



Capítulo 6.

Diseño de un sistema hidropónico de precisión automatizado orientado a la seguridad alimentaria de las familias

Alberto Roldán Niño

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Centro de Atención al Sector Agropecuario, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4714-8957>

Binsen Esteban Ríos Restrepo

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Tecnoacademia, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4866-0169>

César Osorio Betancurt

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Centro de Comercio y Servicios, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0965-2033>

Eroel Arcángel Correa Marín

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Tecnoacademia, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7104-1622>

Manuel Pinzón Candelario

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Centro de Comercio y Servicios, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9594-0905>

Samuel López Gómez

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Centro de Comercio y Servicios, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0442-5320>

Sebastián Hoyos

Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
Tecnoacademia, Regional Risaralda
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4875-2991>

Fanny Pinzón Candelario

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2082-2971>

Resumen

El presente proyecto se centra en el diseño e implementación de un sistema hidropónico automatizado para la producción de hortalizas en entornos urbanos. Su propósito es mejorar la seguridad alimentaria y generar ingresos adicionales para las familias. Se realizaron simulaciones en SolidWorks que muestran deformaciones unitarias en la estructura, indicando cambios físicos en sus dimensiones. Estas deformaciones pueden ser elásticas o plásticas, dependiendo de la carga aplicada. Se espera que el sistema diseñado tenga una capacidad de producción estimada de 132 kg de hortalizas al mes. Esta cantidad es suficiente para cubrir las necesidades de una familia de 3 personas y generar excedentes para la venta, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al ingreso familiar.

La implementación de tecnologías IoT y automatización promete un uso más eficiente del agua y los nutrientes, lo cual se alinea con los objetivos de sostenibilidad del proyecto. Además, este representa un avance significativo en la aplicación de agricultura de precisión en entornos urbanos, ofreciendo un modelo potencialmente replicable en otros contextos. Por otro lado, se recomienda reforzar las áreas de alta tensión en la estructura, considerando posiblemente materiales alternativos o diseños modificados. Al finalizar, el módulo hidropónico contará con 4 pisos, una altura de 2,8 metros, un largo de 2,2 metros y un ancho de 1 metro.

Palabras clave: hidroponía, agricultura de precisión, seguridad alimentaria, internet de las cosas (IoT), inclusión social

Abstract

This project focuses on the design and implementation of an automated hydroponic system for vegetable production in urban environments. The aim is to improve food security and generate additional income for families. Simulations were carried out in SolidWorks showing unit deformations in the structure, indicating physical changes in its dimensions. These deformations can be either elastic or plastic, depending on the applied load. The designed system is expected to have an estimated production capacity of 132 kg of vegetables per month. This quantity is sufficient to cover the needs of a family of 3 people and generate a surplus for sale, thereby contributing to food security and family income.

The implementation of IoT technologies and automation promises more efficient use of water and nutrients, which aligns with the project's sustainability objectives. Furthermore, this represents a significant advance in the application of precision agriculture in urban environments, offering a potentially replicable model in other contexts. On the other hand, it is recommended to reinforce high stress areas in the structure, possibly considering alternative materials or modified designs. Upon completion, the hydroponic module will have 4 floors, a height of 2.8 metres, a length of 2.2 metres and a width of 1 metre.

Keywords: hydroponics, precision agriculture, food security, Internet of Things (IoT), social inclusion

Introducción

En pleno siglo XXI, la agricultura se encuentra en una encrucijada, enfrentando desafíos como el cambio climático y la urbanización acelerada. Estos factores amenazan la seguridad alimentaria y exigen soluciones tanto innovadoras como sostenibles. Según información relacionada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), cerca de 690 millones de personas en el mundo padecen hambre (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2020).

En Colombia, la Encuesta Nacional de Situación Nutricional (ENSIN) indica que la mayoría de los hogares sufre de desnutrición y algunos de obesidad, con una prevalencia significativa de inseguridad alimentaria moderada o grave (Instituto Colombiano de Bienestar Familiar [ICBF] et al., 2015). Al respecto, el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 hace énfasis en la producción para la vida como eje fundamental para asegurar la nutrición de la población, así como en el impulso a la economía popular de las familias vulnerables (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2023).

En este contexto, la hidroponía surge como una respuesta prometedora a estos desafíos, con un método de cultivo eficiente que reduce significativamente la necesidad de tierra y agua en comparación con la agricultura tradicional. Su adaptabilidad a entornos controlados la hace ideal para zonas urbanas y regiones con suelos menos fértiles.

En particular, este proyecto busca diseñar un prototipo de un sistema hidropónico que automatice el uso de agua y luz en un cultivo. Para esto, se adoptará un enfoque metodológico que incluye el diseño ingenieril del sistema hidropónico y pruebas experimentales. Posteriormente, se plantea como otra fase del proyecto evaluar la viabilidad económica de la implementación de sistemas hidropónicos en zonas urbanas.

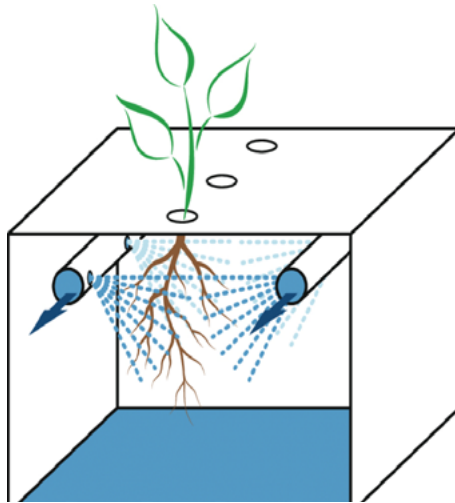
Diseño del sistema hidropónico

Un cultivo hidropónico es un modelo de cultivo sin suelo, donde se producen plantas herbáceas, aprovechando sitios o áreas no convencionales, sin perder de vista las necesidades de las plantas, como luz, temperatura, agua y nutrientes. Los nutrientes son aportados por una solución acuosa para que las plantas puedan desarrollarse. La tecnología permitió la introducción de los avances de la informática para el control y ejecución de actividades, lo cual ha permitido que la automatización del cultivo hidropónico sea una realidad.

¿Qué sistema es el más adecuado?

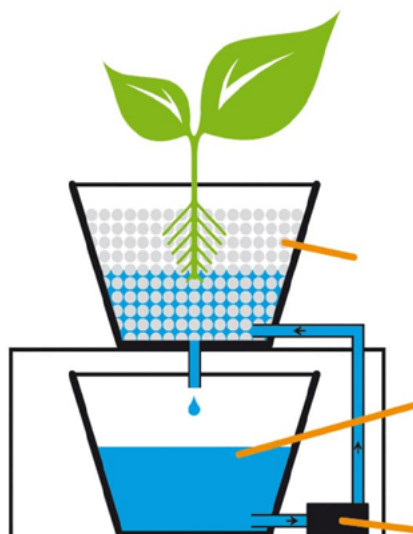
Existen diferentes sistemas de cultivos sin utilizar suelo. Estos se pueden clasificar según el medio en el que crecen las raíces de las plantas. Entre los más comunes, se encuentran la aeroponía y la hidroponía: cultivos en aire (figura 1) y cultivos en agua (figura 2, figura 3 y figura 4), respectivamente.

Figura 1. Cultivos en aire



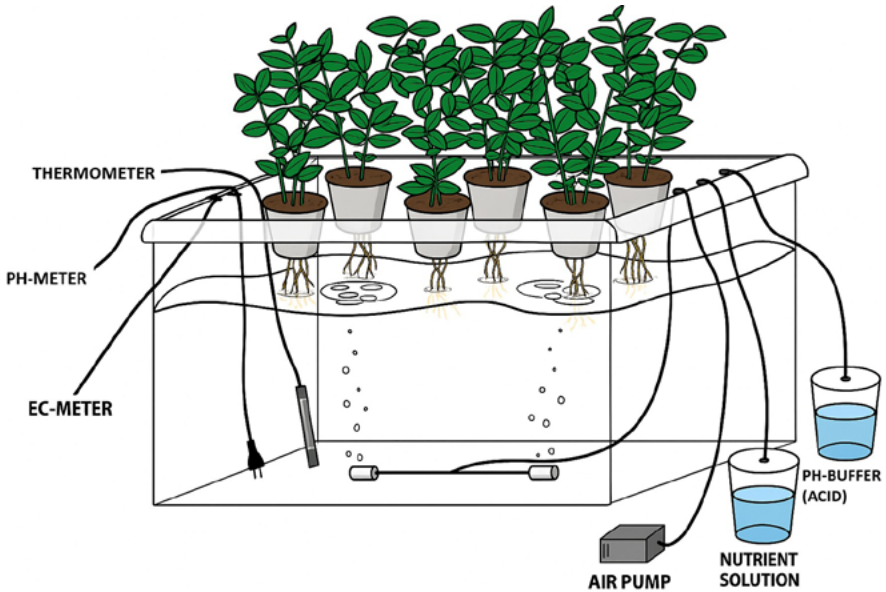
Fuente: Rajendran et al. (2024).

Figura 2. Cultivos en sustratos



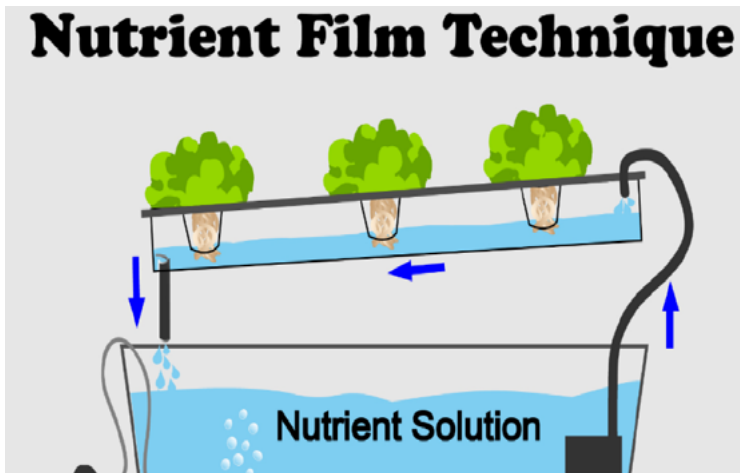
Fuente: Mecha et al. (2024).

Figura 3. Balsa flotante



Fuente: Ortner y Ågren (2019).

Figura 4. Cultivos en agua con Nutrient Film Technique (NFT)



Fuente: Rajendran et al. (2024).

Para este proyecto, se utilizará el sistema de balsa flotante debido a “las ventajas en densidad de producción, facilidad de técnica y control” (Mishra y Jain, 2015, p. 6936). Antes de continuar, es importante definir qué es la horticultura y qué es una hortaliza. Según la Real Academia Española (RAE, s. f.), la horticultura es un conjunto de técnicas y conocimientos relativos al cultivo de los huertos y de las huertas; una hortaliza es una

planta comestible que se cultiva en las huertas. Las hortalizas poseen diferentes vitaminas y minerales, y se pueden clasificar en distintos tipos de acuerdo a su parte comestible.

Automatización

En la actualidad, la automatización de los cultivos hidropónicos es importante para maximizar su producción. La automatización consiste en el diseño e implementación de sistemas, como sensores, actuadores y elementos con capacidad de proceso, para lograr el funcionamiento desatendido o semidesatendido de un proceso industrial de producción. De igual manera, es importante medir y controlar los procesos para la toma de decisiones y la interactividad con el usuario. En esta última, se aplica el internet de las cosas (IoT), que es una herramienta de gran utilidad.

Para este proyecto, se propone automatizar la medición de la temperatura, la humedad, la luz complementaria de crecimiento, las válvulas solenoides, los sensores de nivel de agua y una bomba sumergible. Estos componentes permiten controlar y monitorear condiciones ambientales óptimas para el cultivo de plantas sin suelo, maximizando su eficiencia y facilitando la gestión agrícola.

Descripción del hardware

1. Bomba de agua sumergible JQP-3500 (3500 l/h):
 - Capacidad: 3500 litros por hora
 - Altura máxima de elevación: 3,6 metros
2. Sensores de temperatura y humedad SHT20:
 - Funcionan a 3,3 V o 5 V y se comunican mediante I2C.
3. Medidores de luz ambiente:
 - Miden la intensidad lumínica en luxes.
 - Son impermeables y se integran al sistema a través de I2C.
4. Válvulas solenoides:
 - Operan a 12 V y 1 A, y se utilizan para controlar el flujo de agua en el sistema.

5. Sensores de nivel de agua:

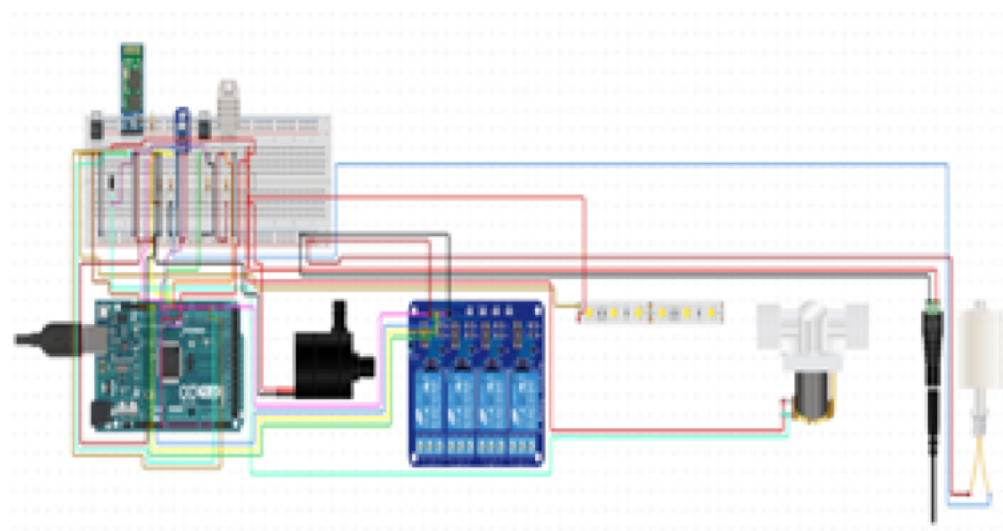
- Detectan el nivel de agua en los cajones con las bandejas.
- Tienen una capacidad máxima de conmutación de 10 W.
- Pueden manejar hasta 100 V DC y 0,5 A.

6. Complementos y accesorios:

- Relés o módulos de relé para controlar las válvulas solenoides.
- Fuente de alimentación de 12 V para la bomba y las válvulas.
- Cables y conectores para las conexiones eléctricas.
- *Protoboard*

En la figura 5 se ilustra la configuración para un solo piso del módulo, el cual está diseñado para alcanzar 4 niveles en total. Cada uno de estos estará equipado con sistemas de control y monitoreo, garantizando la integración eficiente de todos los componentes y la operación armoniosa del sistema completo. Este esquema sirve como base para la expansión del sistema, proporcionando una visión clara de cómo contribuye cada piso al funcionamiento integral del módulo, permitiendo una implementación escalable y adaptable a diversas necesidades del cultivo.

Figura 5. Esquema del sistema electrónico



Fuente: elaboración propia.

Los elementos que se observan en el anterior esquema son esenciales para asegurar tanto la estabilidad como la escalabilidad del sistema, el cual está diseñado para expandirse a un módulo de 4 pisos.

Lógica de programación

Inicialización

- Configura los sensores y los actuadores (temperatura, humedad, luz, nivel de agua, bomba y válvulas solenoides).
- Establece los valores de referencia para las condiciones óptimas (por ejemplo, pH y CE ideales para el cultivo).

Bucle principal

- Lee los valores de los sensores (pH, CE, luz y nivel de agua).
- Compara los valores con los umbrales predefinidos para alguna acción.
- Controla la bomba y las válvulas solenoides:
 - Si el nivel del sustrato es bajo:
 - Activa la bomba para inyectar nutrientes o agua al sistema.
- Abre las válvulas solenoides para permitir el flujo de nutrientes al sustrato.
- Si el nivel del sustrato es adecuado o alto:
- Desactiva la bomba y cierra las válvulas solenoides.

Monitoreo y ajuste

- Si la luz es insuficiente, activa una fuente de luz artificial.

Ciclo diario

- Ejecuta el ciclo de activación de la bomba y las válvulas solenoides una vez al día (se puede establecer un tiempo específico).
- Hay que asegurarse de que el sistema funcione correctamente y que los valores estén dentro de los rangos deseados.

Producción

Criterios de preselección

La selección adecuada de plantas para el cultivo hidropónico depende de una serie de criterios fundamentales que aseguran la eficiencia y la sostenibilidad del sistema. Los criterios descritos a continuación proporcionan un marco detallado para evaluar y determinar qué especies vegetales son las más apropiadas.

Alimentación

- Elegir cultivos que satisfagan las necesidades alimenticias. Al seleccionar plantas que produzcan alimentos, estamos contribuyendo a la seguridad alimentaria y al bienestar de las personas.
- Cultivar alimentos frescos en casa o en sistemas hidropónicos urbanos puede reducir la dependencia de la agricultura tradicional y minimizar la huella de transporte.

Tiempo de cosecha

- El tiempo de cosecha afecta la rotación de cultivos y la disponibilidad continua de alimentos.
- Optar por cultivos de crecimiento rápido permite cosechar con mayor frecuencia, lo que aumenta la producción y la sostenibilidad del sistema.

Espacio ocupado

- La eficiencia espacial es esencial, especialmente en sistemas hidropónicos en interiores o con espacio limitado.
- Al elegir cultivos compactos, maximizamos la producción en un área reducida, lo que es crucial para la agricultura urbana y doméstica.

Separación

- La distancia entre plantas afecta el acceso a la luz, los nutrientes y el aire.
- Una separación adecuada previene la competencia entre plantas y promueve un crecimiento saludable. Por ejemplo, la lechuga necesita menos espacio que los tomates.

Consideraciones

- Los factores ambientales y de manejo influyen en el éxito del cultivo.
- Elegir entre luz natural o artificial (luz LED) influye en la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas.
- La temperatura y la humedad afectan la salud de las plantas y la eficiencia del sistema.
- En cuanto a la calidad del agua, garantizar agua limpia y bien oxigenada es esencial.
- Para el manejo de nutrientes y plagas, se debe contar con nutrientes específicos y estrategias de control de plagas.

Al finalizar el análisis de las posibles hortalizas a utilizar, se hizo un recuento de la cantidad de criterios que cumplían y se ponderaron de 1 a 5 las que mejor cumplían con los requerimientos a nivel cualitativo. En la tabla 1 se presenta la lista de plantas evaluadas. Las plantas más viables para este proceso son: la acelga, el cebollino, la espinaca, la lechuga romana y la rúcula.

Tabla 1. Criterios de selección de cultivos

Cultivo y especie	N.º de criterios cumplidos	Ponderado
Acelga	4	5
Albahaca	4	3
Apio	4	3
Arúgula	4	4
Bok choy	4	3
Cebollino	4	5
Cilantro	4	4
Eneldo	4	3
Escarola	4	4
Espinaca	4	5
Fresa	3	2
Lechuga romana	4	5
Menta	4	3
Pepino	2	1
Perejil	4	4
Pimiento	2	2

Cultivo y especie	N.º de criterios cumplidos	Ponderado
Rúcula	4	5
Salvia	4	2
Tomate cherry	2	3
Tomillo	4	3

Fuente: elaboración propia a partir de López y Osorio (2024).

Condiciones de cultivo

Para lograr un crecimiento óptimo de los siguientes cultivos: lechuga Lollo Rossa, lechuga Parris Island Romana verde, espinaca Corona Superior F1 oriental y acelga Charlotte Vena Roja, es crucial mantener ciertas condiciones ambientales. Estos cultivos prefieren altitudes bajas a medias, típicamente entre 0 y 1500 msnm, donde las temperaturas son moderadas. La iluminación debe ser abundante, con un rango de 12 000 a 15 000 lúmenes por metro cuadrado al día, lo que asegura un desarrollo vigoroso de las hojas. Las temperaturas ideales oscilan entre 15 °C y 22 °C, y se deben evitar extremos que puedan estresar a las plantas. La humedad debe mantenerse en niveles entre 50 % y 70 % para evitar problemas de enfermedades y promover un crecimiento saludable. Finalmente, el pH del agua debe estar entre 6,0 y 7,0, ya que un equilibrio adecuado en la acidez es crucial para la absorción eficiente de nutrientes y la salud general de las plantas.

Cabe aclarar que cada una de las hortalizas mencionadas tiene necesidades nutricionales específicas para su óptimo desarrollo, como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de cultivos

Etapa			
	Germinación	Vegetativa	Madurez/Cosecha
Hortaliza: lechuga Lollo Rossa			
Nitrógeno (N)	50-70 ppm	100-150 ppm	80-120 ppm
Fósforo (P)	20-30 ppm	40-60 ppm	30-40 ppm
Potasio (K)	60-80 ppm	150-200 ppm	120-150 ppm
Calcio (Ca)	20-30 ppm	100-150 ppm	150-200 ppm
Magnesio (Mg)	10-15 ppm	40-60 ppm	30-50 ppm
Azufre (S)	10-15 ppm	20-30 ppm	20-30 ppm

Etapa			
	Germinación	Vegetativa	Madurez/Cosecha
Hortaliza: lechuga Parris Island Romana verde			
Nitrógeno (N)	60-80 ppm	120-160 ppm	90-130 ppm
Fósforo (P)	20-25 ppm	40-50 ppm	30-40 ppm
Potasio (K)	70-90 ppm	70-90 ppm	70-90 ppm
Calcio (Ca)	25-35 ppm	120-150 ppm	150-200 ppm
Magnesio (Mg)	15-20 ppm	40-50 ppm	30-50 ppm
Azufre (S)	15-20 ppm	20-30 ppm	20-30 ppm
Hortaliza: espinaca Corona Superior F1 oriental			
Nitrógeno (N)	50-70 ppm	100-120 ppm	70-90 ppm
Fósforo (P)	20-30 ppm	40-60 ppm	30-40 ppm
Potasio (K)	60-80 ppm	150-200 ppm	120-150 ppm
Calcio (Ca)	20-30 ppm	100-150 ppm	150-200 ppm
Magnesio (Mg)	10-15 ppm	30-50 ppm	30-50 ppm
Azufre (S)	10-15 ppm	10-15 ppm	10-15 ppm
Hortaliza: acelga Charlotte Vena Roja			
Nitrógeno (N)	60-80 ppm	100-130 ppm	80-100 ppm
Fósforo (P)	20-30 ppm	40-50 ppm	30-40 ppm
Potasio (K)	70-90 ppm	150-200 ppm	120-150 ppm
Calcio (Ca)	25-35 ppm	120-150 ppm	150-200 ppm
Magnesio (Mg)	15-20 ppm	40-50 ppm	30-50 ppm
Azufre (S)	15-20 ppm	20-30 ppm	20-30 ppm

Fuente: elaboración propia.

En un sistema hidropónico, es fundamental mantener una solución nutritiva uniforme para garantizar un crecimiento saludable de las plantas, ya que no es posible ofrecer diferentes concentraciones de nutrientes a cada tipo de cultivo en el mismo sistema. Por tanto, se estandariza la mezcla de nutrientes para satisfacer las necesidades generales de las hortalizas cultivadas. Para esto, se utiliza una solución nutritiva equilibrada

con las concentraciones estandarizadas de nutrientes y micronutrientes esenciales, las cuales se presentan en la tabla 3. Esta estandarización asegura que los nutrientes estén disponibles en cantidades adecuadas para las diferentes hortalizas, promoviendo un crecimiento uniforme y saludable en el sistema hidropónico.

Tabla 3. Composición de la solución equilibrada

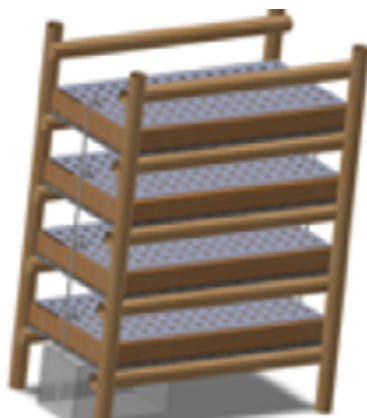
Nutriente	Cantidad	Unidad
Nutrientes mayores		
Nitrógeno (N)	120	ppm
Fósforo (P)	50	ppm
Potasio (K)	180	ppm
Calcio (Ca)	120	ppm
Magnesio (Mg)	50	ppm
Azufre (S)	30	ppm
Micronutrientes		
Hierro (Fe)	3	ppm
Manganeso (Mn)	2	ppm
Zinc (Zn)	1	Ppm
Cobre (Cu)	0,2	Ppm
Molibdeno (Mo)	0,1	Ppm
Boro (B)	1	Ppm

Fuente: elaboración propia.

Estructura de la unidad hidropónica

El módulo hidropónico cuenta con 4 pisos, una altura de 2,8 metros, un largo de 2,2 metros y un ancho de 1 metro. En la figura 6 se muestra el diseño de la estructura, modelado en el *software* SolidWorks.

Figura 6. Sistema hidropónico en SolidWorks



Fuente: elaboración propia.

Las medidas que se definieron se basaron en estimaciones para garantizar la seguridad alimentaria en una familia de 3 personas, con un consumo de hortalizas de 4,16 kg/mes. Para ello, se revisaron los siguientes criterios de preselección de las hortalizas. Con base en la búsqueda de especies, se tomó el tiempo de cultivo y cosecha de las variedades seleccionadas (lechuga Lollo Rossa, lechuga Parris Island Romana verde, espinaca Corona Superior F1 oriental y acelga Charlotte Vena Roja), el cual fue de 30 a 60 días. El módulo hidropónico cuenta con una capacidad de producción mensual de 132 kg de hortalizas, dividida en 12,48 kg para la familia y 119,52 kg para la venta, garantizando el consumo propio de la familia y un ingreso económico adicional.

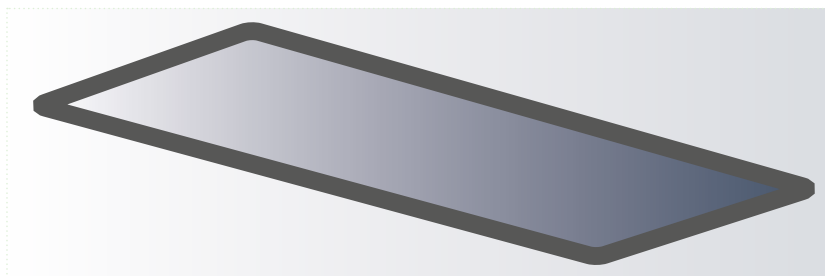
El área total de cultivo es de $1\text{ m} \times 2,2\text{ m} = 2,2\text{ m}^2$. Esta permite el adecuado desarrollo individual de las hortalizas, las cuales requieren un espacio de $12\text{ cm} \times 12\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ para su óptimo crecimiento. En el módulo, hay 112 hortalizas por bandeja y 4 bandejas, de modo que se tienen 448 hortalizas en total, lo cual maximiza la producción en un espacio compacto. Estas dimensiones proporcionan suficiente espacio para acomodar las bandejas de cultivo y permiten un fácil acceso para el mantenimiento y la cosecha.

Simulación y análisis estático en SolidWorks

Para garantizar la estabilidad y la durabilidad del sistema hidropónico automatizado, se realizaron una simulación y un análisis estático utilizando el software SolidWorks. Este análisis fue crucial para determinar la viabilidad estructural del sistema, especialmente al considerar el uso de vigas de guadua como material de soporte. El objetivo principal fue evaluar las tensiones, los desplazamientos y las deformaciones unitarias presentes en la estructura, bajo condiciones de carga específicas.

El modelo simulado consiste en una estructura compuesta por 4 ángulos de acero galvanizado: dos ángulos de 1/8 pulg x 1-1/2 pulg x 1 m y dos ángulos de 1/8 pulg x 1-1/2 pulg x 2 m (figura 7). La estructura está diseñada para soportar cargas estáticas ocasionadas por un cajón de madera de dimensiones 1 m x 2 m x 0,15 m, una lámina de policarbonato y el agua necesaria para llenar el cajón.

Figura 7. Estructura de ángulos

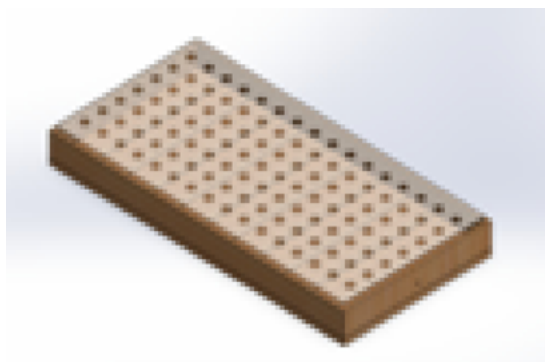


Fuente: elaboración propia.

Condiciones de carga

Se simularon cargas distribuidas sobre la estructura, que fueran representativas de las condiciones reales de funcionamiento. Para esto, se calculó el peso total que soportará la estructura, correspondiente al peso del cajón de madera, una lámina de policarbonato y el agua que llenará el cajón, como se muestra en la figura 8.

Figura 8. Bandejas de cultivo en SolidWorks

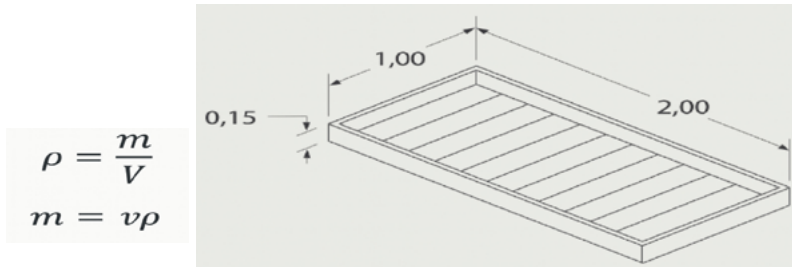


Fuente: elaboración propia.

Cálculo del peso de las bandejas

En la figura 9 se muestran las dimensiones de cada bandeja.

Figura 9. Dimensiones de la bandeja de cultivo



Fuente: elaboración propia.

Densidad del agua: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ aproximadamente

$$V_{\text{agua}} = 0,15 * 2 * 1 = 0,3 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{agua}} = 0,3 \text{ m}^3 * 1000 \text{ kg/m}^3 = 300 \text{ kg}$$

La masa del cajón junto con la lámina se calculó en SolidWorks. El material que se usó para el cajón fue cedro y para la lámina, policarbonato.

$$m_{\text{cajón y lámina}} = 36,45 \text{ kg}$$

lámina

$$m_{\text{total}} = 300 + 36,45 = 336,45 \text{ kg}$$

$$F = m * g$$

$$F = 336,45 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2 = 3300,6 \text{ N}$$

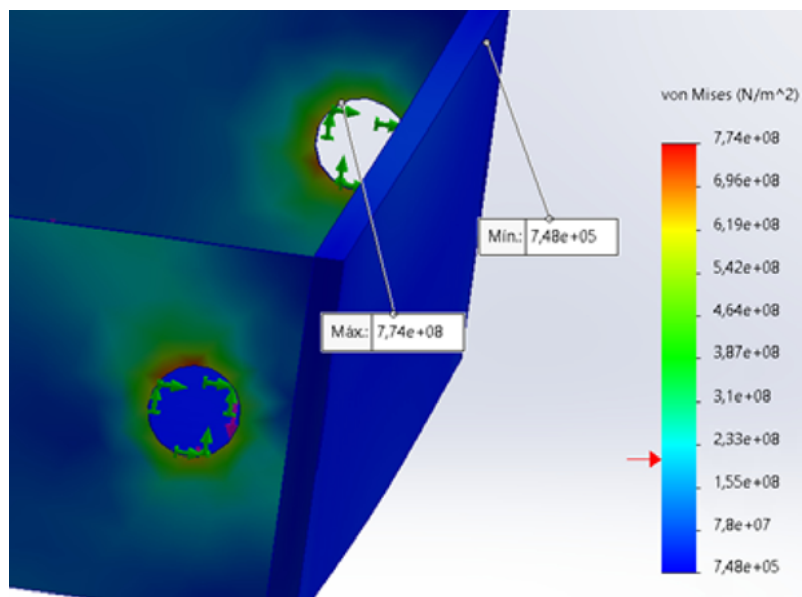
Por último, se aplicaron las restricciones adecuadas en los puntos de apoyo de la estructura para simular el comportamiento del sistema de sujeción.

Resultados de la simulación

Tensiones principales

Las tensiones máximas encontradas en la estructura se localizan principalmente en las zonas cercanas a los puntos de apoyo, sobrepasando el límite elástico del material (figura 10). Esos valores muestran que esas áreas específicas están experimentando tensiones que podrían llevar al material a deformarse permanentemente o incluso a fracturarse si estas siguen aumentando. Esto indica un punto crítico que requiere atención, a fin de evitar problemas futuros de deformación permanente o un fallo estructural en la realidad física del sistema diseñado.

Figura 10. Áreas de tensión en ángulos en SolidWorks

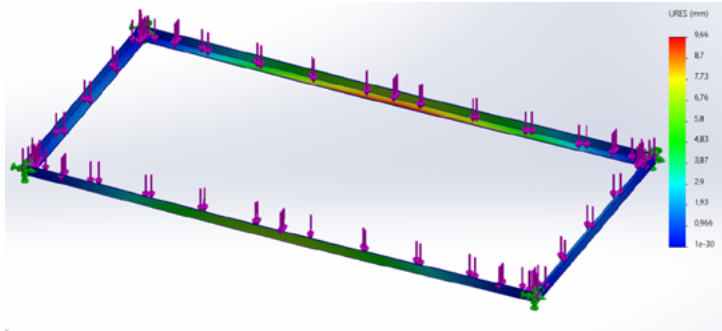


Fuente: elaboración propia.

Desplazamientos

Los desplazamientos máximos registrados se concentran en la mitad de los ángulos más largos, donde se encuentra distribuida la carga, es decir, las zonas de menor rigidez estructural. El medio de los ángulos largos en la estructura se muestra en color rojo, amarillo y verde (figura 11). Lo anterior sugiere que una zona específica está experimentando desplazamientos significativos y moderados, respectivamente.

Figura 11. Zonas de desplazamientos por peso en SolidWorks

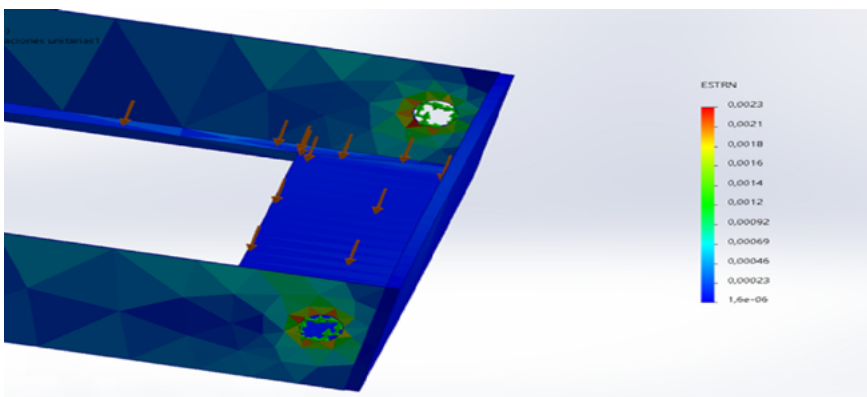


Fuente: elaboración propia.

Deformaciones unitarias

Las deformaciones unitarias, que indican la magnitud de la deformación relativa en diferentes partes de la estructura, muestran valores proporcionales a las cargas aplicadas y son consistentes con las expectativas de diseño. Las deformaciones unitarias en la estructura durante la simulación indican que la estructura está experimentando cambios físicos en sus dimensiones (figura 12). Estas deformaciones pueden ser elásticas (temporales, donde el material puede recuperar su forma original después de retirar la carga) o plásticas (permanentes, donde el material queda deformado incluso después de retirar la carga).

Figura 12. Deformaciones unitarias en SolidWorks



Fuente: elaboración propia.

Resultados esperados

Se espera que el módulo hidropónico, con sus dimensiones y diseño optimizados, produzca resultados significativos tanto en términos de producción de alimentos como de beneficios económicos. Por otra parte, dado que el módulo cuenta con 4 pisos y se espera producir 112 hortalizas por piso, se tendrían en total 448 hortalizas por ciclo de cosecha.

En función de la tabla 1 de criterios de selección de cultivos, se decidió implementar 4 hortalizas: lechuga Lollo Rossa, lechuga Parris Island Romana verde, espinaca Corona Superior F1 oriental y acelga Charlotte Vena Roja. Lo anterior se debe a que estas cumplieron adecuadamente con los prerequisites, como un tiempo de cosecha de 30 a 60 días y un espacio ocupado en el módulo menor a 30 cm x 30 cm.

A continuación, se abordan con mayor detalle los resultados esperados de este proyecto. En primer lugar, se estima que el módulo hidropónico proporcionará una producción mensual de 132 kg de hortalizas. De esta cantidad, 12,48 kg estarán destinados al consumo de una familia de 3 personas, garantizando así su seguridad alimentaria con un suministro constante de hortalizas frescas y nutritivas. Este aspecto es crucial, ya que garantiza que la familia tenga acceso a alimentos saludables, mejorando su calidad de vida y bienestar general.

En segundo lugar, se espera que el excedente de producción, que asciende a 119,52 kg mensuales, se destine a la venta. Este excedente no solo generará un ingreso económico adicional para la familia, sino que también contribuirá a la economía local al ofrecer productos frescos y de alta calidad a la comunidad. La venta de estas hortalizas puede establecer una fuente de ingresos sostenible y constante, lo que puede ser particularmente beneficioso en áreas urbanas con espacio limitado para la agricultura tradicional.

Conclusiones

La implementación de tecnologías IoT y automatización promete un uso más eficiente del agua y los nutrientes, lo cual se alinea con los objetivos de sostenibilidad del proyecto.

El proyecto representa un avance significativo en la aplicación de agricultura de precisión en entornos urbanos, ofreciendo un modelo potencialmente replicable en otros contextos. Ahora bien, se identificaron puntos de tensión críticos que requieren atención en la implementación física.

El sistema diseñado tiene una capacidad de producción estimada de 132 kg de hortalizas mensuales. Esta producción es suficiente para cubrir las necesidades de una familia

de 3 personas y generar excedentes para la venta, contribuyendo así a la seguridad alimentaria y al ingreso familiar.

Recomendaciones

Con base en los resultados de la simulación, se recomienda reforzar las áreas de alta tensión en la estructura, considerando posiblemente materiales alternativos o diseños modificados para mejorar tanto la estabilidad como la durabilidad. Asimismo, se recomienda implementar el sistema a escala reducida antes de la implementación completa, a fin de validar los cálculos teóricos y realizar los ajustes necesarios en condiciones reales.

Para asegurar la viabilidad y el éxito del proyecto a largo plazo, se recomienda realizar un estudio económico y comercial en futuras fases del proyecto. Este estudio debe incluir un análisis detallado de los costos de implementación, operación y mantenimiento, así como una evaluación de las oportunidades de mercado y la rentabilidad potencial. La información obtenida permitirá tomar decisiones informadas y optimizar los recursos, garantizando así la sostenibilidad y el crecimiento del proyecto.

Referencias

- Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Colombia, potencia mundial de la vida*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>
- Instituto Colombiano de Bienestar Familiar, Ministerio de Salud y Protección Social, Instituto Nacional de Salud y Profamilia. (2015). *Encuesta Nacional de la Situación Nutricional en Colombia – ENSIN 2015*.
- López, S. y Osorio, C. (2024). *Criterios de selección de cultivo*.
- Mishra, R. I., & Jain, P. (2015). Design and Implementation of Automatic Hydroponics System using ARM Processor. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 4(8), 6935- 6940. <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2015.0408016>
- Organización de las Naciones Unidas. (2020). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Spanish.pdf

- Ortner, J., & Ågren, E. (2019). *Automated hydroponic system* [Bachelor's Thesis, KTH Royal Institute of Technology]. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1373530/FULLTEXT01.pdf>
- Rajendran, S., Domalachenpa, T., Arora, H., Li, P., Sharma, A., & Rajauria, G. (2024). Hydroponics: Exploring innovative sustainable technologies and applications across crop production, with emphasis on potato mini-tuber cultivation. *Heliyon*, 10(5), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26823>
- Real Academia Española. (s. f.). *Diccionario de la lengua española*. <https://dle.rae.es/>