyecto se busca contribuir a la reducción de la inseguridad alimentaria que sufren los habitantes del municipio de Camotán. Esta reducción se pretende alcanzar por medio de una producción agrícola más eficiente en un sistema de agricultura vertical de bajo costo y alto rendimiento agrícola de cultivos que aporten valores nutricionales necesarios para reducir los índices de desnutrición.

Al involucrar a los estudiantes de Cunori se busca que esta institución se apropie de este sistema y pueda sentarse un precedente del trabajo multidisciplinario e interinstitucional en el tema de la inseguridad alimentaria. A mediano plazo se pretende que este

prototipo pueda ser implementado por los habitantes de Camotán con la colaboración de Cunori. Como una meta a largo plazo se plantea la implementación del proyecto en otros municipios que forman parte del corredor seco del país.

Derivado de las alianzas estratégicas formadas durante la ejecución del presente proyecto, como otras metas a largo plazo se plantea: 1) La implementación del proyecto en Costa Rica, en una figura denominada Trabajo Comunal Universitario (TCU). 2) Modificaciones del diseño del prototipo discutidas conjuntamente con la organización sin fines de lucro América Latina Líderes en Biotecnología (Allbiotech), ya que como herramienta que produce más en menos, es un instrumento y ejemplo idóneo de bioeconomía, que de acuerdo a Hodson de Jaramillo (2014) se fundamenta en la producción que se basa en procesos biológicos, utilizan materiales naturales, un mínimo de energía renovable, y no producen residuos, puesto que todos los materiales.

19. Recomendaciones

- El prototipo de agricultura vertical en la sede de Cunori está disponible para ser utilizado en: 1) programas de capacitación con campesinos de las áreas aledañas para que conozcan, aprendan y adopten esta herramienta alternativa efectiva de producción agrícola; 2) programas de experimentación multidisciplinaria con los estudiantes de este centro de estudios.
- Asistir a los campesinos líderes de las comunidades aledañas en el desarrollo de una visión de *producción comunitaria* con la adopción del prototipo en la que lo adapten o modificación, con el fin de: 1) asegurar su producción agrícola autosustentable, 2) reducir costos de inversión (ya que estarán compartidos en la comunidad), 3) asegurar alimento para cada uno de los miembros de la comunidad, 4) visualizar la venta de las cosechas con un valor agregado como empaque y/o conservas en los mercados locales, y 5) eventualmente en el mercado extranjero (exportar).
- Realizar investigaciones adicionales sobre diferentes especies de cultivos agrícolas para conocer su comportamiento y rendimiento en el prototipo de agricultura vertical.

- Realizar investigaciones adicionales para calibración de sensores e integración de inteligencia artificial para estandarizar el sistema de automatización del prototipo.
- Continuar los experimentos con el prototipo de agricultura vertical para desarrollar mejoras para producción, manejo y uso.
- Mantener las alianzas estratégicas con miras a buscar financiamiento internacional para extender el uso de este prototipo en diversos lugares de Guatemala y el extranjero.

20. Referencias

- Achaerandio, L. (2012). *Iniciación a la práctica de la investigación*. Guatemala: Magna Terra Editores.
- Association for Vertical Farming. (2016). *Vertical farming explained*. Germany: Association for Vertical Farming. Recuperado de <https://vertical-farming.net/info/>
- Azurdia, C. (2016). *Plantas mesoamericanas subutilizadas en la alimentación humana. El caso de Guatemala: Una revisión del pasado hacia una solución actual*. Guatemala: Consejo Nacional de Áreas Protegidas, Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación.
- Benke, K. & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26.
- Bright Agrotech. (2017). *The modern farmer's guide to artificial lighting*. Wyoming: Bright Agrotech.
- De Anda, J. & Shear, H. (2017). Potential of vertical hydroponic agriculture in Mexico. *Sustainability*, 9(140). doi.10.3390/su9019140.
- De la Cruz, R. (1976). *Clasificación de Zonas de Vida de Guatemala a nivel de reconocimiento*. Guatemala: Instituto Nacional Forestal.
- Despommier, D. (2009). The rise of vertical farms. *Scientific American*, 301(5):80-87.
- Eigenbrod, C., & Gruda, N. (2014). Urban vegetable for food security in cities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2), 483-498.

- Felipe, O. (2016, 2 de octubre). Sequía agrava el hambre en el Corredor Seco. Prensa Libre. Recuperado de <http://www.prensalibre.com/guatemala/baja-verapaz/sequia-agrava-el-hambre>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2000). Efectos de los fenómenos climatológicos adversos en la producción y el comercio de los alimentos. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/meeting/x4583s.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2001). Food insecurity: when people live with hunger and fear starvation. The State of Food Insecurity in the World. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/y1500e/y1500e00.htm>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2002). Control del medio ambiente. En Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.), El clima protegido en clima mediterráneo (pp. 104-142). Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2009). Programa Especial para la Seguridad Alimentaria (PESA) en Guatemala (1999-2008). Guatemala: FAO.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2011). La seguridad alimentaria: Información para la toma de decisiones. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2014). Informe Nacional Seguridad Alimentaria y Nutricional y Pueblos Indígenas. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development & World Food Program. (2015). The state of Food Insecurity in the World 2015. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). 2015-2016 El Niño Early action and response for agriculture, food security and nutrition Report Working Draft (August 2016) Update #10. Roma: Autor.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017a). El Niño. Recuperado de <http://www.fao.org/el-nino/es/>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017b). Sequía en el Corredor Seco Centroamericano. Recuperado de <http://www.fao.org/emergencias/crisis/corredor-seco/es/>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agriculture Development, United Nations Children's Fund, World Food Program, & World Health Organization. (2018). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2018. Building climate resilience for food security and nutrition*. FAO: Autor.
- Frazier, I. (2017, Enero 9). The vertical farm – Growing crops in the city, without soil or natural light. *The New Yorker*. Recuperado de <http://www.newyorker.com/magazine/2017/01/09/the-vertical-farm>
- Gruda, N. (2009). Do soilless culture systems have an influence on product quality of vegetables. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 82, 141-147.
- Gruda, N & Tanny, J. (2014). Protected crops. En: Dixon, Gr. Aldous, D. E. (Ed.) *Horticulture: Plants for people and places. Volume 1. Production Horticulture* (pp. 327-405). India:Springer Netherlands.
- Guerrero, M. (2011). *Control hidropónico* (Tesis de Maestría). Universidad de Sevilla. España.
- Hayden, A. L. (2006). Aeroponic and hydroponic systems for medicinal herb, rhizome, and root crops. *HortScience*, 41(3), 531-535.
- Hochmuth, R., & Hochmuth, G. J. (2001). A decade of change in Florida's greenhouse vegetable industry: 1991-2001 Pp.280-283 in *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*.
- Hodson de Jaramillo, E. (2014). *Hacia una bioeconomía en América Latina y el Caribe en asociación con Europa*. Editora Elizabeth Hodson de Jaramillo. 1 ed. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana.
- Kalantri, F., Tahir, O. M, Joni, R. A. & Fatemi, E. (2017). Opportunities and challenges in sustainability of vertical farming: A review. *Journal of Landscape Ecology*, doi.10.1515/jlecol-2017-0016.
- Kalantri, F., Tahir, O. M., Lahijani, A. M. & Kalantri, S. (2017). A review of vertical farming technology: A guide for implementation of building integrated agriculture in cities. *Advanced Engineering Forum*, 24, 76-91.
- Kato, K., Yoshida, R., Kikuzaki, A., Hirai, T., Kuroda, H., Hiwasa-Tanase,... Mizoguchi, T. (2010). Molecular breeding of tomato lines for mass production of

- miraculin in a plant factory. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(17), 9505-9510.
- Klingebiel, A. A. & Montgomery, P. H. (1968). Land capability classification. *Agricultural Handbook 210*. Washington: Usda.
- Lambin, E. F., Gibbs, H. K., Ferreira, L., Grau, R., Mayaux, P., Meyfroid, P.,... Munger, J. (2013). Estimating the world's potentially available cropland using a bottom-up approach. *Global Environmental Change*, 23(5), 892-901.
- Linsley-Noakes, G., Wilken, L., & de Villiers, S. (2006). High density, vertical hydroponics growing system for strawberries. *Acta Horticulturae*, 708, 365-370.
- Liu, W., Chen, D. K., & Liu, Z. X. (2005). High efficiency column culture system in China. *Acta Horticulturae*. doi: 10.17660/ActaHortic.2005.691.58
- Mahdavi, S., Kafi, M., Naderi, R., & Sadat, T. (2012). Vertical mobile planting system consistent with the pattern of solar radiation and effects of system on light exposure and growth of Gerbera cut flowers (*Gerbera jamesonii* cv. Antibes), in greenhouse culture. *Journal of Agricultural Technology*, 8(4), 1461-1468.
- Neocleous, D., Kaittanis, C., Seraphides, N., & Polycarpou, P. (2010). Horizontal and vertical soilless growing systems under Cyprus conditions. *Journal of Applied Horticulture*, 12(2), 140-144.
- Nieto, M. O. (2001). *Introducción del cultivo vertical de frutillas con alta tecnología y agua tratada, en el norte grande*. Chile: Corfo.
- Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R., & Gianquinto, G. (2013). Urban agriculture in the developing world: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), 695-720.
- Ortega, J. L. (2013). *Clasificación de zonas de vida de Guatemala basada en el Sistema Holdridge*. Cobán, Guatemala: Cunori.
- Parry, M. A., & Hawkesford, M. J. (2010). Food security: increasing yield and improving resource use efficiency. *Proceedings of the Nutrition Society*, 69(4), 592-600.
- Podmirseg, D. (2015). *Vertical farming and its system borders*. Graz, Austria: Autor.
- Prain, G. (2006). Integrated urban management of local agricultural development: the policy arena in Cuba. En Veenhuizen, R van (Ed.) *Cities farming for the future*.

- Urban agriculture for sustainable cities, Filipinas: RUAF Foundation, International Development Research Centre and International Institute of Rural Construction.
- Programa de Emergencia por Desastres Naturales, Unidad de Políticas e Investigación Estratégica, & Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2001). Caracterización de los Municipios de Camotán, Jocotán y Olopa y potencialidad para el desarrollo de cultivos. Guatemala: Maga.
- Resh, H. M. (2012). Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. Boca Raton: CRC Press.
- Sampieri, R., Collado, C. F. & Lucio, P. B. (2010). Metodología de la Investigación. México: McGraw Hill.
- Schmidhuber, J. & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States, 104(50), 19703-19708.
- Simmons, CH., TÁRANO, J. M. & PINTO, J. H. (1959). Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. Guatemala: Instituto Agropecuario Nacional.
- Sociedade Nacional de Agricultura. (2017, 18 de Agosto). Fazendas verticais: produção pode atingir o triplo da agricultura convencional. Sociedade Nacional de Agricultura. Recuperado de <http://sna.agr.br/fazendas-verticais-producao-pode-atingir-o-triplo-da-agricultura-tradicional-diz-pesquisador/>
- Song, X. P., Tan, H. T. W. & Tan, P. Y. (2018). Assessment of light adequacy for vertical farming in a tropical city. Urban Forestry & Urban Greening, 29(2018): 49-57.
- Touliatos, D., Dodd, I. C. & McAinsh, M. (2016). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. Food and Energy Security, 5(3), 184-191.
- Tubiello, F. N., Soussana, J. F. & Howden, S. M. (2007). Crop and pasture response to climate change. Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States, 104(50), 19686-19690.

- United Nations. (2017). World populations projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion in 2100. Recuperado de <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html>
- Valdez-Sandoval, C. & Guerra-Centeno, D. (2016). Experiencias en la investigación de acuaponía con chiles nativos de Guatemala y tilapias. Guatemala: Editorial Serviprensa.
- Valdez-Sandoval, C., Guerra-Centeno, D. & Díaz-Rodríguez, M. (2017). Experiencias en la investigación de acuaponía con variedades de frijol y tilapias. Guatemala: Editorial Serviprensa.
- Yeh, S. W., Kug, J. S., Dewitte, B., Kwon, M. H. Kirtman, B. P., & Jin, F. F. (2009). El Niño in a changing climate. *Nature*, 461(7463), 511-514.

21. Apéndice

Apéndice 1. Manual de uso de interfaz web.

▣

Evaluación de sistema de agricultura vertical
tecnificado para producción de cultivos agrícolas
que minimicen la inseguridad alimentaria
en Camotán, Chiquimula

Manual de Uso de Interfaz Web

Jeniffer Silva
Byron Paiz
Iván Morales
Andrea Meoño



Listado de los integrantes del equipo de investigación

| Contratados por contraparte | Colaboradores |
|------------------------------------|--|
| Jeniffer Adela Carolina Silva Yat | Siomara Bonilla, Arq. |
| Andrea Carolina Meoño Canel | Alejandra Rosales, Ing. Agr. |
| | Bitzel Cortez, MSc. |
| | Ivan Morales, Ing. Electrónico |
| | Byron Paiz, Practicante Ing. Electrónica |
| | Luis García, MSc. |
| | Mario Muralles, MSc. |
| | Mónica Aldana, Ing. Agr. |

| Contratados por la Dirección General de Investigación | | | | | |
|--|--------------------------|-----------------------------|-------------|-----------|--------------|
| Nombre | Categoría | Registro de personal | Pago | | Firma |
| | | | SI | NO | |
| Jeniffer Adela Carolina Silva Yat | Investigador (Titular I) | 20171468 | X | | |
| Andrea Carolina Meoño Canel | Auxiliar II | 20170051 | X | | |

Guatemala, 29 de Noviembre de 2018

Jeniffer Adela Carolina Silva Yat

Coordinadora del Proyecto de Investigación

firma

Liuba Cabrera Ovalle de Villagran

Coordinadora del Programa Universitario de Investigación

firma

Julio Rufino Salazar

Coordinador General de Programas

firma