

**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL  
DE LAS AMÉRICAS**



**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**“EVALUACIÓN TÉCNICA Y DE SOSTENIBILIDAD DE LA INTRODUCCIÓN DE  
GRANJAS URBANAS HIDROPÓNICAS EN EL GAM”.**

**Autor**

**Esteban Vargas Arguedas**

**Tutor**

**Ing. Alejandro Cervantes U**

**Palmares, Costa Rica**

**2024**

## CONTENIDO GENERAL

<b>CONTENIDO GENERAL</b> .....	2
<b>Contenido de tablas</b> .....	6
<b>Contenido de ecuaciones</b> .....	6
<b>Contenido de figuras</b> .....	7
<b>Contenido de gráficos</b> .....	8
<b>Lista de anexos</b> .....	8
<i>Dedicatoria</i> .....	10
<i>Agradecimientos</i> .....	11
<b>Resumen ejecutivo</b> .....	12
<b>Términos importantes</b> .....	13
<b>Notación (Símbolos)</b> .....	15
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>Planteamiento del problema</b> .....	16
<b>Objetivo general</b> .....	16
<b>Objetivos específicos</b> .....	16
<b>Justificación</b> .....	17
<b>Antecedentes</b> .....	19
<b>Tesis extranjeras</b> .....	19
<b>Tesis nacionales</b> .....	25
<b>Limitaciones</b> .....	32
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	33
<b>Agricultura tradicional</b> .....	33
<b>Técnicas de agricultura tradicional</b> .....	34
<b>Agricultura intensiva</b> .....	35
<b>Agricultura industrial</b> .....	37
<b>Problemas ambientales de la agricultura intensiva e industrial</b> .....	38
<b>Agricultura urbana</b> .....	39
<b>Sistemas de producción vertical</b> .....	41
<b>Componentes básicos en la agricultura vertical</b> .....	43

<b>Tipos de agricultura vertical y tipos de cultivos</b> .....	44
<b>Hidroponía o riego hidropónico</b> .....	45
<b>Sustrato</b> .....	47
<b>Cultivos en agua</b> .....	47
<b>Cultivo en grava</b> .....	48
<b>Cultivo en agregado</b> .....	49
<b>Soluciones nutritivas</b> .....	50
<b>Tipos de sistemas hidropónicos</b> .....	52
<b>La técnica de película nutritiva (NFT)</b> .....	53
<b>Cultivo en aguas profundas</b> .....	54
<b>Reflujo y flujo (Ebb &amp; Flow)</b> .....	54
<b>Sistema de mecha</b> .....	55
<b>Sistema de goteo</b> .....	56
<b>Aeroponía</b> .....	56
<b>Sistemas de fábricas de plantas PFAL</b> .....	57
<b>Agricultura en ambientes controlados CEA</b> .....	60
<b>Variables de interés agroclimático</b> .....	61
<b>Ecofisiología de los cultivos</b> .....	62
<b>Evaluación agronómica</b> .....	63
<b>Variables fisiológicas</b> .....	64
<b>Consumo de agua de un cultivo</b> .....	64
<b>La evapotranspiración del cultivo (ETc)</b> .....	64
<b>Espectro electromagnético de la radiación solar</b> .....	65
<b>Influencia del espectro electromagnético de la radiación solar en la fotosíntesis</b> .....	67
<b>Cantidad de luz que incide en una superficie</b> .....	69
<b>Eficiencia luminosa</b> .....	71
<b>Uso de luminarias LED en cultivos</b> .....	72
<b>Calidad de luz</b> .....	74
<b>Control de la temperatura</b> .....	75
<b>Ventilación</b> .....	76
<b>Climatización por control de humedad</b> .....	77

<b>Cálculo de carga térmica</b> .....	77
<b>Método CLTD/CLF para cálculo de carga térmica</b> .....	79
<b>Cálculo de cargas externas</b> .....	79
<b>Cargas conductivas</b> .....	79
<b>Carga solar por radiación a través de ventanas</b> .....	80
<b>Carga a través de particiones, áticos y el piso</b> .....	81
<b>Carga térmica interna para enfriamiento</b> .....	81
<b>Ventilación e infiltración de aire</b> .....	84
<b>Fotosíntesis</b> .....	85
<b>Importancia del CO<sub>2</sub> en cultivos controlados</b> .....	86
<b>Gases de efecto invernadero</b> .....	86
<b>Huella de carbono</b> .....	87
<b>Cálculo de la huella de carbono</b> .....	88
<b>Análisis de Ciclo de Vida (ACV)</b> .....	90
<b>Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)</b> .....	91
<b>Tipos de análisis</b> .....	92
<b>Metodología para realizar un Análisis de Ciclo de Vida</b> .....	93
<b>Energía incorporada (embodied energy) en los procesos de producción (EI)</b> .....	93
<b>Integración de tecnología</b> .....	97
<b>Externalidad positiva</b> .....	97
<b>Cultivo de lechuga</b> .....	98
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO</b> .....	102
<b>Enfoque de la investigación</b> .....	102
<b>Método de la investigación</b> .....	102
<b>Fuentes de información</b> .....	103
<b>Variables o unidades de análisis</b> .....	105
<b>Instrumentos</b> .....	107
<b>Proceso para la recolección y análisis de datos</b> .....	107
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	109
<b>Actualidad en Costa Rica sobre agricultura urbana en ambientes controlados</b> .....	109
<b>Ubicación del proyecto</b> .....	114

<b>Selección de un cultivo adecuado para la unidad experimental.....</b>	<b>117</b>
<b>Selección de la técnica para el cultivo en la unidad experimental .....</b>	<b>124</b>
<b>Componentes requeridos para la producción vegetales bajo ambiente controlado .....</b>	<b>127</b>
<b>Modulo de cultivo y estructura vertical .....</b>	<b>128</b>
<b>Iluminación LED para horticultura.....</b>	<b>133</b>
<b>Sistema de climatización, control de temperatura y humedad relativa (HR) .....</b>	<b>137</b>
<b>Unidad de aire acondicionado.....</b>	<b>138</b>
<b>Extractores y ventiladores para renovación de la masa de aire .....</b>	<b>151</b>
<b>Higrómetro y termometro .....</b>	<b>152</b>
<b>Manejo del CO<sub>2</sub> mediante ventilación.....</b>	<b>152</b>
<b>Sistema de riego hidropónico con solución nutritiva .....</b>	<b>154</b>
<b>Sustrato .....</b>	<b>157</b>
<b>Centro de carga, protecciones e instalación eléctrica .....</b>	<b>158</b>
<b>Presupuesto total del proyecto .....</b>	<b>159</b>
<b>Análisis de insumos requeridos para producir bajo ambiente controlado .....</b>	<b>160</b>
<b>Formula nutricional.....</b>	<b>160</b>
<b>Almácigos.....</b>	<b>161</b>
<b>Consumo de energía eléctrica del proyecto .....</b>	<b>162</b>
<b>Consumo de agua requerido por el proyecto .....</b>	<b>164</b>
<b>Cálculo de huella de carbono, en función de los factores de emisiones .....</b>	<b>165</b>
<b>Costos de producción del sistema.....</b>	<b>166</b>
<b>Análisis de comparación .....</b>	<b>167</b>
<b>Análisis de comparación económico.....</b>	<b>167</b>
<b>Análisis de comparación ambiental.....</b>	<b>169</b>
<b>Diagrama de flujo de trabajo .....</b>	<b>171</b>
<b>Resumen de resultados.....</b>	<b>172</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>173</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>173</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>175</b>
<b>CAPÍTULO VI: PROPUESTA.....</b>	<b>176</b>
<b>Descripción.....</b>	<b>176</b>

<b>Propuesta</b> .....	176
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	178
<b>ANEXOS</b> .....	185

### Contenido de tablas

<b>Tabla 1:</b> Variables de interés agroclimático.....	62
<b>Tabla 2:</b> Litros de agua requeridos por cada unidad de lechuga en sistema hidropónico .....	99
<b>Tabla 3:</b> Valores de intensidad de la luz para el cultivo de lechuga en ambiente controlado .....	100
<b>Tabla 4:</b> Fuentes de información.....	104
<b>Tabla 5:</b> Variables o unidades de análisis .....	105
<b>Tabla 6:</b> Valores medios de temperatura y HR de San José, considerados para el proyecto .....	116
<b>Tabla 7:</b> Criterios para la selección de un cultivo para la unidad experimental .....	117
<b>Tabla 8:</b> Variables Agronómicas, asociadas a la fenología para el cultivo de lechuga.....	119
<b>Tabla 9:</b> Variables agroclimáticas utilizadas como referencia para el proyecto .....	121
<b>Tabla 10:</b> Variables químicas para el compuesto nutricional en cultivo de lechuga .....	122
<b>Tabla 11:</b> Concentración de CO <sub>2</sub> utilizada para el cultivo de lechuga en ambiente controlado .....	123
<b>Tabla 12:</b> Criterios para la selección de la técnica de cultivo en la unidad experimental.....	125
<b>Tabla 13:</b> Componentes requeridos para la producción de vegetales bajo ambiente controlado.....	128
<b>Tabla 14:</b> Descripción técnica de luminaria LED GreenPower .....	135
<b>Tabla 15:</b> Condiciones externas existentes e internas requeridas .....	139
<b>Tabla 16:</b> Cálculo de carga térmica con iluminaria LED activa 16 horas .....	144
<b>Tabla 17:</b> Cálculo de carga térmica con iluminación LED apagada 8 horas .....	147
<b>Tabla 18:</b> Áreas para el cálculo de carga térmica correspondiente a piso, paredes y techo.....	148
<b>Tabla 19:</b> Consumo eléctrico de equipo de aire acondicionado.....	150
<b>Tabla 20:</b> Equipos requeridos en sistema de riego hidropónico NFT .....	155
<b>Tabla 21:</b> Distribución de centro de carga eléctrico para el proyecto .....	158
<b>Tabla 22:</b> Costo de la instalación eléctrica del proyecto.....	159
<b>Tabla 23:</b> Presupuesto del proyecto .....	159
<b>Tabla 24:</b> Aplicación de solución nutritiva de la marca EverGreen para hidroponía .....	161
<b>Tabla 25:</b> Consumo eléctrico total del módulo de cultivo en operación.....	162
<b>Tabla 26:</b> Aplicación de tarifa eléctrica correspondiente.....	163
<b>Tabla 27:</b> Factor de emisión de gases de efecto invernadero, electricidad .....	165
<b>Tabla 28:</b> Costos de producción de la lechuga en agricultura urbana.....	166
<b>Tabla 29:</b> Resumen de resultados en orden a los objetivos.....	172

### Contenido de ecuaciones

<b>Ecuación 1:</b> Eficiencia de iluminación.....	72
<b>Ecuación 2:</b> Cálculo de cargas externas .....	80
<b>Ecuación 3:</b> Carga solar por radiación a través de ventanas .....	80

<b>Ecuación 4:</b> Carga a través de particiones, áticos y el piso.....	81
<b>Ecuación 5:</b> Carga térmica sensible generada.....	82
<b>Ecuación 6:</b> Carga térmica latente generada por personas.....	82
<b>Ecuación 7:</b> Carga térmica generada por iluminación.....	83
<b>Ecuación 8:</b> Cálculo de carga térmica para motores.....	83
<b>Ecuación 9:</b> Calor generado por artefactos eléctricos.....	84
<b>Ecuación 10:</b> Calor generado por artefactos eléctricos.....	84
<b>Ecuación 11:</b> Cálculo de calor sensible que debe removerse del aire.....	85
<b>Ecuación 12:</b> Cálculo de calor latente que debe removerse del aire.....	85
<b>Ecuación 13:</b> Cálculo de calor total que debe removerse del aire.....	85
<b>Ecuación 14:</b> Proceso de fotosíntesis.....	86
<b>Ecuación 15:</b> Cálculo de la huella de carbono.....	88
<b>Ecuación 16:</b> Input Energético hace referencia a la anergia incorporada (Embodied Energy) ....	96

### Contenido de figuras

<b>Figura 1:</b> Agricultura tradicional.....	33
<b>Figura 2:</b> Uso de maquinaria y tecnología en agricultura intensiva.....	35
<b>Figura 3:</b> La agricultura industrial atenta contra la salud.....	39
<b>Figura 4:</b> Agricultura urbana una solución sostenible.....	41
<b>Figura 5:</b> Sistema de cultivo vertical.....	42
<b>Figura 6:</b> Componentes básicos en la agricultura vertical.....	43
<b>Figura 7:</b> Elementos minerales principales.....	46
<b>Figura 8:</b> Cultivo con agua como sustrato.....	48
<b>Figura 9:</b> Cultivo en grava y riego de subirrigación.....	49
<b>Figura 10:</b> Riego por capilaridad.....	50
<b>Figura 11:</b> Concentración óptima de nutrientes para el cultivo de lechuga.....	51
<b>Figura 12:</b> Sistema NFT.....	53
<b>Figura 13:</b> Sistema de aguas profundas.....	54
<b>Figura 14:</b> Sistema hidropónico de reflujos y flujos (Ebb & Flow).....	55
<b>Figura 15:</b> Sistema de mecha o pabilo.....	55
<b>Figura 16:</b> Riego por goteo.....	56
<b>Figura 17:</b> Aeroponía.....	57
<b>Figura 18:</b> Componentes esenciales de un sistema de fábrica de plantas.....	59
<b>Figura 19:</b> Espectro electromagnético de radiación solar.....	66
<b>Figura 20:</b> Radiación fotosintéticamente activa o luz PAR.....	68
<b>Figura 21:</b> Medición de la cantidad de luz que incide en una superficie.....	71
<b>Figura 22:</b> Espectro visible de onda y colores.....	75
<b>Figura 23:</b> Cálculo de huella de carbono para una actividad.....	89
<b>Figura 24:</b> Flujos de energía.....	96
<b>Figura 25:</b> Distribución de plantas de lechuga.....	101

<b>Figura 26:</b> Experimentación orgánica.....	110
<b>Figura 27:</b> Agricultura en invernaderos .....	112
<b>Figura 28:</b> Captura satelital de la ciudad de San José.....	114
<b>Figura 29:</b> Temperatura media en San José .....	115
<b>Figura 30:</b> Humedad relativa (HR) media en San José.....	116
<b>Figura 31:</b> Lechuga promedio.....	119
<b>Figura 32:</b> Estantería empleada para cultivos verticales (multinivel).....	130
<b>Figura 33:</b> Canales recirculación y bandejas de cultivo para hidroponía NFT .....	130
<b>Figura 34:</b> Colocación de la canaleta y la bandeja de cultivo.....	131
<b>Figura 35:</b> Configuración interna del cuarto de cultivo .....	132
<b>Figura 36:</b> Gráfico de intensidad luminosa para modelo GreenPower .....	135
<b>Figura 37:</b> Distribución de luminarias en área de cultivo .....	136
<b>Figura 38:</b> Representación de colores falsos dentro del cuarto de cultivo.....	137
<b>Figura 39:</b> Dimensiones internas del área a climatizar .....	140
<b>Figura 40:</b> Uso de carta psicométrica (caso con iluminaria LED activa por 16 horas) .....	142
<b>Figura 41:</b> Uso de carta psicométrica (caso con iluminaria LED desactivada) .....	145
<b>Figura 42:</b> Extractor y ventilador eléctrico .....	151
<b>Figura 43:</b> Termohigrómetro PCE-G1A con salida analógica.....	152
<b>Figura 44:</b> Medidor de CO <sub>2</sub> con señal de salida 0-4 mA DC.....	153
<b>Figura 45:</b> Operación del sistema de riego NFT .....	157
<b>Figura 46:</b> Diagrama de flujo de trabajo .....	171

### Contenido de gráficos

<b>Gráfico 1:</b> Análisis de comparación económico .....	168
<b>Gráfico 2:</b> Requerimiento de agua (huella hídrica).....	170

### Lista de anexos

<b>Anexo A:</b> Exoneraciones fiscales y tarifas reducidas en Costa Rica.....	185
<b>Anexo B:</b> Obligaciones tributarias directamente relacionadas al tema en estudio .....	186
<b>Anexo C:</b> Crédito Ciudad Verde para MiPyMes.....	187
<b>Anexo D:</b> Tarifas eléctricas especiales para proyectos sostenibles .....	187
<b>Anexo E:</b> Descripción de luminaria LED GreenPower.....	188
<b>Anexo F:</b> Cotización de luminarias LED requeridas para el proyecto .....	189
<b>Anexo G:</b> Ficha técnica para luminaria LED modelo GLP PM 210 DRW LB L150 .....	190
<b>Anexo H:</b> Formulario para datos asociados a un determinado recinto según el método CLTD .....	191
<b>Anexo I:</b> Transmisión térmica en aislamientos comerciales para paredes .....	196
<b>Anexo J:</b> Oferta de equipo de aire acondicionado.....	196
<b>Anexo K:</b> Ficha técnica de sistemas de aire acondicionado inverter .....	197
<b>Anexo L:</b> Ficha técnica termohigrómetro PCE-G1A con salida analógica.....	198
<b>Anexo M:</b> Ficha técnica de sensor de CO <sub>2</sub> con señal DC de 0-4 mA .....	199

<b>Anexo N:</b> Temporizador analógico Sinowell, código 305101 .....	199
<b>Anexo O:</b> Solución nutritiva menor y mayor de Ever Green para hidroponía .....	200
<b>Anexo P:</b> Tarifa eléctrica Comercios y Servicios T-CO .....	201
<b>Anexo Q:</b> Sistema fotovoltaico conectado a la red.....	202
<b>Anexo R:</b> Precios de referencia en el mercado local para la Lechuga Romana .....	203

## *Dedicatoria*

*A Dios que estuvo presente en cada una de las incontables experiencias vividas a lo largo de este proceso, que muchas veces parecía interminable.*

*A mi mamá Albertina y mi papá Esteban.*

*A mi abuela Beleida.*

*A mi esposa Mery Helen.*

*A mis hijas Isabella, Luciana y Mariana.*

*A mis hermanos Inés María y José Francisco.*

## *Agradecimientos*

*A Dios por la vida y las oportunidades.*

*A mi mamá y a mi papá por guiarme por el camino correcto y poner a mi disposición una vida llena de ejemplos, amor y enseñanzas.*

*A toda mi familia esposa, hijas y hermanos, por estar siempre a mi lado.*

*A mi gran profesor Alejandro Cervantes U.*

## Resumen ejecutivo

Ante la creciente demanda de alimentos de origen vegetal, saludables, es determinante la implementación de técnicas en la producción, que utilicen espacios urbanos, energías limpias, de manera eficiente y reduzcan costos en logística y transporte.

El presente trabajo final de graduación desarrolla una evaluación para determinar la conveniencia de la introducción de la agricultura urbana en la Gran Área Metropolitana. Lo anterior bajo el método de ambientes controlados, con una evaluación técnica y de sostenibilidad, para determinar la eficiencia productiva y energética, en comparación con métodos tradicionales de cultivo. A sí mismo, se consideran externalidades positivas resultantes, como reducción de la huella de carbono y un máximo aprovechamiento de recursos naturales.

La investigación tiene como fundamento la necesidad de propiciar nuevos recursos tecnológicos en el cultivo de vegetales, que sustituyan las técnicas que han impactado el medio ambiente, que en la actualidad ponen en riesgo la seguridad alimentaria en el planeta, debido al aumento de la población y la disminución de áreas de cultivo apropiadas.

Factores como el cambio climático y la creciente aparición de enfermedades y plagas, hacen necesario el uso de ambientes, bajo condiciones controladas, que garanticen la producción a un bajo costo económico y ambiental; se propician alimentos nutritivos, saludables y de fácil acceso a todos los sectores de la población.

El análisis de las necesidades o debilidades, presentes en procesos o sistemas actuales, permiten una evaluación favorable en la búsqueda de una agricultura eficiente y, por ende, el desarrollo de los objetivos de estudio.

Se investiga sobre tecnologías disponibles para controlar variantes en los cultivos, como: riego, temperatura, humedad, luz, entre otros; de esta manera se estiman los costos y la factibilidad de ser incorporados a un proyecto físico o plan piloto.

Aunado a lo investigado, se realiza un estudio para concluir la eficiencia energética de la producción de alimentos en ambiente controlados, al utilizar como medida de referencia una unidad funcional.

Para dar punto final al proyecto, se lleva a cabo un análisis sobre información reunida, que será concluyente para establecer si es conveniente la utilización de granjas urbanas en áreas como el Gran Área Metropolitana, que favorezcan la implementación y el uso de tecnologías limpias, que no hagan uso, en su gran mayoría, de combustibles fósiles.

## Términos importantes

<b>Términos</b>	<b>Definición</b>
GAM	Gran Área Metropolitana
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONU	Organización de Naciones Unidas
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
LED	Diodo emisor de luz (light-emitting diode)
NFT	Técnica de película nutritiva (Nutrient Film Technique)
PFAL	Fábrica de plantas con luz artificial (Plant Factory with Artificial Lighting)
CEA	Agricultura en ambiente controlado (Controlled Environment Agriculture)
CE	Conductividad eléctrica
PAR	Radiación fotosintéticamente activa (Photosynthetically Active Radiation)
ASHRAE	Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Aire Acondicionado y refrigeración
CLTD	Método de diferencial de temperatura para enfriamiento
GEI	Gases de efecto invernadero
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
EI	Energía incorporada
HR	Humedad relativa
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
SFE	Servicio Fitosanitario del Estado
ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos

---

CNFL	Compañía Nacional de Fuerza y Luz
PIB	Producto Interior Bruto
DDS	Días después de sembrado
DDT	Días después de trasplantado
TBS	Temperatura de bulbo seco
TBH	Temperatura de bulbo húmedo
ARESEP	Autoridad Reguladora de Servicios Públicos
IMN	Instituto Meteorológico Nacional

---

## Notación (Símbolos)

Símbolo	Definición
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
H <sub>2</sub> O	Agua
N <sub>2</sub> O	Óxido de nitrógeno
CH <sub>4</sub>	Metano
O <sub>3</sub>	Ozono
°C	Grados Celsius
Nm	Nanómetro
lm	Lumen
lx	Lux
kg	Kilogramo
l	Litro
ppm	Partes por millón
kWh	Kilovatio hora
msnm	Metros sobre el nivel del mar
BTU	Unidad térmica británica (British Thermal Unit)
kg CO <sub>2</sub> eq	Kilogramos de dióxido de carbono equivalente
tCO <sub>2</sub> eq	Toneladas de dióxido de carbono equivalente

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

## Planteamiento del problema

¿Es la agricultura urbana desarrollada en contenedores con ambientes controlados energéticamente y ambientalmente sostenible para reemplazar los métodos tradicionales?

## Objetivo general

Analizar la agricultura urbana desarrollada en contenedores con ambientes controlados vs. la huella energética de los métodos tradicionales para determinar la conveniencia de su introducción en el GAM, mediante eficiencia productiva, energética, reducción de la huella de carbono y aprovechamiento de recursos naturales.

## Objetivos específicos

1. Determinar la eficiencia energética de la producción de alimentos vegetales en ambientes controlados, mediante una unidad funcional.
2. Evaluar la utilización de técnicas y tecnologías de bajo consumo hídrico y energético, que propicien condiciones controladas a cultivos.
3. Analizar si es económicamente sostenible la implementación de granjas urbanas controladas, en la ciudad, para la producción de alimentos vegetales.
4. Establecer las externalidades positivas del reemplazo de la agricultura tradicional por ambientes controlados.

## Justificación

El aumento de población mundial reduce la cantidad de suelos agrícolas y afecta la seguridad alimentaria. De acuerdo con el informe propiciado por la Organización Mundial de la Salud, el número de personas que padecen hambre en el mundo aumentó hasta alcanzar los 828 millones de personas en 2021, lo que supone un aumento de unos 46 millones desde 2020 y de 150 millones, desde el brote de la pandemia de la enfermedad por coronavirus (OMS, 2022).

Aunado a lo anterior, guerras como la que se está llevando en Ucrania perjudican la cadena de suministros y provocan un aumento de precios insumos como fertilizantes y energía. “Esta situación se produce en un momento en el que las cadenas de suministro ya se están viendo perjudicadas por los cada vez más frecuentes fenómenos climáticos extremos” (OMS, 2022).

En algún momento de la historia la agricultura industrial parecía ser una solución para el crecimiento acelerado del mundo, el uso de fertilizantes, pesticidas químicos y recursos naturales de manera desmedida redujeron la escasez de alimento y aumentaron la prosperidad económica. La producción, mediante estas técnicas, ha tenido un impacto negativo en el medio ambiente, al convertirse en preocupación el futuro de la producción alimentaria. “La agricultura eficiente no es solo una cuestión de producción. También debe tomar en cuenta la sostenibilidad ambiental, la salud pública y la inclusión económica” (ONU, 2020).

Métodos tradicionales de producción han afectado la salud de los seres humanos con el uso intensivo de químicos. Según algunas estimaciones, la agricultura industrializada, que produce emisiones de gases de efecto invernadero, contamina el aire y el agua y destruye la vida silvestre, genera costos ambientales equivalentes a US\$ 3 billones al año (ONU, 2020).

En su trabajo, Rojas Montero S. J. (2023) establece la necesidad de continuar mejorando las técnicas de producción agrícola y propone soluciones innovadoras congruentes con la realidad socioeconómica de cada país (p.e. alto grado de urbanización) y el contexto climático, para garantizar el acceso al alimento.

La producción de alimentos se hace cada vez más difícil con la presencia de factores que generan un ambiente hostil, como lo son: las plagas, la escasez de agua, la reducción de tierras fértiles y los cambios climáticos. “Para solucionar esta problemática, en la actualidad se llevan a cabo prácticas en ambientes modificados (...) que han aumentado, de manera acelerada, para la producción de alimentos de calidad” (Garzón Parra , 2019).

Es necesario la introducción de nuevos mecanismos de producción que prioricen la planificación, la reducción de costos, el control de plagas y enfermedades, y garanticen cultivos sanos y accesibles a los seres humanos.

Los avances tecnológicos han propiciado el desarrollo positivo en la agricultura, al permitir el uso de nuevas técnicas como los ambientes controlados. “Estos fueron ideados para satisfacer la creciente demanda de alimentos, que en su mayoría son producidos con agricultura tradicional a cielo abierto” (Garzón Parra , 2019).

Los ambientes controlados son un sistema cerrado que consiste en un edificio o módulo cerrado, de múltiples niveles, que utiliza tecnología para controlar un sistema agrícola. Todos los factores climatológicos, lumínicos, nutricionales e hídricos son suministrados y controlados de manera artificial. “Consiste en aumentar la productividad agrícola de manera sostenible, generar adaptabilidad y resiliencia al cambio climático con una reducción de gases de efecto invernadero” (Rojas Montero, 2023).

Por tanto, esta investigación busca la conveniencia del uso de nuevas herramientas tecnológicas que permitan la incorporación de los sistemas de cultivo en zonas urbanas, al hacer un uso eficiente de los recursos y propiciar un acceso más inmediato al consumidor final durante todo el año.

## Antecedentes

### Tesis extranjeras

#### Tesis N° 1.

Institución: Universidad Antonio Nariño, Colombia.

Tema: “Implementación de un prototipo de granja vertical para el control y monitoreo del crecimiento de las plantas, haciendo análisis de imágenes, forma, tamaño y color utilizando internet de las cosas – Ibagué (Tolima)”.

Autores: Daniel Fernando García Barragan y Francined Junior Pérez Ramírez.

Fecha: 2021.

El principal objetivo que plantearon los autores García Barragan & Pérez Ramírez (2021), fue implementar un prototipo de granja vertical automatizado, mediante hardware y software libre, al usar tecnología IoT con la plataforma Blynk y la placa embebida RaspberryPi. Hacen uso de una cámara HD para la recolección y análisis de imágenes, formas y colores, para el control de variables como humedad, temperatura e iluminación, con diferentes espectros de luz, para mejorar los tiempos de crecimientos de las plantas cultivadas; todo esto es posible mediante el uso de un aplicativo móvil.

La metodología que se utilizó está compuesta por tres etapas principales: la primera, basada en la construcción de la estructura del hidropónico; la segunda, basada en el desarrollo de un sistema de monitoreo y control; la tercera, registro y puesta en marcha del prototipo de granja vertical.

El muestreo o monitoreo de la temperatura permitió identificar los horarios de los mínimos y máximos de temperatura, que sirvieron para identificar horarios de recirculación del agua en el sistema.

Dentro de las conclusiones, se determinó que las granjas verticales conceden un sistema sustentable, por el uso del agua a través de recirculación y ayudan a mejorar el cultivo de vegetales y plantas, frutas etc. Pero, automatizar no solamente ayuda en lo ambiental, sino también en los rendimientos, control y economía del recurso hídrico.

La información sobre granjas verticales, sistemas hidropónicos y la recolección y análisis de información para el control de variables, como humedad, temperatura e iluminación, serán de gran aporte a la presente investigación.

## **Tesis N° 2.**

Institución: Universidad de Los Andes, Colombia.

Tema: “Diseño e implementación de sistema de control para distribución de luz para cultivos en ambientes controlados”.

Autor: Valentina Garzón Parra.

Fecha: 2019.

El objetivo general de Garzón Parra (2019), fue la implementación de estrategias de control basadas en asignación de recursos para el desplazamiento de una plataforma de dos grados de libertad que soporta la fuente de luz de cultivos en ambientes controlados.

Una de las problemáticas presentes en los invernaderos, referente a la luz, es su poca homogeneidad en todo el cultivo. Lo anterior provoca competencia entre las plantas cuando disponen de poco espacio para su crecimiento. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone desarrollar un sistema de control que permita la distribución dinámica de la luz, basada en la asignación de recursos. Para esto, es necesario el desarrollo de un prototipo de planta de control que permita el desplazamiento de la fuente de luz con dos grados de libertad.

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron las siguientes fuentes de información: recursos electrónicos, textos físicos para comprender a profundidad la teoría del óptimo forrajeo; además, se hizo uso de recursos electrónicos que permitieran guiar la construcción de la planta de control. También se consultaron alternativas comerciales para los componentes electrónicos y partes mecánicas de la planta.

Como resultado se comprobó un potencial en este proyecto, para ser implementado, que permitirá llegar a un cultivo homogéneo, debido a que atiende las necesidades específicas de cada planta; por el contrario, los métodos tradicionales de mediciones de LDI no toman en cuenta la necesidad específica de cada planta.

Concluyentemente el autor establece que, si el proyecto se llegara a implementar en invernaderos reales, se podrá disminuir la competencia entre las plantas, por los recursos lumínicos.

Toda la información relacionada a la luz, que juega un papel importante en la producción agrícola, será una valiosa contribución a la exploración que se desarrolla en el presente trabajo. Además del análisis de temas como la utilización de luz artificial con tecnología LED como complemento a la radiación solar o como única fuente de luz, han mostrado un gran potencial en la producción en invernaderos, debido a que promueven el crecimiento vegetativo y regulan la floración de diferentes cultivos.

### **Tesis N° 3.**

Institución: Universidad El Bosque, Colombia.

Tema: “Desarrollo de un microtúnel con ambiente controlado para el cultivo de agraz (*Vaccinium meridionale*), en el laboratorio de experimentación agrotécnica y de energías renovables (LEATYER) del programa de bioingeniería en la Universidad El Bosque, campus Chía”.

Autores: Oscar Santiago Méndez Ruiz y Miguel Ángel Zúñiga Cifuentes.

Fecha: 2022.

Los investigadores Méndez Ruiz & Zúñiga Cifuentes (2022), tuvieron como objetivo desarrollar un microtúnel con ambiente controlado para las variables de temperatura del aire, humedad relativa del aire y humedad del suelo para el cultivo de agraz (*Vaccinium meridionale*), en el laboratorio de experimentación agrotécnica y de energías renovables de la Universidad El Bosque, campus Chía.

La metodología que se usó en este proyecto se dividió en cuatro fases, cada una correspondiente a un objetivo específico, los dos primeros objetivos estuvieron enfocados al proceso de diseño de ingeniería, con el fin de seleccionar los materiales necesarios para el desarrollo del siguiente objetivo, la implementación de la estructura, el sistema de riego y el sistema electrónico. Finalmente se validó el buen funcionamiento de la estructura en términos ambientales y se realizó la comparación enfocada a las variables físicas de las plantas del cultivo control y del cultivo experimental.

Como resultante al comparar cultivos tradicionales con los desarrollados en el microtúnel se puede observar que el crecimiento dentro del microtúnel fue acelerado en todas las variables de crecimiento; sin embargo, esto se observa mejor en la altura de la planta, en el número de hojas y en el tiempo en que los brotes de las plantas se abren para dar hojas o ramas secundarias. Lo anterior

se justifica por la implementación del microtúnel dado que se mantiene una temperatura media y constante, al mejorar las condiciones ambientales expuestas al cultivo de control. En general las plantas se vieron favorecidas en su crecimiento y desarrollo por la temperatura.

Una conclusión relacionada al tema de la presente investigación fue que la implementación de un sistema de agricultura protegida ofrece ventajas que benefician al cultivo en tratamiento, entre estas resaltan la protección contra los cambios climáticos, posible precocidad en los estados fenológicos y por ende la fecha de cosecha, reduce el acceso de las plagas y la maleza entre otras más. De igual manera este proyecto da a conocer una posibilidad de realizar agricultura sostenible.

El aporte en temas como: desarrollo de un sistema de agricultura protegida, seguridad alimentaria, uso de energías alternativas serán muy provechosos, además el compromiso como futuros profesionales de usar principios de biología y herramientas de ingeniería para generar proyectos sostenibles, son factores están en concordancia con el presente proyecto.

#### **Tesis N° 4.**

Institución: Universidad de la Costa - CUC, Colombia.

Tema: “Elaboración del prototipo de un sistema de control de variables atmosféricas automatizado para el cultivo de plantas bajo invernadero en ambiente indoor en la Región Caribe”.

Autores: Daniel Alfonso Anaya Solano y Luis Felipe Ojeda Field.

Fecha: 2020.

Anaya Solano & Ojeda Field (2020), plantearon como objetivo general construir un prototipo funcional de un invernadero automatizado de bajo costo, capaz de controlar variables de temperatura, iluminación y humedad en suelo.

Utilizando una metodología tipo experimental, inicialmente se realizó una revisión sistemática de los sistemas electrónicos autónomos, disponibles en el mercado, para relevar el trabajo manual en el cultivo de plantas comestibles; se tienen en cuenta las variables ambientales que influyen en su crecimiento. Por otro lado, se ejecutaron búsquedas bibliográficas para soportar argumentativamente las decisiones tomadas en el diseño y elaboración del prototipo. Finalmente, se construyó un prototipo funcional de bajo costo capaz de aprovechar espacio y de mantener, de manera óptima, los organismos vegetales.

Como resultante, el prototipo desarrollado mantiene las condiciones ambientales controladas para que la planta se desarrolle con la menor intervención humana; asimismo, es de fácil instalación y su tamaño es adecuado para cualquier tipo de vivienda.

Dentro de las conclusiones ligadas a la actual investigación, el proyecto promueve la sostenibilidad por medio del cultivo de plantas para el consumo humano, con un bajo presupuesto y un nivel de atención mínimo. Desde un punto de vista social, resulta ser una gran alternativa de sustento diario para comunidades vulnerables que se encuentren en ambientes con escasa cantidad de comida. Es el caso de las grandes ciudades, donde es necesaria la implementación de sistemas de cultivo económica y ambientalmente sostenibles para reemplazar a los sistemas de cultivo tradicional que hacen uso desmedido de los recursos y ocasionan problemas ambientales y encarecimiento de los productos.

Aunque la investigación se desarrolló en suelo, temas como el monitoreo de las condiciones de la planta para el suministro adecuado de humedad, luz y temperatura serán aportes muy importantes; aunado a lo anterior, se destaca que el prototipo se construyó de una manera económica. Este factor es determinante, ya que puede ser relacionado para analizar la conveniencia de la introducción de sistemas como los contenedores con ambiente controlado que considera el actual trabajo.

### **Tesis N° 5.**

Institución: Universidad Loyola, Sevilla, España.

Tema: “Sistema de monitorización y control remoto de las condiciones de cultivo para un invernadero con tecnología IoT y energía solar”.

Autor: Iván Vilariño Martel.

Fecha: 2023.

El Objetivo del autor Vilariño Martel (2023) fue desarrollar un invernadero inteligente que incorporara tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en la producción agrícola. En concreto, se monitorean la humedad y la temperatura de las plantas y se controla el riego a distancia, a través de una plataforma online; también se propuso el uso de paneles solares para reducir el consumo energético del invernadero y hacerlo más sostenible.

El método que se utilizó en la investigación constó de varios pasos. En primer lugar, se realizó un estudio del estado del arte de las tecnologías más avanzadas en el campo de los invernaderos inteligentes y se identificaron las tecnologías y soluciones más adecuadas para llevar a cabo el proyecto.

Además, se desarrolló una plataforma en línea que hace posible a los usuarios acceder al sistema de control del invernadero desde cualquier parte del mundo (remoto). Por último, se instalan paneles solares funcionales, junto con baterías que pueden alimentar el sistema de forma autónoma y sostenible.

Como resultado se generó, una innovadora solución para invernaderos que proporcionan un método sostenible de producción de cultivos que es respetuoso con el medio ambiente y eficaz para satisfacer las necesidades de los cultivos.

Se establece que estos invernaderos podrán producir su propia energía renovable gracias al uso de módulos solares, lo que reducirá su dependencia de la red y su huella de carbono. Esta conclusión está relacionada con los objetivos de la presente investigación que busca mediante el análisis de aspectos como: eficiencia productiva y energética, reducción de la huella de carbono y aprovechamiento de los recursos, justificar el remplazo de los métodos de cultivo tradicional por ambientes controlados en las grandes urbes.

Esta solución busca tener un impacto global, al abordar cuestiones como el cambio climático, que repercute en la productividad agrícola reducirá el consumo de agua y energía, al evitar el derroche de recursos.

## **Tesis N° 6.**

Institución: Universidad Continental, Perú.

Tema: “Diseño del sistema de control de temperatura de un invernadero para el cultivo de arándanos en el anexo de Cullpa - El Tambo, 2021”.

Autor: Jesús Ángel Utus Crispín.

Fecha: 2021.

Según los requerimientos para la producción de arándanos, se necesita que los cultivos no se encuentren en climas con temperaturas bajas ni con fuertes vientos; por eso, es recomendable

utilizar un invernadero para satisfacer los diferentes cambios climáticos que se presenten en la zona.

El autor Utus Crispín (2021) considera como uno de los objetivos, el desarrollo de un sistema de monitoreo para el control de temperatura de un invernadero en el cultivo de arándanos.

Hace empleo del método cuantitativo mediante la recolección de datos, para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, establecer patrones de comportamiento y probar teorías; la recolección de los datos se fundamentó en la medición y el análisis en procedimientos estadísticos. También se utilizó el enfoque cuantitativo que comprende la recolección, organización, análisis e interpretación de datos para fundamentar respuestas e interrogantes planteadas.

De acuerdo con lo anterior El Sr. Jesús Ángel Utus Crispín logró diseñar un sistema de control de temperatura, que permitiera la identificación de valores que faciliten el funcionamiento de los dispositivos que conforman el invernadero.

El control de la energía necesaria para el funcionamiento correcto de los dispositivos y actuadores del invernadero, será un aporte en la búsqueda de la menor inversión de energía dentro de la producción controlada en contenedores, además el tema central referente al control de la temperatura está ligado con el actual trabajo.

## **Tesis nacionales**

### **Tesis N° 1.**

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: “Diseño de un sistema hidropónico orbital como alternativa de producción de alimento de alta intensidad en zonas urbanas”.

Autor: Sergio José Rojas Montero.

Fecha: 2019.

El objetivo de esta investigación fue diseñar un sistema hidropónico orbital automatizado para aumentar los rendimientos obtenidos, en fotoperiodos de hasta 24 horas y comparar su

producción con los rendimientos presentes en sistemas hidropónicos convencionales con luz natural; se utiliza lechuga (*Lactuca sativa*), según lo que establece el autor Rojas Montero (2019).

Como método de diseño estructural se estableció que para un sistema hidropónico orbital se debe cumplir con ciertos requisitos específicos necesarios, para ser incorporado de manera eficiente en una PFAL (Plant Factory with Artificial Light).

Este proyecto contempló un sistema electrónico que se encarga de operar diferentes elementos como las luces, ventiladores y la bomba de agua, dividido en subsistemas, que facilitó el diseño. Además, se determinó el tipo de luz por utilizar y la distribución que permita una exposición uniforme en cada planta.

Una de las conclusiones brindadas por el autor indica que el equipo diseñado posee ventajas desde un punto de vista ambiental, ya que aprovecha de mejor manera el agua, elimina el consumo de plaguicidas, reduce la cantidad de fertilizante y no explota el suelo; todo lo anterior relacionado con la investigación actual.

El aporte de este proyecto en temas como el diseño, aprovechamiento de la energética, utilización de luz led y utilización racional de recursos se convierten en fuentes confiables de consulta durante el desarrollo de la investigación.

## **Tesis N° 2.**

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: “Eficiencia hídrica y productiva de tres sistemas de producción vertical con distintos grados de tecnificación, y su influencia en el crecimiento y rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa*)”.

Autor: Adriana Vanessa Rodríguez Soto.

Fecha: 2023.

La autora Rodríguez Soto (2023) mantuvo como objetivo analizar la eficiencia hídrica y productiva de tres sistemas de producción vertical como una alternativa para la producción de lechuga hidropónica (*Lactuca sativa* var. BG), también se pretendió estimar parámetros del manejo de riego de cada sistema.

Para recomendar y promover los sistemas de producción vertical no es suficiente con estudios agrónomos para conocer cómo se desarrolla el cultivo, además indica el autor que es

necesario realizar investigaciones que indiquen la viabilidad económica de estos sistemas a corto y largo plazo. Según lo anterior se utilizó la metodología de presupuestos parciales para obtener los beneficios de tratamientos diferentes. Este es un método que no incluye todos los costos de producción, únicamente toma en cuenta los que varían de un tratamiento o proceso a otro.

Una conclusión relacionada y que puede aportar al diseño del presente trabajo, establece que el tratamiento de mangas colgantes presentó los mejores resultados en las variables de comportamiento agrónomo y eficiencia, en el uso de agua en ambos ciclos de producción. Este resultado ofrecerá mucha información en la selección del sistema apropiado para el aprovechamiento del espacio y el recurso hídrico en un ambiente controlado.

Además, del tema de investigación relacionado, como la utilización eficiente del agua, otro interesante y de igual forma ligado, es la metodología empleada para determinar la conveniencia de la introducción de un sistema.

### **Tesis N° 3.**

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: “Evaluación del efecto del ambiente generado en 4 sistemas productivos sobre el rendimiento productivo y adaptabilidad de 4 cultivares de chile dulce tipo Bell”.

Autor: Roberto Ramírez Matarrita.

Fecha: 2021.

El objetivo general de la investigación desarrollada por Ramírez Matarrita (2021) fue analizar la interacción de las condiciones ambientales generadas en cuatro sistemas productivos sobre el rendimiento, calidad y adaptabilidad de cuatro cultivares de chile dulce tipo Bell, durante la época seca de diciembre del 2019 a mayo del 2020, en el cantón de Cañas.

Lo anterior, con la finalidad de determinar los rangos de: temperatura, humedad relativa y radiación en cada uno de los sistemas productivos y su efecto en el desarrollo vegetativo de cada cultivar, mediante el uso de sensores de clima. Además, dicho trabajo pretendió determinar los niveles de transpiración y la eficiencia del uso del agua por cada kilogramo de chile producido, en cada uno de los sistemas productivos.

La metodología usada en la investigación fue la cuantitativa, debido a que se reflejó la necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de la investigación, derivados de una revisión de literatura, que convergió en una hipótesis. Esta fue sometida a un proceso de comprobación, a través del método científico, para que finalmente se efectuaran inferencias que permitieron aceptar o rechazar la hipótesis, basadas en las conclusiones y toma de decisiones.

Algunos resultados logrados y concernientes al presente trabajo están relacionados con los sistemas productivos en ambiente protegido: casa de malla de 5 m (SP1), casa de malla de 3 m (SP2) e invernadero (SP3), donde se obtuvieron el mayor número de frutos con características óptimas para ser comercializables; estos mostraron diferencias significativas ( $P \leq 0,05$ ) con los frutos obtenidos en campo abierto.

Otra conclusión a fin, con este proyecto, fue el efecto favorable en la eco fisiología del cultivo de chile dulce sembradas en el interior de los sistemas productivos de ambiente protegido con respecto al campo abierto, ya que en estos medios se presentaron las mayores alturas de planta y los mejores niveles del índice de área foliar (IAF) a los 75 días después del trasplante, con un rango entre 2,65 a 3,41.

También se determinó que la casa de malla de 3 m de altura y el invernadero presentaron las menores demandas evapotranspirativas, lo que significó un ahorro en el ciclo productivo de 150 días de 720 m<sup>3</sup> de agua, comparado con el sistema a campo abierto.

Dentro de los aportes de la investigación se pueden destacar el análisis y estudio de la relación entre el rendimiento productivo y el consumo de agua, definido en términos de productividad del agua aplicada por riego (WP) y el análisis económico, para determinar la mayor ganancia económica en el cultivo.

#### **Tesis N° 4.**

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: “Efecto de variables productivas en un sistema hidropónico orbital computarizado sobre características comerciales de lechuga (*Lactuca Sativa L*)”.

Autor: Sergio José Rojas Montero.

Fecha: 2023.

El objetivo del investigador Montero Rojas (2023) fue determinar la combinación de velocidad de rotación y fotoperiodo del sistema hidropónico orbital computarizado para permitir la obtención de la mayor producción de biomasa de lechuga (*Lactuca sativa*) en el menor tiempo posible para validar si el sistema hidropónico es un método de producción viable de manera industrializada.

Para el desarrollo del objetivo general fue necesario diseñar el sistema de iluminación del sistema hidropónico orbital para determinar su flujo de fotones fotosintéticamente activos. A la vez, determinar la interacción de los parámetros operacionales de fotoperiodo y velocidad de rotación, para determinar el efecto sobre la producción de biomasa de producto en función del tiempo.

La metodología de diseño empleada permitió que el sistema de iluminación estuviera compuesto por 40 % de luces LED rojas (640 nm), 40 % de luces LED azules (470 nm) y 20 % de luces LED blancas. Estos porcentajes fueron seleccionados, según resultados favorables demostrados en el desarrollo de plantas, en sistemas hidropónicos con luz artificial.

Dentro de los resultados que la investigación propicia se determinó que en un espacio de 358 m<sup>2</sup> SHIOC (sistema hidropónico orbital computarizado) se puede producir la misma cantidad de lechugas que un invernadero de 1000 m<sup>2</sup> alimentado parcialmente por energía solar y con la cadena productiva en un mismo lugar.

Algunos temas tratados por el trabajo del Sr. Rojas, como el control de variables para aumentar la producción y el diseño de un sistema de iluminación, están relacionados con el presente trabajo investigativo y serán una fuente de consulta fiable.

#### **Tesis N° 5.**

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: “Eficiencia de uso de agua y nutrientes en el cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum*) hidropónico bajo invernadero en Alajuela, Costa Rica”.

Autor: Josué Caleth Duarte Mora.

Fecha: 2019.

El objetivo general de la investigación de Duarte Mora (2019) fue la valuación del efecto del manejo del riego y la nutrición sobre parámetros de riego y de eficiencia de uso de agua y nutrientes, en tomate bajo invernadero.

El diseño experimental desarrollado en esta investigación consistió en un arreglo factorial de tres niveles de nutrición y dos niveles de riego, con un arreglo irrestricto, distribuido de forma aleatoria en la parcela, con tres repeticiones por tratamiento.

La zona de investigación se conformó por 12 hileras, con una distancia de 1,5 m entre hileras y con una distancia entre plantas de 0,33 m, para una densidad de siembra de 2 plantas por m<sup>2</sup>. Las hileras se disponían de 34 pacas de fibra de coco, para un total de 408 pacas. En cada paca se colocaron 3 plantas, para un total de 1224 plantas; la parcela útil se estableció de 810 plantas y el borde de 414 plantas.

Al analizar la variable ET<sub>c</sub> (evapotranspiración del cultivo) indistintamente del nivel de agotamiento de la humedad, se observó que el mayor consumo de agua se presentó en el cultivo con un nivel medio de nutrición. El cambio de nivel de nutrición implicó incrementos de 57% al pasar de un cultivo con nutrición alta a otro con nutrición baja, de 71%, al variar de nutrición media a nutrición baja y un 11% a cambiar de nutrición media a nutrición alta. Resultados como este ayudan a la búsqueda de un uso eficiente del recurso hídrico en función del manejo de los nutrientes.

#### **Tesis N° 6.**

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: “Cultivo hidropónico NFT de lechuga (*Lactuca sativa* L.: Asteraceae) con diferentes cultivares, soluciones nutritivas y microorganismos benéficos en ambiente protegido en San Clara, San Carlos”.

Autor: Dixie Raquel Lizano Astorga.

Fecha: 2020.

El trabajo de la Lizano Astorga (2020) tuvo como objetivo determinar los cultivares de lechuga que presentan mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad, cultivados en

un sistema hidropónico NFT modificado, bajo un ambiente protegido en Santa Clara de Florencia, San Carlos, Alajuela.

El ensayo se llevó a cabo bajo condiciones de ambiente protegido empleando un sistema hidropónico cerrado mediante la técnica NFT modificado, estructurado de forma piramidal mediante el uso de tubería PVC y madera. El ensayo se dividió en tres experimentos que fueron consecutivos y determinados por los resultados del experimento anterior.

Durante todos los experimentos se evaluarán variables de crecimiento, rendimiento y calidad del cultivo, se realizó un monitoreo constante de plagas y enfermedades, se realizaron mediciones diarias de pH, CE (conductividad eléctrica) y temperatura de las soluciones nutritivas y se evaluaron las condiciones ambientales de humedad relativa, temperatura y luminosidad, bajo registro digital, por medio de un registrador de datos (data logger).

De manera concluyente se determinó que los cultivares de lechuga Bohemia y Sementel presentaron mejores características de crecimiento, rendimiento y calidad. Se demostró así una mejor adaptación genético-ambiental a las condiciones sobre las cuales se desarrolló el experimento; este aspecto es importante de considerar para adaptaciones de cultivos a condiciones controladas, para lograr una alta producción.

El análisis de todas las variables que el trabajo analiza es fundamental en cultivos en ambientes controlados, por lo que esta información es a fin con el desarrollo de la presente investigación.

## Limitaciones

- Carencia de investigaciones de carácter público a nivel nacional, con respecto al tema propuesto, que aporten conocimiento para el desarrollo del proyecto.
- Falta de recursos económicos para desarrollar un prototipo o plan piloto, incluso a pequeña escala, que permita evidenciar los resultados a partir de la puesta en marcha de este proyecto.
- Dificultad para el acceso a proveedores de equipos de climatización para aplicaciones en cultivo de vegetales de alta exigencia en el mercado nacional. Al consultar a empresas relacionadas con dichas aplicaciones, no presentan interés en la investigación, por tratarse de carácter universitario y sin propósitos lucrativos. Lo anterior dificulta la búsqueda del equipo ocasionando atraso en el avance de la investigación.
- Carencia de tarifas eléctricas que favorezcan proyectos de esta índole, que busquen la producción de alimentos sanos de manera sostenible y de fácil acceso.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### Agricultura tradicional

En esta sección se ofrece una explicación relacionada con los métodos de agricultura existentes y se inicia con la agricultura tradicional. Esta puede definirse de la siguiente forma: “una agricultura básica, con un nivel bajo de tecnificación y con un uso inexistente o mínimo de tecnología. Las técnicas utilizadas son, en cualquier caso, bastante rudimentarias y se asocia a un tipo de cultivo familiar y de subsistencia” (Certis Belchim, 2022).

En un principio, la agricultura tradicional se limitaba a la subsistencia del grupo o de poblaciones pequeñas, pero, gracias a episodios de exceso de producción agrícola, se dio origen al comercio. Por lo tanto, la agricultura tradicional, no solo tiene como objetivo la obtención de alimento, sino también, en cierto modo y, a pequeña escala, la generación de riqueza (Tradecorp, 2023).

Este método de agricultura utiliza herramientas rudimentarias, como lo muestra la **Figura 1**.

**Figura 1:** Agricultura tradicional



**Fuente:** (Tradecorp, 2023)

Según Certis Belchim (2022) una de las características de la agricultura tradicional “es que carece de tecnificación y tecnología, por lo que no se utilizan herramientas avanzadas, sino utensilios básicos y tradicionales, como la hoz, la pala o la azada”.

Aunado a lo anterior, este tipo de agricultura es estrechamente dependiente de las condiciones meteorológicas, “frecuentemente, las cosechas obtenidas se ven perjudicadas por las condiciones meteorológicas o por una composición del terreno inadecuada” (Certis Belchim, 2022).

Otros factores, que identifican este modelo agrícola de subsistencia familiar y de producción diversa y variada, son:

El objetivo de la agricultura tradicional es proporcionar alimentos a familias o pequeñas regiones, por este motivo se la conoce como agricultura de subsistencia. Es ampliamente practicada en los países superpoblados y subdesarrollados y se calcula que la practica más de un 1/5 de la humanidad. Es un tipo de agricultura que no genera excedentes, ya que no responde a las necesidades de los mercados (Certis Belchim, 2022).

### **Técnicas de agricultura tradicional**

La agricultura tradicional es ejecutada de manera sencilla y económica. De acuerdo a Certis Belchim (2022): “La ausencia de infraestructuras, herramientas, tecnología y medios para almacenar y transportar las cosechas, al no estar enfocada en la distribución y el mercado a gran escala, hace posible la reducción del precio unitario de cada producto”.

La mayor parte del trabajo de la agricultura tradicional lo realizan, de forma manual, los agricultores y empleados. Con herramientas básicas y artesanales y, sin utilizar ningún medio o sistema tecnológico complejo; en definitiva, se trata de una agricultura fácil de realizar (Certis Belchim, 2022).

Al ser un tipo de agricultura antiguo de subsistencia con el tiempo las técnicas, han ido evolucionando y se han mejorado. Con tantos años de historia, es normal que se hayan desarrollado a lo largo del tiempo distintos métodos de producción agrícola que no solo dependen de las circunstancias socioeconómicas del momento, sino también, de las diferencias geográficas y climatológicas por el mundo. Así, hoy coexisten distintos sistemas, como la agricultura intensiva, la extensiva, ecológica, industrial, de subsistencia o incluso la agricultura tradicional, que fue la que asentó los cimientos del resto de modelos (Tradecorp, 2023).

Inicialmente, la agricultura tradicional se limitaba a la subsistencia, posteriormente y, gracias a otras necesidades, se dio origen al comercio. “Por lo tanto, la agricultura tradicional no solo tiene como objetivo la obtención de alimento, sino también, en cierto modo y a pequeña escala, la generación de riqueza” (Tradecorp, 2023).

### Agricultura intensiva

La agricultura intensiva no considera el medio ambiente ni impactos ambientales que resulte de su práctica. De acuerdo con EOS Data Analytics, Inc (2021): “La agricultura intensiva es una parte importante del motor alimentario del mundo, sin embargo, cómo funciona y las características propias de la agricultura intensiva no tienen en cuenta el medio ambiente ni cualquier posible impacto ambiental”. La alta demanda de alimento para satisfacer la demanda mundial busca un máximo aprovechamiento de los recursos.

El concepto de agricultura intensiva implica un mayor uso de las tierras de cultivo para producir el máximo rendimiento posible, con el fin de maximizar beneficios y satisfacer las necesidades alimentarias del ser humano. Esta maximización se consigue mediante prácticas agrícolas intensivas como un mayor uso de fertilizantes e insecticidas, riego abundante, tratamiento de la tierra con maquinaria pesada, plantación de especies de alto rendimiento o expansión de nuevas áreas, entre otras. De este modo, un mayor uso de insumos en la agricultura intensiva trae mejores resultados (EOS Data Analytics, Inc, 2021). Este tipo de agricultura de alta explotación hace uso de maquinaria y tecnología, como se aprecia en la **Figura 2**.

**Figura 2:** Uso de maquinaria y tecnología en agricultura intensiva



**Fuente:** (EOS Data Analytics, Inc, 2021)

Este tipo de agricultura se vuelve todo un negocio para las grandes compañías que, sin importar la forma de explotación, persiguen sus objetivos: “La mayoría de las empresas agrícolas aplican agricultura intensiva y la consideran como un negocio, sacando todo lo que pueden de cada unidad de tierra” (EOS Data Analytics, Inc, 2021).

Por su parte, Grupo Chamartin, Chamsa (2021), de forma muy relacionada con lo explicado, ofrece el siguiente concepto para este tipo de agricultura. La agricultura intensiva es aquella que cultiva en ambientes y condiciones controladas y mediante el uso de maquinaria especializada para obtener el máximo rendimiento en el crecimiento y desarrollo de sus cultivos. Es decir, pretende obtener el mayor rendimiento de los recursos empleados, al cultivar de la forma más eficiente posible (Grupo Chamartin, Chamsa, 2021).

Los orígenes de la agricultura intensiva se remontan a los años 80: “Lo que conocemos como agricultura intensiva tiene su origen en la década de los 80 en la que se produjo un importante aumento de la producción agrícola mundial en lo que se conoce como revolución verde” (Grupo Chamartin, Chamsa, 2021).

De acuerdo con Grupo Chamartin, Chamsa (2021), este tipo de agricultura presenta características como: el control de las condiciones ambientales, principalmente temperatura y humedad. Además, la utilización de plaguicidas e insecticidas para la protección vegetal, también hacen uso de cultivos mejorados genéticamente; todos los procesos son mediante el uso de la maquinaria y tecnología, entre otras características generales.

Las ventajas que ofrece este método de cultivo son amplias, entre ellas se pueden destacar:

La principal ventaja de la agricultura intensiva es el mayor rendimiento obtenido cuando se cosecha en territorios pequeños. Esto aporta beneficios económicos a los propietarios de las tierras y proporciona alimentos a la población. La agricultura intensiva satisface plenamente la demanda del mercado, incluso en zonas densamente habitadas. También requiere menos mano de obra en comparación con los métodos de agricultura ecológica, ya que los controles químicos de plagas y maleza funcionan más rápido y son más fáciles de aplicar (EOS Data Analytics, Inc, 2021).

De acuerdo con lo explicado por EOS Data Analytics, Inc (2021), la utilización de esta técnica tiene consecuencias negativas para el medio ambiente. Al no tener en cuenta conceptos

sostenibilidad ni contribuir a la protección de la naturaleza, la agricultura intensiva puede ocasionar problemas al medio ambiente como: deforestación, degradación del suelo, contaminación del agua, entre otros.

En resumen, la agricultura intensiva consiste en sacar la mayor cantidad de productos por unidad de superficie, mediante la utilización de fertilizantes, semillas seleccionadas, regadíos, maquinaria, entre otros.

## **Agricultura industrial**

La agricultura industrial es fundamental en la producción de alimentos a gran escala y de bajo costo. Los seres humanos hemos logrado modificar las condiciones ambientales y generar suficientes alimentos, requerido por la creciente población.

La agricultura industrial se refiere a la producción intensiva y a gran escala de cultivos y animales para maximizar la fabricación de alimentos. Esto significa un mayor uso de las tierras de cultivo, aplicación de insecticidas y fertilizantes, riego más intenso, empleo de maquinaria para remover la tierra, sembrar y cosechar, cultivo de especies de alto rendimiento, entre otras (Corponet, 2022).

Mediante el uso de la agricultura industrial es posible cubrir la alta demanda de alimento: “De esta manera, la industria agrícola puede asegurar más y mejores resultados, acordes con las demandas alimenticias actuales, y entregas en tiempo y forma” (Corponet, 2022).

La fuente Corponet (2022) destaca que este tipo de agricultura se ha convertido en una de las fuentes primarias de producción de alimentos en el mundo. Dentro de los beneficios que esta aporta, están: mayor producción de alimentos, reducción de costos al consumidor, mayor acceso a productos de calidad, generación de oportunidades de empleo, innovación y el desarrollo tecnológico en la industria, entre otros.

De acuerdo con La Organización de las Naciones Unidas [ONU], “la agricultura industrializada, que produce emisiones de gases de efecto invernadero, contamina el aire y el agua y destruye la vida silvestre, genera costos ambientales equivalentes a US\$ 3 billones al año” (ONU, 2020).

Deforestar los bosques y dañar la vida silvestre para hacer espacio para la agricultura y trasladar las granjas más cerca de los centros urbanos, también puede destruir los

amortiguadores naturales que protegen a las personas de los virus circulantes en la vida silvestre (ONU, 2020).

La industrialización en el campo agrícola fomenta el uso de químicos que son nocivos para el ser humano: “Grandes volúmenes de fertilizantes químicos y pesticidas se utilizan para aumentar el rendimiento agrícola. Los humanos pueden estar expuestos a estos pesticidas potencialmente tóxicos a través de los alimentos que consumen” (ONU, 2020).

Según indica ONU (2020), este método utiliza la tierra de forma ineficiente: “La agricultura se ha vuelto menos sobre la producción de alimentos y más sobre la generación de pienso para animales, biocombustibles e ingredientes industriales para productos alimenticios procesados”.

### Problemas ambientales de la agricultura intensiva e industrial

En general, la utilización de la agricultura intensiva y la industrial hacen un uso desmedido de los recursos naturales y, ocasiona problemas serios en el suelo, contribuyen en gran escala con la deforestación y la contaminación del agua. Además, contribuyen al calentamiento global y tienen un efecto tóxico sobre la salud de las personas, entre otros muchos más problemas. Tintoré (2021), explica en su artículo: “La agricultura industrial, masiva y química es responsable del 50% del calentamiento global y destruye la biodiversidad del planeta”.

Existen muchas propuestas a nivel mundial para sustituir la agricultura industrial y extensiva, por técnicas que consideren los factores ambientales y la salud de las personas, sin embargo el reto no es fácil .

La alternativa es la agricultura ecológica, orgánica, intensiva y biodiversa. Es el único camino para reparar los sistemas climáticos dañados, salvar la Madre Tierra, combatir el hambre, reducir las enfermedades y crear un mundo de equilibrio, armonía, prosperidad y abundancia. Este es el gran mensaje de Vandana Shiva, la gran activista por la biodiversidad (Tintoré , 2021).

La **Figura 3** ofrece una imagen de la agricultura industrial, donde se hace uso de equipo y tecnología, que es una de las características descritas.

**Figura 3:** La agricultura industrial atenta contra la salud



**Fuente:** (ONU, 2020)

### Agricultura urbana

Ávila Sánchez (2019) indica que: “La práctica de actividades agrícolas en las ciudades se ha difundido en numerosos países, independientemente de sus condiciones sociopolíticas y económicas” (pág. 1).

Santini (2023), de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación [FAO], describe el concepto de agricultura urbana de la siguiente manera: La agricultura urbana y periurbana se puede definir como un conjunto de prácticas que proporcionan alimentos y otros productos a través de la producción agrícola y los procesos relacionados con ella (transformación, distribución, comercialización, reciclaje, etc.) y que se llevan a cabo en la tierra u otros espacios en las ciudades o las regiones circundantes (Santini, 2023).

Se interpreta la agricultura urbana como la producción de alimentos en espacios dentro de las grandes ciudades, con beneficios importantes. Este tipo de agricultura engloba actores, comunidades, métodos, lugares, políticas, instituciones, sistemas, ecologías y economías urbanos y periurbanos y, en gran medida, emplea y regenera los recursos locales para satisfacer las necesidades cambiantes de las poblaciones locales; contribuyen, al mismo tiempo, a lograr múltiples metas y funciones (Santini, 2023).

La agricultura urbana y periurbana ofrece una estrategia fundamental para fomentar la resiliencia del suministro de alimentos de una ciudad (Santini, 2023). Por lo general los

productos son llevados del campo a las ciudades o poblados para su distribución y comercialización.

Los centros urbanos pequeños y medianos contribuyen al desarrollo regional y rural como espacios de demanda y mercadeo de la producción agrícola de las áreas circundantes, así como a la producción de bienes y servicios; desempeñan un importante rol como centros de crecimiento y consolidación de actividades no agrícolas y de empleo y atraen migrantes rurales para el desarrollo de actividades no agrícolas (Ávila Sánchez, 2019, pág. 3).

Es en estas zonas, donde los alimentos son requeridos y comercializados, según Ávila Sánchez (2019), los beneficios de la agricultura urbana son muchos; a continuación, algunos:

“Este modelo agrario hace referencia a la producción de alimentos en espacios relativamente pequeños en núcleos de población, principalmente con fines de autoconsumo”, explica Tierra (2023). El crecimiento desmedido de la población en las ciudades demanda soluciones sostenibles de producción de alimentos.

La agricultura urbana es una solución sostenible que puede garantizar el abastecimiento resiliente para los habitantes actuales y futuros de estos centros. En los últimos años se han desarrollado técnicas innovadoras en este ámbito, que propician una producción eficiente, saludable y, totalmente local, en diversos tipos de espacios urbanos (Tierra, 2023).

Las nuevas formas de producción de alimentos en las grandes ciudades se han convertido en una solución factible, que ya se están implementando en centros urbanos por todo el mundo. Esta alternativa prometedora se ha consolidado como solución de la producción sostenible para el futuro, además de ser una estrategia en consonancia con los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), el Pacto Verde Europeo y el Horizonte 2020 (Tierra, 2023).

De acuerdo con Tierra, (2023): “La agricultura urbana se puede definir como un conjunto de prácticas agrícolas o relacionadas a ella (transformación, distribución, comercialización, reciclaje, etc.) que produce alimentos que se llevan a cabo en la tierra u otros espacios en las ciudades”.

Ávila Sánchez (2019) explica que:

En la actualidad, los vínculos que derivan de las nuevas relaciones campo-ciudad (marco de vida, paisaje o reserva territorial, espacio agrícola) se expresan en términos de proyectos territoriales de mayor alcance. Aquí la producción agrícola ocupa un lugar destacado en los procesos de ordenamiento urbano (proyectos agriurbanos, fábricas urbanas, parques agrícolas,

etcétera). En países desarrollados se multiplican las prácticas agrícolas realizadas en los espacios intersticiales o espacios públicos de las ciudades (pág. 5).

Tierra (2023), explica que esta técnica surge como una estrategia para fomentar la resiliencia del suministro de alimentos de las ciudades, además de ser una alternativa que garantiza la seguridad alimentaria de la población y que está en concordancia con parámetros de sostenibilidad.

La **Figura 4** presenta una imagen de un cultivo desarrollado en una ciudad que describe el concepto de agricultura urbana y sostenible.

**Figura 4:** Agricultura urbana una solución sostenible



**Fuente:** (Tierra, 2023)

### Sistemas de producción vertical

Ante el crecimiento de la población mundial existe la necesidad utilizar técnicas de cultivos eficientes y amigables con el medio ambiente.

A nivel mundial existe una preocupación latente con respecto al abastecimiento de alimentos en aras de una población creciente y una disminución de suelos agrícolas. En función de esto, se han tomado diversas medidas para aumentar los rendimientos haciendo un uso más eficiente de los recursos (Rodríguez Soto, 2023, pág. 14)

En la actualidad, la población humana global excede a más de 7,850 millones, pero se espera que este número incremente a 9,800 millones para el año 2050 y se estima que más del

75% de esa población va a vivir en áreas urbanas. Acompañado con el crecimiento de la población, también se va a incrementar la demanda de los recursos alimentarios, hídricos y energéticos que ya se encuentran en situación de estrés. Por tanto, los nuevos sistemas agrícolas que ofrezcan una producción alimentaria sostenible serán fundamentales para satisfacer estas demandas (Wallace-Springer, 2023).

Un sistema de producción vertical en general es una solución de cultivo sostenible y de aprovechamiento de espacio en sitios urbanos y uso adecuado de los recursos.

Se puede apreciar un sistema de cultivo vertical en la la **Figura 5**, el uso de diferentes niveles hace un mejor aprovechamiento del espacio y permite obtener mayor cantidad de alimento en menos área.

**Figura 5:** Sistema de cultivo vertical



**Fuente:** (Wallace-Springer, 2023)

Los expertos apuestan a que la agricultura vertical es el sistema que va a satisfacer las demandas, por lo que en la actualidad se invierte en desarrollo e investigación en este campo.

Simplemente, la agricultura vertical es una práctica donde las plantas son producidas, en capas apiladas verticalmente. Este método de horticultura busca maximizar la utilización del espacio de producción al incrementar la superficie del piso lo que permite producir más plantas en el mismo espacio. Adicionalmente, puede ser aplicada a prácticas actuales hortícolas, desde la producción de hidroponía a baja escala, hasta las operaciones agrícolas en ambiente

controlado a gran escala y tiene el potencial de producir cultivos todo el año en prácticamente cualquier lugar, si se combinan las técnicas adecuadas (Wallace-Springer, 2023).

### Componentes básicos en la agricultura vertical

Wallace-Springer (2023) explica que existen tres componentes básicos en la agricultura vertical que corresponden a: estructura del sistema, estructura eléctrica, y estructura de plomería. Es vital considerar estos tres componentes, ya que dictarán donde se puede ubicar cada sistema; en la **Figura 6** se pueden apreciar estos tres sistemas.

Navarro Martínez (2023) indica que la estructura del sistema “constituye la base física de la agricultura vertical. Esta estructura incluye las torres o estanterías en las que se cultivan las plantas de manera apilada, optimizando el uso del espacio”. Además, hace énfasis en la estructura eléctrica que es fundamental para suplir la iluminación artificial requerida por los cultivos.

Esto engloba la iluminación artificial, que a menudo es necesaria para suplir la falta de luz solar natural en ambientes interiores. La iluminación LED es comúnmente utilizada por su eficiencia energética y su capacidad para proporcionar la gama adecuada de colores para el crecimiento óptimo de las plantas (Navarro Martínez, 2023).

Por su parte el uso de sistemas de riego automatizados implica la estructura de plomería: “la estructura de plomería, es responsable de garantizar un suministro constante de agua y nutrientes a las plantas” (Navarro Martínez, 2023).

**Figura 6:** Componentes básicos en la agricultura vertical



**Fuente:** (Wallace-Springer, 2023)

## Tipos de agricultura vertical y tipos de cultivos

De acuerdo con Wallace-Springer (2023), miembro del equipo de Servicios al Productor, con base en Georgia, Estados Unidos y con un excelente conocimiento referente a cultivos hidropónicos y acuapónicos en invernadero, luz LED y nutrición de plantas en agricultura vertical, hay tres tipos de sistemas principales: hidroponía, acuaponía y sistemas con sustrato.

A continuación se detallan los tres tipos.

Las plantas en una operación de agricultura vertical con hidroponía son suministradas con una solución acuosa compuesta con la cantidad adecuada de elementos esenciales necesarios para su crecimiento óptimo. Ejemplos de este tipo de agricultura vertical incluyen: estructura piramidal, torre vertical, cultivo en agua profunda (DWC por sus siglas en inglés) y aeroponía (Wallace-Springer, 2023).

En la agricultura vertical acuapónica, la producción de peces se integra a la producción de plantas, al utilizar diseños de sistemas hidropónicos. Sin embargo, en vez de fertilizar las plantas con una solución nutritiva con cantidades de nutrientes adecuados, las plantas de manera alternativa son fertilizadas con agua filtrada enriquecida con excremento de los peces, convertida a nitratos y suplementada con la cantidad de nutrientes necesarios para elevarlos a una concentración adecuada (Wallace-Springer, 2023).

En la agricultura vertical con sustratos, las plantas son producidas en sustratos (ej. a base de turba, lana de roca, coco, perlita, etc.) y suplementadas con solución nutritiva. Ejemplos de este tipo de sistema incluyen: sistema modificado de flujo y reflujo (ebb and flow, en inglés), capilaridad y camas altas que han sido apiladas una encima de otra o son movidas a estructuras diseñadas verticalmente (Wallace-Springer, 2023).

Wallace-Springer (2023) explica que en los sistemas de agricultura vertical se pueden producir una amplia variedad de especies de plantas como hortalizas, frutas, hierbas finas y hasta plantas florales. Sin embargo, antes de que se lleve al cabo la elección de plantas a producir, ¡Es importante considerar primero los factores antes mencionados para determinar si será económicamente viable!.

Actualmente, los cultivos comerciales más comúnmente producidos en la agricultura vertical incluyen lechuga, col rizada, albahaca, cebollín, menta y fresas.

## Hidroponía o riego hidropónico

El riego hidropónico o hidroponía es un sistema que consiste en incorporar una solución nutritiva y equilibrada disuelta en el agua de riego que cuente con todos los elementos necesarios para el desarrollo de los cultivos.

La hidroponía se refiere tanto a la técnica como a la instalación que permite utilizar este sistema de regadío (Sistemas Hortícolas Almería S.L, 2022).

Zárate Aquino (2014) en su libro destaca algunos otros terminos con los que se conoce la hidroponía: “También se conoce como cultivo sin suelo, nutricultura, quimiocultura, cultivo artificial o agricultura sin suelo” (pág. 7).

Redondo Quintero (2023) define en su trabajo de investigación la hidroponia de la siguiente manera:

La hidroponía es un método utilizado para cultivar plantas usando disoluciones minerales en vez de suelo agrícola. Las raíces reciben una solución nutritiva y equilibrada disuelta en agua con los elementos químicos esenciales para el desarrollo de las plantas, que pueden crecer en una solución acuosa únicamente o bien en un medio inerte, como arena lavada, grava o perlita (Redondo Quintero, 2023, pág. 11).

Por su parte, Zárate Aquino (2014), en su libro Manual de Hidroponía indica que la hidroponía surge como una solución ante la degradación de los suelos y la contaminación. En los últimos sesenta años se ha trabajado en el desarrollo de nuevos sistemas que ayuden a solventar esos problemas. Uno de los más representativos es la hidroponía, que ofrece una alternativa para producir alimentos, no solamente en las áreas con problemas de contaminación de suelos y carencia de agua, sino también en el medio doméstico (Zárate Aquino, 2014, pág. 7).

En la hidroponía el suelo no es necesario durante el desarrollo de las plantas, se utilizan nutrientes y minerales, disueltos en agua, lo anterior para que las plantas los absorban por medio de las raíces: “En cuanto a la solución nutritiva, se busca proveer a la planta de los 13 elementos minerales principales por sus efectos en ella” (Redondo Quintero, 2023, pág. 11).

La característica más importante de la técnica hidropónica es que en ninguna de las etapas de crecimiento se requiere del suelo como soporte o fuente de nutrimentos del cultivo; la planta toma los nutrimentos directamente del agua, donde se encuentran disueltos. La principal

ventaja del sistema es que puede adaptarse a cualquier espacio, condición climática y economía (Zárate Aquino, 2014, pág. 9).

Los sistemas hidropónicos pueden ser la solución a la creciente demanda de alimentos y a la búsqueda de sostenibilidad en la producción,.

La **Figura 7** presenta la lista de elementos minerales requeridos por las plantas en hidroponía y estos nutrientes esenciales son introducidos en la disolución para que las plantas se desarrollen de forma óptima.

**Figura 7:** Elementos minerales principales

• Nitrógeno	• Azufre	• Cobre
• Potasio	• Hierro	• Silicio
• Fósforo	• Manganeso	• Molibdeno
• Calcio	• Zinc	
• Magnesio	• Boro	

**Fuente:** (Redondo Quintero, 2023)

Zárate Aquino (2014) destaca las siguientes ventajas de usar hidroponía: no depende de fenómenos meteorológicos, permite cultivar la misma especie ciclo tras ciclo, varias cosechas al año, equilibrio entre aire, agua y nutrimentos, ahorra en el consumo de agua, admite mayor densidad de población, productos de mayor calidad, acorta el tiempo para la cosecha, reduce los costos de producción, entre otras.

Cabezas (2021), en su libro *Manual Especializado en Instalación y Producción de Cultivos Hidropónicos*, explica algunas ventajas de la utilización de la hidroponía, entre ellas: incremento de la producción de 20 a 70%, ahorra hasta 50% en costos de los fertilizantes, reducción en aplicación de fungicidas e insecticidas hasta 15%, ahorro de agua de 80% a 92%, se evita residuos y además se protege el medio ambiente.

Las desventajas, según Zárate Aquino (2014), son pocas entre ellas: se requiere de una inversión inicial relativamente alta, las instalaciones y equipos requieren de mantenimiento y cuidado. Los elementos necesarios de su sistema hidropónico son: material vegetal (hortalizas), contenedor o recipiente, sustrato y solución nutritiva (Zárate Aquino, 2014).

## Sustrato

En los cultivos hidropónicos Zárte Aquino (2014) define el sustrato de la siguiente manera, “el sustrato es el material que va a reemplazar el suelo en sus funciones de sostén de la raíz y retención de humedad” (pág. 19).

Es importante recordar que la hidroponía no requiere de suelo: “Hidroponía no necesita suelo, produce en espacios reducidos, apto para la producción en áreas urbanas”.

Durante el desarrollo de la hidroponía se experimentó con diferentes tipos de sustratos “en la actualidad se practican tres tipos de cultivo: en agua, en grava y en agregados” (Zárte Aquino, 2014, pág. 19).

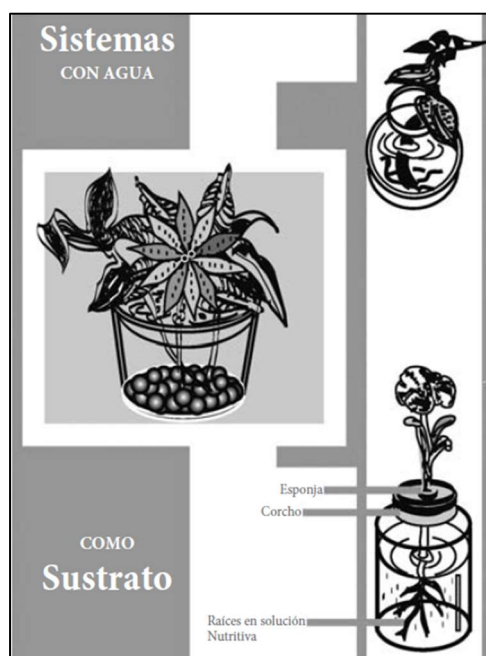
El primer sustrato que se utilizó fue el agua, posteriormente se incurrió en sustratos sólidos que facilitaron el proceso.

## Cultivos en agua

Zárte Aquino (2014) indica que para este tipo de cultivo las raíces se desarrollan total o parcialmente en el agua. El contenedor, en todos los casos, debe contar con soportes para las plantas y, dentro de las principales características del uso de este sustrato: las plantas son más susceptibles a los cambios del pH, que conviene mantener en un intervalo de 6.5 a 7.0, la solución nutritiva debe permanecer en la oscuridad para evitar el crecimiento de algas que provocan competencia con las raíces de la planta en cultivo, se requiere de aireación para el abastecimiento de oxígeno a las raíces de plantas, el lecho debe tener entre 5 y 10 cm de profundidad, cambio de agua es más bien el reemplazo de la solución nutritiva, que deberá cambiarse cada tres o cuatro semanas, y únicamente se agregará agua el resto de los días.

En la **Figura 8** se aprecian los detalles de un cultivo que utiliza agua como sustrato.

**Figura 8:** Cultivo con agua como sustrato



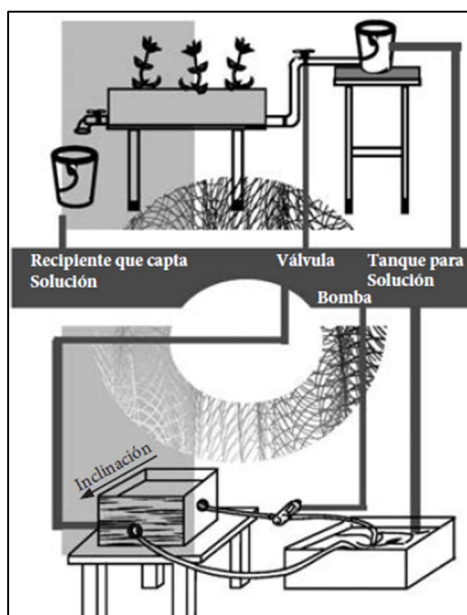
**Fuente:** (Zárate Aquino, 2014)

### Cultivo en grava

“La grava se define como tal por el tamaño de sus partículas, que miden de dos a cuatro centímetros de diámetro. El material puede ser basalto, granito, tezontle, piedra pómez, pedazos de ladrillo o carbón” (Zárate Aquino, 2014, pág. 21).

Zárate Aquino (2014) destaca las siguientes recomendaciones para este sistema: se debe evitar materiales que contengan elementos tóxicos y con alta alcalinidad, es necesario un material con buena retención de humedad y que no se pulverice fácilmente, es importante mantener estables los niveles de pH en la solución nutritiva (entre 6.5 y 7.0), la frecuencia del riego dependerá del cultivo (especie y etapa de crecimiento), condiciones climáticas y capacidad de retención de humedad de la grava. El riego más recomendado para este sustrato es el de subirrigación, es decir, la solución nutritiva o agua debe entrar al contenedor por la parte inferior de este y drenarse después como lo representa la **Figura 9**.

**Figura 9:** Cultivo en grava y riego de subirrigación



**Fuente:** (Zárate Aquino, 2014)

En general, se utiliza grava en cultivos a mediana y gran escala y, dentro de las ventajas que ofrece este sustrato, según Zárate Aquino (2014) son: sistema de buen drenaje, ahorra fertilizantes, es fácil de esterilizar de manera química y el sistema de riego puede automatizarse fácilmente; además, algunas desventajas son: el gasto de instalación es alto (en caso de requerir automatización), la grava sufre cambios bruscos de temperatura y las plantas son más sensibles al nivel del pH, a los nutrimentos y a la temperatura de la solución.

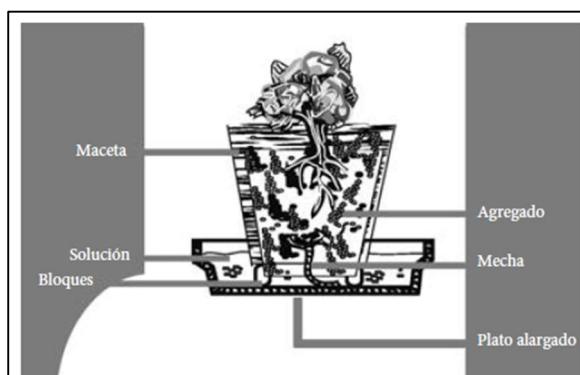
### Cultivo en agregado

En general, los agregados están compuestos de partículas finas: “Las partículas de los agregados son más pequeñas que las de las gravas, miden menos de cinco milímetros de diámetro. Los materiales que más se utilizan son arena, agrolita, vermiculita y tezontle” (Zárate Aquino, 2014, pág. 21).

El proceso de este cultivo es el siguiente:

En la superficie del sustrato se vierte la solución nutritiva o el agua, de tal forma que esta llegue a las raíces por gravedad. El riego se puede realizar por capilaridad (ver **Figura 10**) o por goteo (la solución nutritiva no se recircula, ya que el consumo es muy bajo).

**Figura 10:** Riego por capilaridad



**Fuete:** (Zárate Aquino, 2014)

De acuerdo con Zárate Aquino (2014), las ventajas que este sustrato presenta son: las partículas pequeñas del agregado hacen que la retención de humedad sea mayor, por tanto, menos frecuente el riego. El manejo es más sencillo y hay la posibilidad de utilizar el sustrato varias veces, siempre y cuando se esterilice; como desventaja, el material se pulveriza.

### Soluciones nutritivas

La solución nutritiva es uno de los principales componentes en un sistema hidropónico. Lizano Astorga (2020), en su investigación, brinda la siguiente definición: “Una solución nutritiva es una solución de sales minerales en agua, que contienen los nutrientes macro y micro necesarios, en forma iónica, que son absorbidos por el sistema radical de las plantas para su correcto crecimiento y desarrollo” (pág. 8).

La solución nutritiva, de acuerdo con Lizano Astorga (2020), contiene los nutrientes en las cantidades necesarias para el correcto desarrollo vegetal de la planta, donde se establece una adecuada concentración para el sano funcionamiento de las raíces, temperatura y pH óptimo que mantenga los nutrientes disponibles y de forma balanceada en cantidades de aniones y cationes.

Una formulación adecuada de nutrientes es importante para garantizar el éxito de un cultivo hidropónico, pues se realiza para cada tipo de cultivo y estado fenológico de la planta (etapa crecimiento vegetativo, floración y fructificación); para eso es necesario contar con requerimientos

nutricionales de cada cultivo, estados fenológicos de la planta y resultados del análisis químico del agua del laboratorio (Cabezas, 2021, pág. 10).

“Los requerimientos nutricionales derivan diferentes soluciones nutritivas que varían en función de la fenología, el tipo de cultivo (especie, cultivar) y las condiciones ambientales imperantes” (Lizano Astorga, 2020, pág. 9).

En la **Figura 11** se puede apreciar una formulación para lechuga “cita las concentraciones óptimas de nutrientes que actualmente utiliza en sus cultivos, específicamente para lechuga” (Cabezas, 2021, pág. 10). Este es un ejemplo específico de una formulación, ya que cada cultivo tiene una dosis diferente.

**Figura 11:** Concentración óptima de nutrientes para el cultivo de lechuga

Concentraciones óptimas de nutrientes para cultivo de Lechuga		
ELEMENTO	SIMBOLO	en ppm o g/1000L
Nitrógeno	N-NO3	228
	NH4	12
Fósforo	P	50
Potasio	K	240
Calcio	Ca	200
Magnesio	Mg	45
Azufre	S	70
Hierro	Fe	2.0
Boro	B	0.8
Manganeso	Mn	0.5
Zinc	Zn	0.15
Cobre	Cu	0.15
Molibdeno	Mo	0.1
Fuente: Rene Cabezas (2021)		

**Fuente:** (Cabezas, 2021)

“En el caso de lechuga existen diferentes soluciones nutritivas propuestas para este cultivo las cuales varían dependiendo del autor y de la variedad cultivada” (Lizano Astorga, 2020, pág. 9).

Es importante velar por la calidad de la solución nutritiva, emplearla de manera correcta, con los componentes disueltos, concentrados y con bajo porcentaje de impurezas “la importancia de siempre considerar los factores de pH, temperatura, concentración de amonio y oxígeno disueltos en la solución, conductividad eléctrica, afinidad entre aniones y cationes, y el estado fisiológico de la planta” (Lizano Astorga, 2020, pág. 10).

El pH afecta directamente la distribución y biodisponibilidad de los nutrientes para la planta “El pH de la solución nutritiva presenta características de inherencia a su composición mineral, además de que influye en las reacciones de combinación, disociación y precipitación de los elementos en solución” (Lizano Astorga, 2020, pág. 10); es importante, por tanto, velar por los niveles óptimos de pH.

La temperatura y oxígeno disuelto en la solución son factores muy importantes por tomar en cuenta en la formulación de soluciones nutritivas, ya que están estrechamente relacionados, el rango adecuado de temperatura oscila entre 18 °C y 25 °C, temperaturas inferiores a los 22 °C hacen que el oxígeno disuelto se encuentre en los valores óptimos. Sin embargo este nivel de temperatura puede alterar algunas funciones metabólicas y fisiológicas de la planta, así mismo temperaturas menores a 15 °C reducen considerablemente la absorción (Lizano Astorga, 2020, pág. 10).

Otro factor importante de controlar en una solución nutritiva es la conductividad eléctrica (CE). La conductividad eléctrica es un factor que representa la cantidad de iones disueltos en la solución. Cuanto mayor sea la concentración de sales minerales, mayor será la presión osmótica (conductividad eléctrica) y menor el potencial osmótico. La presión osmótica depende de la cantidad de partículas disueltas y, en cuanto mayor sea la cantidad de estas, se genera un gasto superior de energía por parte de la planta en el momento de la absorción y provoca un desbalance nutricional (Lizano Astorga, 2020, pág. 10); los niveles bajos de conductividad eléctrica, generan una escasa disponibilidad de nutrientes.

### **Tipos de sistemas hidropónicos**

Existen diversos tipos de sistemas hidropónicos y la elección de un sistema hidropónico depende de los recursos disponibles, así como de las plantas que se desean cultivar.

El ingeniero Sela (2023) explica, en su publicación, que existen varios diseños de sistemas hidropónicos y varios métodos de cultivo.

Según explica Sela (2023), los principales tipos de sistemas son: técnica de película nutritiva (NFT), cultivo de aguas profundas, flujo y reflujo, sistemas de mecha, sistemas de goteo hidropónico y aeroponía.

A continuación se ofrece una reseña explicativa de cada sistema.

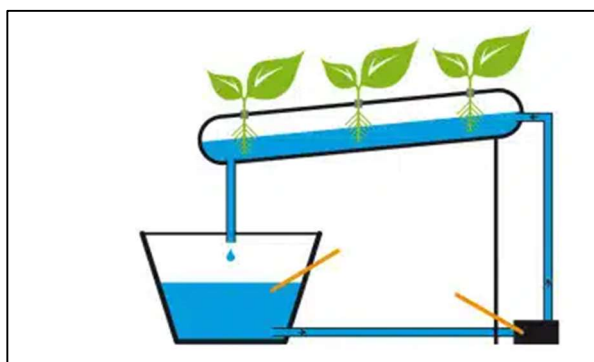
## La técnica de película nutritiva (NFT)

En este método, las raíces de las plantas están expuestas a un flujo continuo de una película de solución nutritiva. Las plantas se colocan en agujeros de plantación a lo largo de los canales, donde los canales se colocan en una ligera pendiente longitudinal, que permite que el agua fluya por gravedad hacia una tubería de drenaje. La película delgada de la solución nutritiva se recircula continuamente (Sela, 2023).

“Es una tecnología hidropónica de ambiente protegido muy utilizada en el hemisferio norte para la producción de hortalizas de fruto y hoja” (Lizano Astorga, 2020, pág. 7)

La **Figura 12** presenta un esquema de un sistema hidropónico NFT.

**Figura 12:** Sistema NFT



**Fuente:** (Generación Verde, 2017)

De acuerdo con Lizano Astorga (2020), “el sistema permite suministrar eficientemente todos los macro y micronutrientes requeridos por la planta garantizando a la vez una correcta oxigenación de la solución evitando pudrición y oxidación del sistema radical” (Lizano Astorga, 2020, pág. 7).

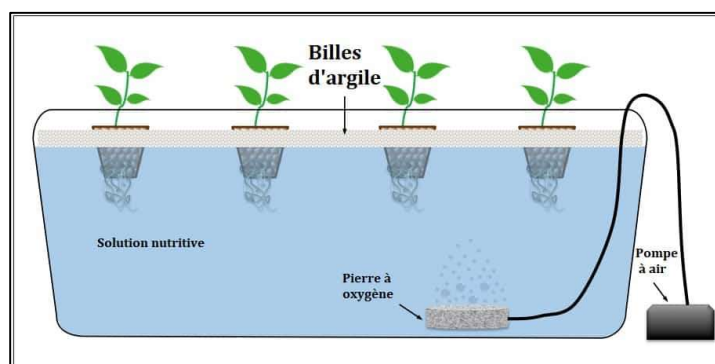
El sistema NFT está constituido principalmente por una bomba de impulsión, tuberías de distribución, canales de cultivo, tanque de almacenamiento y una tubería colectora, debido a su estructura se caracteriza por ser un sistema de alta inversión inicial que demanda un suministro constante de agua y de energía (Lizano Astorga, 2020, pág. 7).

## Cultivo en aguas profundas

“Las raíces de las plantas se colocan directamente en una solución nutritiva y se inyecta oxígeno al agua” (Sela, 2023). De acuerdo con lo publicado por Cannan Media (2019), “la cultura de aguas profundas (DWC) es un tipo de hidroponía donde se cultivan plantas cuyas raíces se sumergen en una solución nutritiva aireada.

El clásico "cultivo de aguas profundas" consiste en un recipiente con tapa (preferiblemente de color negro), una taza de malla en la que se coloca la plántula (se recomienda utilizar una taza de 9 cm o más de diámetro), un sustrato de hidrotrón (un lecho para el crecimiento hidropónico), una bomba de aire y una piedra de oxígeno (Cannan Media, 2019).

**Figura 13:** Sistema de aguas profundas



**Fuente:** (Cannan Media, 2019)

## Reflujo y flujo (Ebb & Flow)

De acuerdo con el Ing. Guy Sela, emprendedor y consultor con 22 años de experiencia en el mercado agrícola internacional este sistema requiere del uso de bandejas que son inundadas por una solución de nutrientes, similar a lo que se observa en la **Figura 14**.

Macetas con plantas se colocan en una bandeja de cultivo. La bandeja se inunda con una solución nutritiva, hasta que alcanza un cierto nivel. La solución nutritiva fluye hacia las raíces a través de agujeros en las macetas. Luego, el agua se drena de las bandejas y puede ser reutilizada en el próximo ciclo de riego (Sela, 2023).

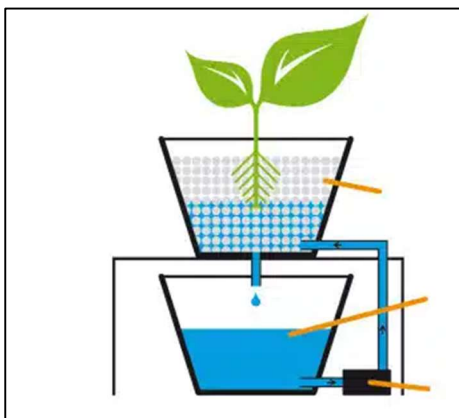
La publicación de Generación Verde (2017) explica:

En un sistema de flujo y reflujo se inundan temporalmente las charolas de crecimiento con solución nutritiva y luego esta es drenada de vuelta al depósito.

El flujo se provoca mediante una bomba conectada a un timer que se activa varias veces al día; cuando esta deja de funcionar, la solución fluye de vuelta al depósito.

Este sistema hidropónico tiene la gran ventaja de que puede implementarse con muchos tipos distintos de sustrato y que permite el crecimiento de varias especies vegetales (Generación Verde, 2017).

**Figura 14:** Sistema hidropónico de reflujos y flujos (Ebb & Flow)



**Fuente:** (Generación Verde, 2017)

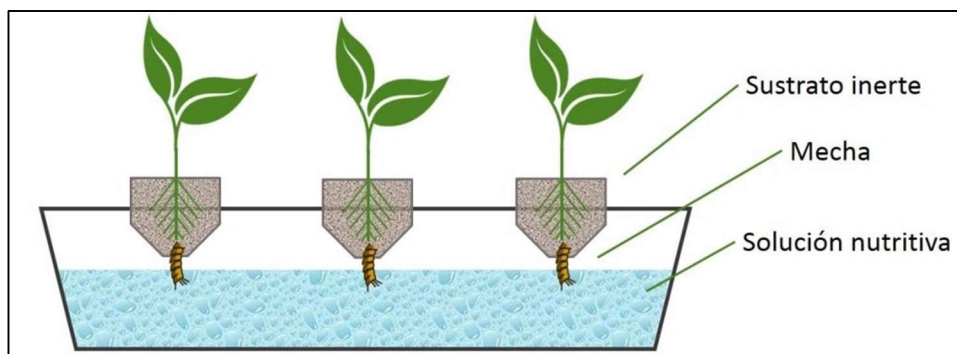
### Sistema de mecha

Un sistema hidropónico pasivo en el que un lado de cuerdas de nylon fibroso se coloca alrededor de las plantas, en el sustrato de cultivo, mientras que su otro lado se coloca en el depósito de la solución nutritiva. La solución nutritiva sube las mechas a las plantas por acción capilar (Sela, 2023).

El sistema de mecha es muy versátil y puede usar distintos tipos de sustrato, pero solamente puede usarse para plantas que requieren poca agua.

Esta técnica es una de las más simples, ya que no requiere de bombas para transportar la solución nutritiva desde el depósito hasta las charolas o bandejas de crecimiento. En vez de eso, las plantas reciben la solución nutritiva mediante mechas o pabilos (Generación Verde, 2017).

**Figura 15:** Sistema de mecha o pabilo

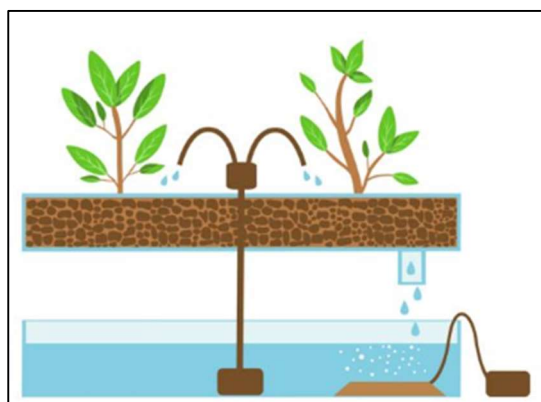


**Fuente:** Elaboración propia (2023)

### Sistema de goteo

En estos sistemas, la solución nutritiva es entregada a las plantas por un sistema de goteo: “Las plantas se colocan en contenedores como bolsas, macetas, losas, camas, etc. Se puede recircular y reutilizar el drenaje que sale del contenedor y, en esa manera, ahorrar en agua y nutrientes” (Sela, 2023).

**Figura 16:** Riego por goteo



**Fuente:** (Sela, 2023)

### Aeroponía

Las plantas tienen un desarrollo con sus raíces suspendidas en el aire, de acuerdo con lo que explica la publicación de SMEAP (2022).

En este sistema, las plantas se desarrollan con sus raíces suspendidas en el aire en un entorno cerrado y la solución nutritiva se suministra a través de nebulizadores que dispersan

gotas y crean una atmosfera saturada de humedad durante ciertos intervalos de tiempo, para mantener en equilibrio la disponibilidad de agua y oxígeno para las raíces (SMEAP, 2022).

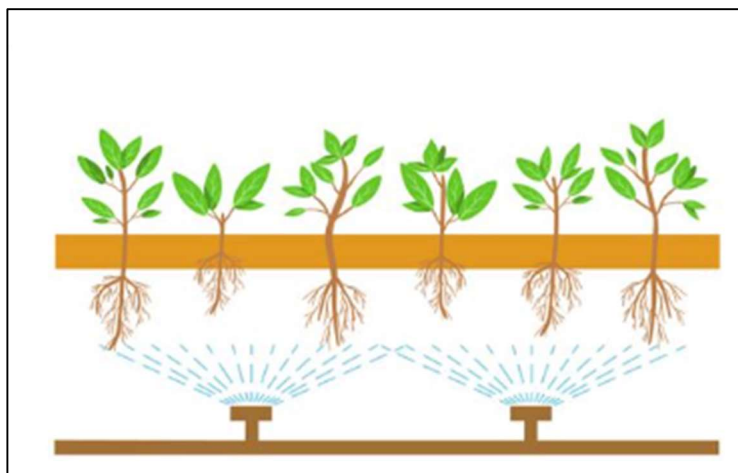
Es una técnica altamente eficiente, las raíces pueden secarse rápidamente si los ciclos de nebulización se interrumpen.

“La estructura de los sistemas aeropónicos pueden ser columnas, cubos o piramides, los cuales se construyen con materiales plásticos, ya sea vertical u horizontalmente. En función del cultivo a establecer y la disponibilidad de espacio” (SMEAP, 2022).

Algunas de las ventajas y desventajas de utilizar esta técnica, de acuerdo con lo explicado por SMEAP (2022) son: el sistema permite establecer mayor n

úmero de plantas por unidad de superficie y el gasto de agua y nutrientes es sumamente bajo con respecto a otros sistemas hidropónicos; sin embargo, es una técnica no apta para principiantes, pues el costo de instalación del sistema es elevado y se requiere constantemente de monitoreo para evitar el desarrollo de bacterias y hongos.

**Figura 17:** Aeroponía



**Fuente:** (Sela, 2023)

## Sistemas de fábricas de plantas PFAL

Contreras Avilés (2020) en su trabajo científico ofrece la siguiente definición del concepto:

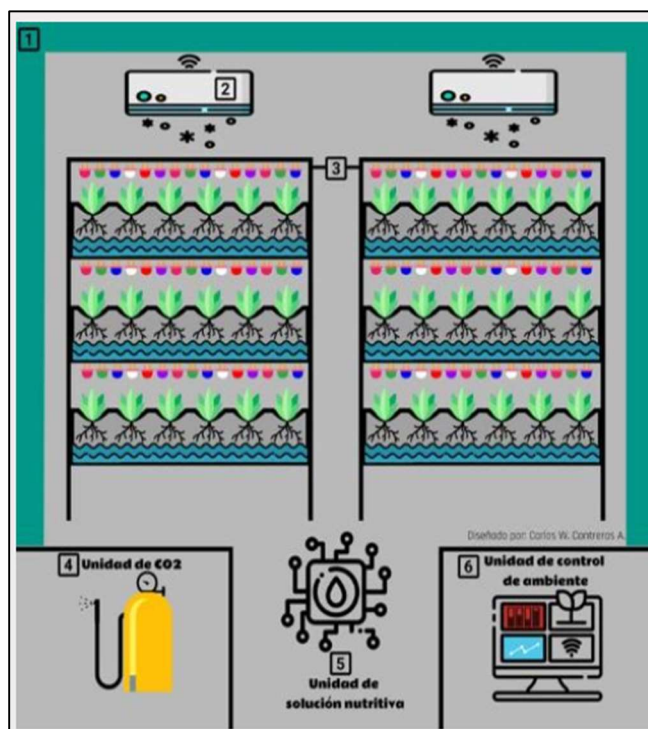
Esta tecnología consiste en un sistema cerrado de producción de plantas en múltiples capas verticales, que requiere un área de cultivo aislada del medio externo, cuyas condiciones (temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono, solución rica en nutrientes e iluminación) son monitoreadas y controladas, con el objetivo de asegurar buenos rendimientos de producción, alta calidad de productos, eficiencia en el aprovechamiento de los recursos y la mínima emisión de contaminantes (Contreras Avilés, 2020).

Este mecanismo permite desarrollar organismos vegetales a través de una cámara, donde las plantas crecen con la ayuda de sustratos, es decir con hidroponía, ya que no requiere utilizar el suelo y puede ser empleado casi en cualquier lugar (PROMUEVEHIDROPONIA, 2014).

La **Figura 18** describe los seis principales componentes esenciales del sistema PFAL (por sus siglas en inglés: Plant Factory with Artificial Lighting), que de acuerdo a lo explicado por Contreras Avilés (2020), son los siguientes:

- 1) Estructura térmicamente aislada con material insulado.
- 2) Acondicionadores de aire.
- 3) Sistema de soporte multinivel vertical (4-16 niveles) para camas de cultivos, acoplados a dispositivos de iluminación artificial (lámparas fluorescente o LED).
- 4) Unidad de suministro de dióxido de carbono.
- 5) Unidad de suministro de solución nutritiva.
- 6) Unidad de control de ambiente.

**Figura 18:** Componentes esenciales de un sistema de fábrica de plantas



**Fuente:** (Contreras Avilés, 2020)

“La estructuración en multicapas verticales permite maximizar el uso del espacio físico, permitiendo cultivar plantas con crecimiento no mayor a 30 cm de alto como lo son las hortalizas, trasplantes, y plantas medicinales” (Contreras Avilés, 2020).

“Está diseñado para cultivar plantas a bajo costo con mayor rendimiento y con un alto valor nutricional en el espacio exterior” (PROMUEVEHIDROPONIA, 2014).

Dicho espacio es completamente independiente del uso de suelo, ya que a través de la hidroponía se puede controlar de manera óptima el ambiente de la zona radical. Se asegura la mejor captación de nutrientes necesarios para promover el rápido crecimiento y desarrollo de la planta, mientras se hace uso eficiente y sostenible del agua, al ser recirculada (...). El aislamiento de la cámara de cultivo con el medio externo asegura el completo control y monitoreo de las condiciones ambientales internas y la prevención de contaminación química y biológica (Contreras Avilés, 2020).

La utilización de las lámparas LED que, además de permite manipular la distribución espectral de la luz emitida, también contribuyen con el ahorro energético.

Adicionalmente, la aplicación de luces LED contribuye en la reducción de los costos asociados a los gastos por electricidad y sistemas de enfriamiento, particularmente porque este tipo de luces convierten más eficientemente la energía eléctrica en lumínica y producen menos calor en comparación a otras fuentes de luz (Contreras Avilés, 2020).

Los sistemas como PFAL se destacan por la capacidad para controlar artificialmente el ambiente que rodea la zona aérea y radical de la planta. Además, con PFAL se puede optimizar la estabilidad y control de ambas zonas, al implementar sistemas de control inteligentes que aseguren el mejor consumo de recursos y la menor producción de contaminantes ambientales (Contreras Avilés, 2020).

### **Agricultura en ambientes controlados CEA**

La agricultura de ambiente controlado CEA (Controlled Environment Agriculture) se refiere a cualquier tipo de producción de cultivos en espacios cerrados. Incluye invernaderos, granjas de interior y cámaras de crecimiento.

De acuerdo con (Dantherm Group , 2023) es un método para crear entornos totalmente controlados para el cultivo de plantas. A veces, también se conoce como “agricultura vertical” o “agricultura en interiores”. Como su propio nombre indica, estas instalaciones están aisladas del entorno exterior. Todo lo que las plantas necesitan en sus diferentes etapas de crecimiento se suministra artificialmente, incluidos el agua, la temperatura, los niveles de humedad, la ventilación, la iluminación y el CO<sub>2</sub>.

Dentro de una instalación de CEA, verá cómo se produce con luces LED de cultivo con sistemas hidropónicos (o acuapónicos) que proporcionan agua y nutrientes. Los calentadores, ventiladores, deshumidificadores, sistemas de enriquecimiento con CO<sub>2</sub>, humidificadores y refrigeradores se utilizan para regular los climas de cultivo óptimos (Dantherm Group , 2023).

No es posible predecir la naturaleza, más sin embargo con condiciones óptimas y constantes, puede garantizar la tasa de crecimiento y la calidad de los productos.

## Variables de interés agroclimático

Una región agroclimática es una zona con características interrelacionadas entre el clima y los sistemas de cultivos. El entendimiento de estas interrelaciones ayuda a tomar mejores decisiones en el manejo agronómico de los cultivos (Martínez Fonseca, Tijerina Chávez, Arteaga Ramírez, Vázquez Peña, & Becerril-Román, 2007).

La agricultura protegida ofrece una buena oportunidad a los pequeños productores para reconvertir y diversificar sus sistemas de producción. (...) Por otra parte, no hay duda de que esta tecnología puede reducir de manera significativa la vulnerabilidad de los sistemas de producción a los impactos de eventos climáticos extremos (lluvias excesivas, sequías y heladas) (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 6).

La gestión de la información agroclimática es un proceso dinámico orientado al manejo adecuado de los datos, desde el registro, transmisión, almacenamiento, procesamiento, control de calidad, visualización y consulta (...). Su objetivo fundamental es facilitar el acceso a información de calidad para la toma de decisiones y permite a diferentes actores (agricultores, investigadores y tomadores de decisión entre otros), identificar y cuantificar los riesgos derivados de eventos de variabilidad climática extrema y cambio climático en la agricultura, cada vez más frecuentes e intensos. Los registros agroclimáticos se generan a través de estaciones agrometeorológicas, sensores e instrumentos para medición de parámetros eco-fisiológicos de cultivos, sensores remotos como satélites meteorológicos (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 7).

Para comprender el efecto del clima en el desarrollo y productividad de los cultivos se debe contar con información agroclimática, entendida como registros con referencia temporal y espacial de variables climáticas, agronómicas y fisiológicas cuyo manejo ordenado y adecuado facilita su interpretación y posterior uso en la modelación de cultivos (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 8).

A continuación en la **Tabla 1** se presentan algunas variables de importancia.

**Tabla 1:** Variables de interés agroclimático

<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Agroclimáticas:</b> Temperatura a 2m del suelo, Precipitación, Dirección y velocidad del viento, Radiación solar, Humedad Relativa, Temperatura del suelo a diferentes profundidades, Humedad del suelo, Humedad de las hojas, Radiación PAR (Fotosintéticamente Activa)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Agronómicas, asociadas a la fenología del cultivo:</b> Días a crecimiento vegetativo, a floración, a formación de fruto y a cosecha, Rendimiento por planta (g), número total de hojas, tallos, inflorescencia y/o fruto por planta, peso fresco de hojas, tallos, inflorescencia y/o fruto por planta, identificación y cuantificación de plagas, enfermedades y desordenes fisiológicos.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fisiológicas:</b> Variables de intercambio gaseoso, fotosíntesis (<math>\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}</math>), conductancia estomática (<math>\text{mmol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}</math>), transpiración (<math>\text{mmol H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}</math>), temperatura de la hoja (<math>^{\circ}\text{C}</math>), Grado de verdor: esta variable está asociada al contenido de clorofila y es medida con el equipo medidor spad, Potencial hídrico xilemático (kpa): esta variable es medida con la bomba de scholander (Scholander, 1965).</li> </ul>

**Fuente:** (Fernando Alzate, y otros, 2017)

El conocimiento de estas variables y su manejo ha hecho que países como Colombia, productor de hortalizas, se posicionen como líder en los mercados.

### Ecofisiología de los cultivos

Este término está directamente relacionado con las variables agroclimáticas.

Los sistemas hortícolas tradicionales en su mayoría son abiertos y altamente complejos y se ven afectados por factores como el clima, el suelo y el sistema de producción, así como por la interacción, entre estos factores.

Es importante establecer líneas de investigación en ecofisiología de hortalizas que permitan caracterizar las interacciones entre los factores de estrés ambiental y la respuesta fisiológica y agronómica de los cultivos, con los objetivos de: 1) reunir herramientas agronómicas que mejoren la fotosíntesis y la productividad (riego, nutrición mineral, manejo de la luz, diseño de infraestructuras, etc.); 2) identificar genotipos adaptados a condiciones de estrés abiótico, los cuales pueden ser utilizados en los programas de mejoramiento genético y 3)

zonificación de los cultivos hortícolas en la zona de estudio (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 9).

Es importante conocer las respuestas de los cultivos hortícolas a factores ambientales tales como temperatura, disponibilidad de agua, luz o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para determinar el efecto de condiciones ambientales sub-óptimas y gestionar el manejo de los cultivos.

Entre los factores que más influyen en los cultivos hortícolas, se tienen:

1. La luz solar no es sólo la fuente de energía para la fotosíntesis, sino también el factor más importante que afecta a la productividad en los cultivos hortícolas. La baja irradiancia, (...), influye directamente mediante la reducción de la utilización de energía fotónica, por lo tanto, una fuerte disminución de la fotosíntesis y de la productividad (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 10).
2. La temperatura “influye en la germinación de las semillas, el crecimiento vegetativo, floración, senescencia foliar, inhibición del enraizamiento, deterioro fisiológico (quemaduras en hojas, tallos y frutos)” (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 10).
3. La pérdida de agua es un proceso inevitable, considerando que las plantas utilizan la transpiración como mecanismo de enfriamiento. Por otra parte, la asimilación de CO<sub>2</sub> a través de los estomas da lugar a la pérdida de vapor de agua, por lo tanto, para mantener un adecuado ritmo de crecimiento, las plantas normalmente pierden gran cantidad de agua con respecto al peso ganado de CO<sub>2</sub> (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 10).

## **Evaluación agronómica**

De acuerdo con Fernando Alzate, y otros (2017) se debe realizar lo siguiente de forma general: con base al descriptor del BBCH para la fenología de los cultivos, se tomarán los días a crecimiento vegetativo, a floración, a formación de frutos y a cosecha. La evaluación de plagas y enfermedades se hará con base al porcentaje de incidencia y en los casos que se tenga la información, se construirá un índice de severidad. El rendimiento se reportará por planta y por metro cuadrado, a través del promedio de frutos, cabeza, pecíolo, tallo, hoja y raíz/planta, número total y % de frutos, cabeza, pecíolo, tallo, hoja y raíz por planta de primera, segunda y

tercera categoría, peso de frutos de primera, segunda y tercera categoría, etc (Fernando Alzate, y otros, 2017, pág. 14).

## **Variables fisiológicas**

Según Fernando Alzate, y otros (2017) “Es importante evaluar parámetros fisiológicos para poder encontrar explicación a las desviaciones agronómicas, causadas por el efecto de las infraestructuras entre las distintas hortalizas” (pág. 14).

## **Consumo de agua de un cultivo**

El consumo de agua del cultivo se define como la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración del cultivo. Conocer la necesidad de agua de un cultivo permite calcular la necesidad de riego (Kilimo, 2022) .

## **La evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>)**

Conforme a Hernández Castro (2018) la ET<sub>c</sub>, es el resultado de dos procesos que se presentan de forma individual, la evaporación y la transpiración, que actúan tanto sobre el sustrato como el cultivo, generando la extracción de agua de estos. Ambos procesos (evaporación y transpiración), están presentes a lo largo del ciclo de vida de la planta con una relación inversamente proporcional, donde en primera instancia la evapotranspiración cuarenta con la mayoría de sustracción de agua, conforme el cultivo se desarrolla pierde relevancia frente a la transpiración, convirtiéndose transpiración en el proceso más importante al final del ciclo.

Rodríguez Soto (2023) en su trabajo explica que para aumentar en un sistema hidropónico la Eficiencia en el Uso del Agua (EUA) es necesario reducir la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) sin generar pérdidas en el rendimiento, de acuerdo a esto se define la EUA como el volumen de agua que las plantas necesitan consumir (evapotranspirar) para incorporar a su biomasa una determinada cantidad de carbono provenientes de la atmosfera. En otras palabras, la planta más eficiente en el uso del agua es la que produce más materia.

## Espectro electromagnético de la radiación solar

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) explica en su publicación que “la radiación solar es la energía emitida por el Sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas” (IDEAM, 2023).

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe (IDEAM, 2023).

Medir la radiación solar es importante para un amplio rango de aplicaciones, (...) el monitoreo del crecimiento de plantas, la deshidratación de alimentos, implicaciones en la salud (ej. cáncer de piel o tratamientos curativos), el análisis de la evaporación e irrigación, su importante rol en los modelos de calidad del aire y de predicción del tiempo y el clima y muchas otras aplicaciones y usos que emplean la radiación solar como una de sus fuentes de energía (IDEAM, 2023).

Lira Oliver & Guevara Mon (2017) en su publicación señalan que el espectro solar en su modo ondulatorio está formado por ondas electromagnéticas. El 99% de la radiación emitida por el Sol está entre las longitudes de 150 a 4000 nm. La radiación visible o luz está en el intervalo de 380 a 830 nm .

La energía solar llega en forma de radiación electromagnética o luz. La radiación electromagnética, son ondas producidas por la oscilación o la aceleración de una carga eléctrica (IDEAM, 2023).

La atmósfera de la Tierra constituye un importante filtro que hace inobservables radiaciones de longitud de onda inferiores a 290 nm, por el fuerte efecto de absorción que tienen el hidrógeno y el oxígeno en la atmósfera (Lira Oliver & Guevara Mon, 2017, pág. 2).

La vibración de las moléculas se transforma en calor. Por eso la radiación solar en la región del infrarrojo es la que calienta (Lira Oliver & Guevara Mon, 2017, pág. 2).

La radiación es emitida sobre un espectro de longitud de ondas, con una cantidad específica de energía para cada longitud de onda. La longitud de onda de la luz es tan corta que suele

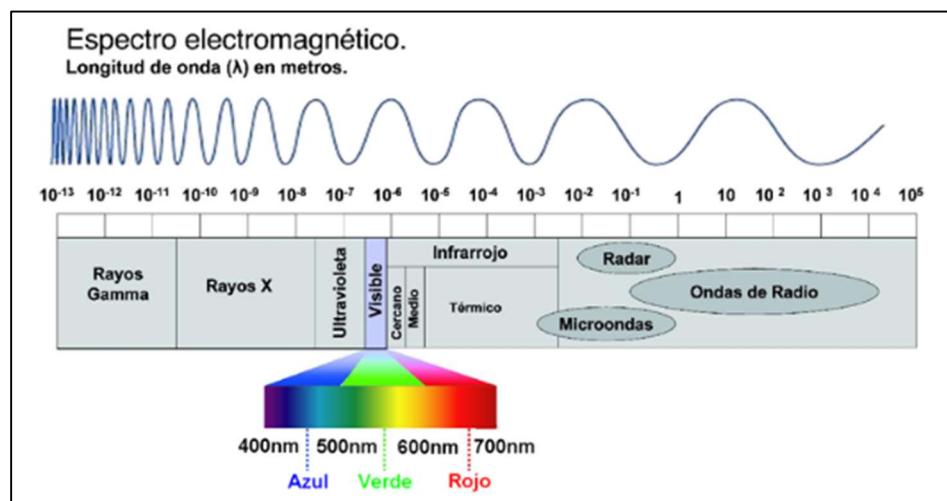
expresarse en nanómetros (nm), que equivalen a una milmillonésima de metro, o una millonésima de milímetro o en micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) que equivalen a una millonésima de metro (IDEAM, 2023).

La región del visible ocupa un intervalo muy pequeño del espectro electromagnético: de los 380 nm a los 830 nm. El ultravioleta (UV) está más o menos entre los 10 nm y los 380 nm. La radiación infrarroja (IR) va de los 830 nm a más de 400 000 nm. La radiación solar que recibimos en la Tierra abarca, en un 98%, de los 250 nm a los 2 500 nm. Por lo tanto, además del visible recibimos radiación ultravioleta e infrarroja (Lira Oliver & Guevara Mon, 2017).

La región visible (entre  $400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$ ) corresponde a la radiación que puede percibir la sensibilidad del ojo humano e incluye los colores: violeta (420 nm), azul (480 nm), verde (520 nm), amarillo (570 nm), naranja (600 nm) y rojo (700 nm). La luz de color violeta es más energética que la luz de color rojo, porque tiene una longitud de onda más pequeña. La radiación con las longitudes de onda más corta que la correspondiente a la luz de color violeta es denominada radiación ultravioleta (IDEAM, 2023).

En la **Figura 19** se puede observar la región visible dentro del espectro.

**Figura 19:** Espectro electromagnético de radiación solar



Fuente: (IDEAM, 2023)

## Influencia del espectro electromagnético de la radiación solar en la fotosíntesis

El Tecnológico de Costa Rica (TEC), señala que nuestro Sol permite la vida aquí en la Tierra gracias al calor que emite en forma de radiación electromagnética. Vemos gracias a la llamada “luz visible”, que es tan sólo una parte de esa radiación que el ojo puede ver (2023).

Según publicación del TEC (2023) las plantas y muchas bacterias con clorofila en su organismo son capaces de realizar la fotosíntesis, esto es, la síntesis de su propia materia (nuestra cosecha) a partir de la luz, agua, dióxido de carbono y sales minerales, lo que se considera un aprovechamiento de la radiación solar.

La radiación solar es la fuente de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas y el principal insumo de la bioproduktividad vegetal. La parte de la radiación solar que es útil para la fotosíntesis de las plantas, es designada como “radiación fotosintéticamente activa” o luz PAR (PROAIN, 2020).

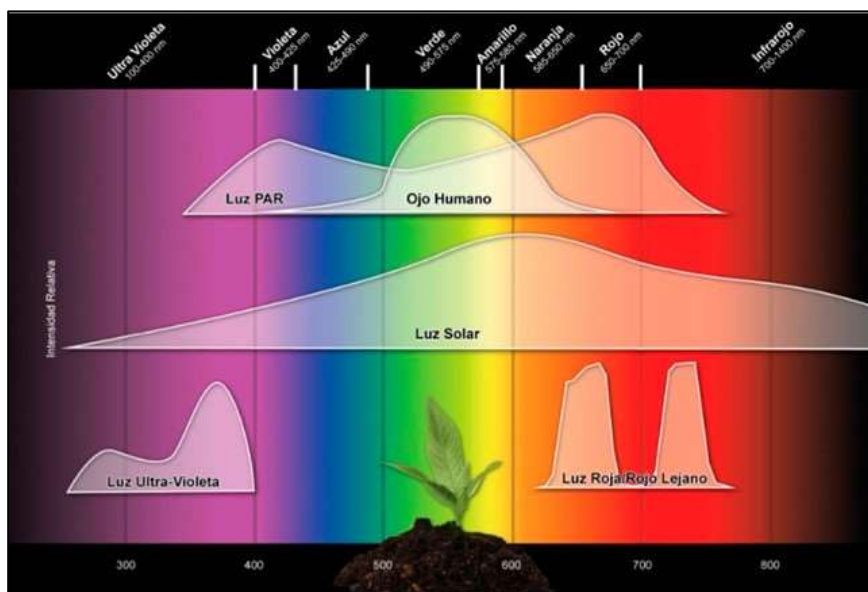
De acuerdo con PROAIN (2020), entre los principales determinantes de la producción están: la cantidad de energía luminosa interceptada por el cultivo y la eficiencia de la conversión de la luz interceptada en la materia seca.

El PAR puede subdividirse a su vez en las siguientes bandas: 400 a 510 nm (fuente de absorción de luz por la clorofila, con alto efecto morfogenético), de 510 a 610 nm (débil absorción de luz por la clorofila, sin efectos morfogenéticos) y de 610 a 700 nm (fuerte absorción de luz por la clorofila, grandes efectos morfogenéticos y ontogenéticos).

Como la absorción del PAR está regulada por los pigmentos del cloroplasto, los niveles máximos del espectro de absorción coinciden con los máximos de absorción de la clorofila y los carotenoides: clorofila y algunos pigmentos son receptores de la radiación para la fotosíntesis, mientras que los fitocromos regulan los procesos inducidos por la luz como la germinación, floración, caída de las hojas etc.

Los valores del PAR son importantes como parámetro de entrada de energía en diversos procesos biológicos y su evaluación temporal tiene particular interés en el seguimiento del crecimiento de cultivos. Debido a que las plantas realizan fotosíntesis y que el PAR es su fuente de energía, conocer la distribución espacial y temporal del mismo es fundamental para el análisis de los procesos biológicos asociados (PROAIN, 2020).

**Figura 20:** Radiación fotosintéticamente activa o luz PAR



**Fuente:** (PROAIN, 2020)

Las bajas intensidades luminosas y los cortos fotoperiodos, propios del periodo otoñal, pueden determinar en diferentes especies cultivadas en invernadero bajas tasas de crecimiento y en los casos más graves se puede llegar a fenómenos fisiopatológicos como el aborto de y abscisión de las yemas florales, escasa coagulación de los frutos, modesta pigmentación de las flores; de ahí la necesidad de integrar la radiación solar natural con la iluminación artificial (PROAIN, 2020).

La empresa de investigación y desarrollo de tecnología led en el ámbito de la horticultura Photosystem (2019) describe que las unidades de medida que tradicionalmente se utilizan en el sector de la iluminación dejan de ser útiles cuando se habla de iluminación para plantas. Las medidas tradicionales de iluminación, como lúmenes y luxes, miden la cantidad de flujo luminoso, y cuando se utilizan estas medidas se hace referencia confort visual del ser humano.

Los fotones son energéticos y la planta produce un trabajo químico con esa energía, las moléculas de glucosa. Pero no toda la energía recibida del sol o de una fuente de luz artificial puede ser aprovechada para realizar trabajo químico. Cada especie de plantas tiene su óptimo energético más allá del cual o por debajo del cual la planta no se desarrolla adecuadamente (...) (Photosystem, 2019).

Según Photosystem (2019) cuando se habla de luz y de plantas, lo que interesa es saber qué cantidad de fotones se va a suministrar para que la planta se halle en sus condiciones energéticas óptimas. Los botánicos han acordado que la medida sea el micromol de fotones.

Un mol de cualquier sustancia equivale a  $6.022 \times 10^{23}$  unidades de esa sustancia. Por ejemplo, un mol de átomos de oxígeno contiene esa cantidad de átomos de oxígeno, y de la misma forma, un mol de fotones contiene esa cantidad de fotones. Esta cantidad es conocida como el número de Avogadro en honor de Amadeo Avogadro, un químico y físico italiano nacido en el siglo XVIII (Photosystem, 2019).

Para la densidad, al ser una medida que viene dada por metro cuadrado y por segundo, la cantidad dependerá de la distancia a la que se coloque la fuente de luz de la planta y de los grados de apertura de la fuente de luz. En este sentido los micromoles de fotones se comportan como los luxes. Cuanto más cerca de la planta y menor sea el grado de apertura del cono de luz, la planta recibirá más micromoles de fotones por unidad de superficie iluminada. Por el contrario, iluminaremos menos espacio (Photosystem, 2019).

Las plantas pueden utilizar fotones que estén dentro del PAR (acrónimo inglés para Photosynthetically Active Radiation / Radiación fotosintética activa) y comprende la región del espectro electromagnético que va de los 400 a los 700 nanómetros de longitud de onda aproximadamente (Photosystem, 2019).

Por último, Photosystem (2019) deja claro en su publicación que, si la unidad de medida de la luz para las plantas es el micromol de fotones en un segundo por metro cuadrado, el valor que esta unidad mide es el PPF (acrónimo inglés para Photosynthetically Photon Flux Density / Densidad de flujo de fotones fotosintéticos). Así, cuando se indica que una planta necesita un PPF de  $140 \mu\text{moles s}^{-1} \text{ m}^2$ , lo que verdaderamente se indica es que el valor adecuado de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos para esa planta es de 140 micromoles de fotones por segundo y metro cuadrado.

### **Cantidad de luz que incide en una superficie**

La revista ILUMINET (2018) indica que es necesario contemplar tres conceptos para la interpretación y explicación del fenómeno ocurrido cuando algún flujo de luz incide sobre una superficie, ellos son: iluminancia, lumen (lm) y lux (lx). Se define iluminancia como como el flujo

luminoso que incide en un área determinada; en otras palabras, ¿cuánta luz llega desde una fuente lumínica hasta alguna superficie?.

Para saber la respuesta es posible imaginar un proceso de iluminación en el que una fuente lumínica emite cierta cantidad de luz; según el Sistema Internacional de Medidas, el flujo de iluminación expedida puede medirse a partir de lúmenes (lm). Entre más alto sea el número de lm, mayor intensidad de iluminación brindará la fuente.

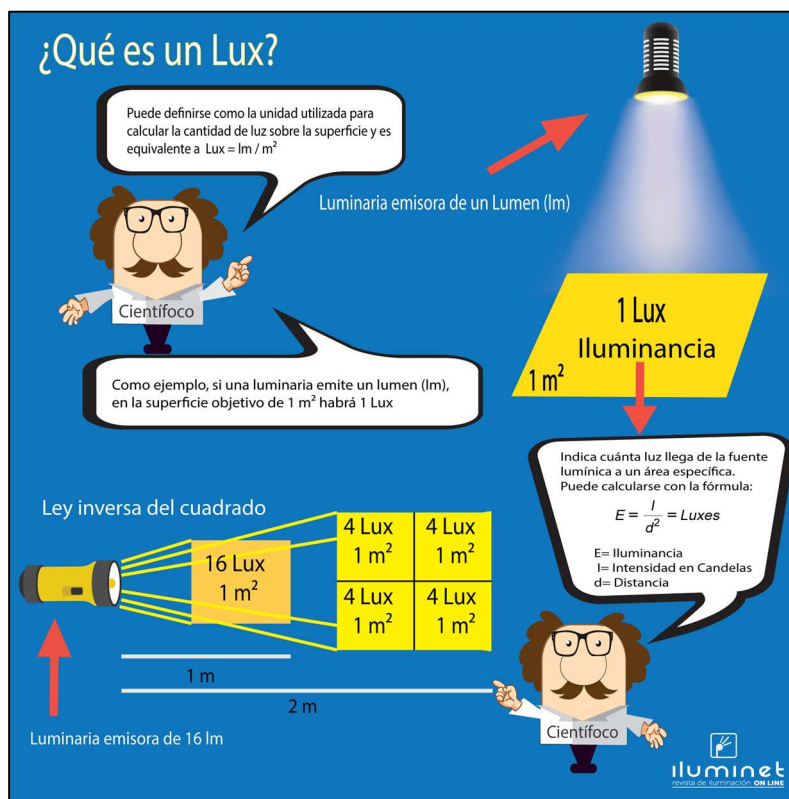
Cuando la luz emitida llega a un área específica, surge el término lux (lx), unidad de medida que equivale a un lumen /m<sup>2</sup> y con la que es posible calcular cuánta iluminación y con qué intensidad incide en alguna zona. Sin embargo, para lograr evaluar la cantidad de luz es necesario tomar en cuenta también aspectos como las dimensiones del espacio, altura de la luminaria y su distancia con la superficie objetivo, además de los datos fotométricos de las lámparas y la cantidad de las mismas.

Cabe señalar que si la fuente de luz está cerca del área objetivo, habrá más luxes en ella, pero si es lejana habrá menos. Por ejemplo: Una luminaria emite dos mil lúmenes que llegan a una superficie de un metro cuadrado, de esta manera serán dos mil luxes que iluminan esa área, lo que representa mucha luz. En contraste, si se emplea la misma cantidad de luz en una zona de 20 metros cuadrados, la iluminancia de ese lugar es de únicamente 200 luxes, es decir, menos luz.

Para lograr un equilibrio lumínico existen caminos, técnicas y softwares para calcularlo. Además se deben contemplar aspectos estéticos y funcionales de acuerdo al uso de cada área a iluminar (ILUMINET, 2018).

En conclusión, iluminancia es igual al flujo luminoso que se mide en lúmenes (lm) y lux (lx) sirve para el calcular cuanta iluminación y con que intensidad incide en unza zona, como se aprecia en la **Figura 21**.

**Figura 21:** Medición de la cantidad de luz que incide en una superficie



**Fuente:** (ILUMINET, 2018)

## Eficiencia luminosa

Para una fuente de luz (lámpara), definimos la eficacia luminosa como la relación entre el flujo luminoso y la potencia eléctrica requerida para generarla. Por lo tanto, este parámetro nos permite calcular cómo de eficiente es una lámpara transformando electricidad en energía útil para iluminar (Naturgy, 2018).

“Eficiencia luminosa (lm/w) es el cociente entre el flujo luminoso producido y la potencia eléctrica consumida” (Medium, 2019).

Naturgy (2018) en su publicación explica que la unidad utilizada para medir el flujo luminoso es el lumen (lm), y como la potencia eléctrica se mide en Watts (W), se puede concluir que la eficacia luminosa se mide en lúmenes/W, como lo expresa la **Ecuación 1**. A medida que aumente la eficacia luminosa, se requerirá menor cantidad de energía para producir la misma cantidad de luz y por lo tanto su consumo energético será menor.

### **Ecuación 1:** Eficiencia de iluminación

$$\text{Eficiencia}(lm/W) = \text{Flujo luminoso}(lm)/\text{Potencia consumida}(W)$$

**Fuente:** (Medium, 2019)

La energía que se pierde al transformar el electricidad en luz, se transforma en calor. Por lo tanto, a mayor eficiencia luminosa, menos energía se pierde en forma de calor y más luminosidad se gana (Medium, 2019).

### **Uso de luminarias LED en cultivos**

Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso (2016) apuntan que la última década del siglo XX y comienzos del XXI se ha convertido en una época de intensos estudios sobre los efectos de la fotosíntesis en las plantas agrícolas, mediante la utilización de fuentes artificiales de manera parcial o total. Estudios realizados se han basado en varios fenómenos, tales como la influencia declarada del espectro y la intensidad de irradiación de la luz en el crecimiento de la masa de la planta o el rendimiento de longitud de onda ( $\lambda$ ).

En la actualidad la tecnología de los dispositivos LED ha avanzado rápidamente en diferentes campos de las ciencias aplicadas, ya que permiten la producción de luz brillante y de larga duración. Para los cultivos en interiores emiten solo las longitudes de onda de luz correspondientes a valores propios y cercanos a los picos de absorción de los procesos fotoquímicos típicos de una planta que están entre 400 y 500 nanómetros (nm) y entre 600 y 700 nm, longitudes de onda que estimulan la germinación, crecimiento vegetativo, desarrollo y floración de las plantas por medio de sus pigmentos fotosensitivos.

La utilización de fuentes artificiales tales como: bombillas metal halide, bombillas incandescentes, bombillas de vapor de mercurio, bombillas fluorescentes y bombillas de alta presión de sodio, HPS (High Pressure Sodium) para acelerar el proceso de fotosíntesis y el desarrollo de las plantas en granjas verticales, ha venido a solucionar problemas de producción en lugares y épocas donde la oscuridad prevalece más que la luminosidad, entre otros problemas, explica Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso (2016).

“La luz proveniente de diodos emisores de luz o LED por sus siglas en inglés (light emitting diode) en las PFAL son la fuente de energía que utilizan las plantas para fotosintetizar” (Rojas Montero, 2023, pág. 13).

La aplicación de luces LED contribuye en la reducción de los costos asociados a los gastos por electricidad y sistemas de enfriamiento, particularmente porque este tipo de luces convierten más eficientemente la energía eléctrica en lumínica y producen menos calor en comparación a otras fuentes de luz. El sistema de luces LED también permite manipular la distribución espectral de la luz emitida, estímulo artificial crítico para la activación de la fotosíntesis, control de expresión de genes, fotomorfogénesis y síntesis de fitoquímicos funcionales en el tejido vegetal (Contreras Avilés, 2020).

“Por lo tanto, aunque los dispositivos LED tienen un gran número de ventajas, su principal desventaja radica en el alto costo de su adquisición y final implementación” (Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso, 2016, pág. 114)

Ya que el desarrollo de las plantas se ve afectado por la calidad y ciclo de la luz, los LED constituyen una oportunidad para controlar parcialmente la morfogénesis y la producción de metabolitos secundarios [30] debido a la amplia gama de colores, configuraciones geométricas, poca emisión de calor y eficiencia energética (Rojas Montero, 2023, pág. 15).

De acuerdo con Rojas Montero S. J. (2023), debido a la versatilidad y control sobre las longitudes de onda que producen los LED es necesario considerar ciertos aspectos para su uso eficiente como fuente de luz en las PFAL. Uno de estos parámetros es la densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos, conocido como PPF<sub>D</sub> por sus siglas en inglés (photosynthetic photon flux density), el cual es medido en  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  y está asociado a la longitud de onda de la luz, intensidad y distribución espacial. El segundo aspecto es la calidad de la luz que está asociada a su espectro lumínico (longitudes de onda). Finalmente, se debe considerar el fotoperiodo, que consiste en los ciclos de luz y oscuridad que se van a emplear. Este parámetro se asocia a la integral de luz diaria o DLI por sus siglas en inglés (daily light integral) que matemáticamente corresponde al PPF<sub>D</sub> multiplicado por el fotoperiodo. El conjunto de estos parámetros se conoce como receta lumínica y debe ser seleccionada según el tipo de cultivo, distribución de espacio, energía disponible y costo (Rojas Montero, 2023, pág. 15).

De acuerdo con Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso (2016), la energía que es suministrada por cada fotón desde un sistema de iluminación artificial LED particular a las plantas es de:

- Longitud de onda – Color Azul 458:  $434,279 \times 10^{-21}$  J
- Longitud de onda – Color Rojo 656:  $303,201 \times 10^{-21}$  J

Lo que indica que el dispositivo LED de 458 nm (color azul), es mucho más energético que el de 656 nm (color rojo). Por este y otros motivos, las fuentes de iluminación LED para cultivos en interiores implementan menos dispositivos de este tipo en sus sistemas.

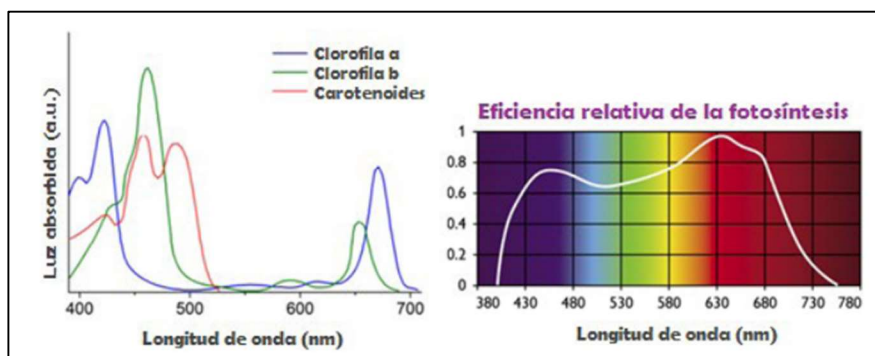
### **Calidad de luz**

“Se refiere a la distribución espectral de la radiación, donde la porción de emisión está en azul, verde, rojo, y otra región visible e invisible de longitud de onda. Para la fotosíntesis, las plantas responden más fuerte a la luz roja y azul” (Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso, 2016, pág. 114).

Entre 400 y 520 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz violeta, azul y verde. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis (Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso, 2016, pág. 114).

Entre 610 y 720 nm, rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz roja. Tiene una fuerte influencia sobre el crecimiento vegetativo, la fotosíntesis, la floración y la germinación (Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso, 2016, pág. 114).

El rango de longitud de onda correspondiente al espectro visible, comprendido por luz verde, amarilla y naranja. Tiene una poca influencia sobre el crecimiento vegetativo y la fotosíntesis.

**Figura 22:** Espectro visible de onda y colores

**Fuente:** (Ramos Gonzalías & Ramírez Lasso, 2016)

## Control de la temperatura

De acuerdo con Anaya Solano & Ojeda Field (2020) “La temperatura es un elemento esencial en el cultivo y desarrollo de las plantas, afecta a la planta tanto a corto como a largo plazo” (pág. 28).

Además de afectar a los niveles de humedad relativa dentro de una instalación, se necesitan unidades de calefacción y ventilación para mantener unas condiciones constantes durante los meses más cálidos o más fríos y compensar el calor generado por la iluminación (Dantherm Group , 2023).

La variación de la temperatura se encuentra estrechamente relacionada con la humedad; Cuando la temperatura sube, el aire es capaz de absorber una mayor cantidad de humedad. Es por ello que un control sobre la temperatura tanto en exceso como en defecto, implica un control de la humedad (López Molina, 2005).

El cultivo hidropónico tiene numerosas ventajas. Ayuda a optimizar el crecimiento, lo que genera mayores rendimientos y una mayor calidad y reduce el uso de la tierra, lo que permite ahorrar drásticamente en agua.

Sin embargo, el agua proporciona un amortiguador mucho menor que el suelo, pues es más sensible a los cambios en el medio ambiente, como la temperatura; las raíces quedan más expuestas y las plantas son más sensibles.

Cualquier cambio en el medio ambiente tendrá un impacto más rápido cuando se trata de sistemas hidropónicos. Por ejemplo, si las temperaturas bajan repentinamente, afectará a las

plantas mucho más rápido en una configuración hidropónica que en una configuración tradicional basada en el suelo.

Por lo tanto, la necesidad de sistemas de control climático es mayor que la del cultivo tradicional de invernadero (DryGair Energies LTD, 2023) .

La mayoría de los invernaderos y salas de cultivo interior usan controladores de temperatura de una forma u otra para calentar o enfriar el espacio.

Cada planta tiene su rango de temperatura ideal. Por lo tanto, la mayoría de los productores utilizan sistemas de calefacción o refrigeración, como HVAC , bombas de calor, almohadillas húmedas o aire acondicionado.

La diferencia más crítica entre el control de temperatura tradicional e hidropónico es la necesidad de consistencia y confiabilidad (DryGair Energies LTD, 2023).

Un sistema HVAC (heating, ventilation and air conditioning) es un sistema de climatización y ventilación; como sistema de climatización, actúa como calefacción en invierno y como refrigeración en verano.

## Ventilación

Soler & Palau Ventilation Group (2024) en su publicación indica que la ventilación en un invernadero consiste en sustituir el aire caliente interior por otra masa de aire más frío procedente del exterior. Así puede evacuarse gran parte de la sobrecarga de calor, al rebajar la temperatura y, a la vez, modificar la humedad y la concentración de gases

“Dos son los sistemas de ventilación que pueden adoptarse: Ventilación Natural y Ventilación Mecánica” (Soler & Palau Ventilation Group, 2024).

La ventilación mecánica, según Soler & Palau Ventilation Group (2024), consiste en renovar el aire con la instalación de ventiladores electromecánicos colocados en la cubierta o bien en la parte alta de un lateral de la nave, dependiendo de su anchura. Las entradas de aire exterior se disponen por la parte baja de la pared opuesta a la de los ventiladores o por ambas si la descarga es central.

Además, la compañía Soler & Palau Ventilation Group (2024) recomienda que en las entradas de aire se protegerán, hacia el exterior con rejillas antipájaros o roedores. Hacia el interior

se dispondrán deflectores en caso que el aire exterior entrante incida directamente sobre las plantas próximas.

“La conexión eléctrica de los ventiladores se hará a través de reguladores de velocidad que permitirán obtener regímenes de ventilación distintos de acuerdo a las necesidades” (Soler & Palau Ventilation Group, 2024).

## **Climatización por control de humedad**

La publicación realizada por el sitio Vanesa Ezquerro (2020) indica que un aspecto fundamental para lograr la climatización y controlar la humedad en los espacios es el aislamiento térmico de la edificación.

Asimismo, el tratamiento del aire debe realizarse de una manera lo suficientemente efectiva. Considerando dos alternativas que suelen implementarse:

- Un Deshumidificador. Es una solución que permite eliminar el exceso de humedad y favorece que esta se condense en su interior y no en los espacios de la vivienda.
- Un Recuperador de Calor Entálpico. Se trata de un equipo de ventilación con recuperador de calor, que permite regular tanto el exceso como la escasez de humedad. Además, controla la calidad del aire, el grado de humedad y, en el caso de los equipos compacto, también garantiza una óptima climatización y un máximo confort.

Como se puede observar, la primera es una alternativa limitada, útil para algunos casos, pero que no elimina el problema de fondo. En cambio, el sistema pasivo ofrece una solución completa e integral para la climatización, donde la humedad está realmente bajo control.

## **Cálculo de carga térmica**

El cálculo de una carga térmica para un espacio determinado requiere la realización de un balance de energía para el calor convectivo, conductivo y por radiación, para cada superficie del espacio, así como para el calor convectivo del aire dentro de la habitación. Este cálculo requiere de una gran cantidad de ecuaciones para describir el balance de energía (Flores Quirós, 2017, pág. 11).

Para ayudar a esta tarea, la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Aire Acondicionado y refrigeración (ASHRAE) ha establecido tres metodologías que se describen a continuación:

“En este capítulo se exponen tres métodos de cálculo de carga de enfriamiento para aplicaciones no residenciales” (Henríquez Granados , Orellana Mejía, & Rosa Chávez , 2016, pág. 67).

- **TETD**, método de temperatura diferencial total equivalente: este es de poco uso en la actualidad, Se basa en la selección de conjunto de paredes y techos representativos en la construcción por analizar y se obtiene un promedio de la carga térmica total instantánea. Tiene como inconveniente que utiliza varios parámetros en los cuales el diseño debe aplicar criterios no objetivos (Flores Quirós, 2017, pág. 11).

La debilidad fundamental es que el promedio simple de los componentes de la carga radiante es una mala aproximación de la física real implicada y, debido a la elección de un periodo promedio adecuado, es subjetivo y depende de la experiencia del usuario (Henríquez Granados , Orellana Mejía, & Rosa Chávez , 2016, pág. 68).

- **TFM**, método de función de transferencia: este se utiliza en programas de cómputo, debido a que su uso implica una gran cantidad de cálculos complejos. Es similar al método anterior, pero difiere en que este utiliza una serie de funciones de transferencia, que definen valores multiplicadores para cada diferencia de temperatura; este método toma en cuenta las diferencias de temperatura que se dan a través del tiempo (Flores Quirós, 2017, pág. 11).

Los informes bibliográficos de diversos trabajos experimentales, evidencian que se ha validado la exactitud predictiva del TFM, y que es científicamente adecuado para el cálculo de la carga de enfriamiento. Técnicamente se empleará para un análisis de carga de enfriamiento específica, en el cual se supondrá que la carga para varios períodos de 24 horas inmediatamente anteriores, será la misma que para la hora de carga de interés. Además, se requiere un ordenador para su aplicación eficaz en un entorno de diseño comercial (Henríquez Granados , Orellana Mejía, & Rosa Chávez , 2016, págs. 68-70).

- **CLTD/CLF /SCL**, método de diferencial de temperatura para enfriamiento: este método surgió con base en investigaciones sobre los dos métodos anteriores. Los resultados se utilizaron para definir un diferencial de temperatura que debe añadirse al existente dentro del espacio analizado, para compensar factores tales como radiación solar y almacenamiento de calor dentro del espacio interno (Flores Quirós, 2017, pág. 11).

Para calcular la carga de enfriamiento en un recinto, es necesario la información detallada del diseño del edificio y los datos del tiempo en condiciones de diseño seleccionados. De acuerdo con Henríquez Granados , Orellana Mejía, & Rosa Chávez (2016), se debe levantar una recopilación de datos como: características de construcción, configuración, condiciones de diseño al aire libre, condiciones de diseño del interior, horarios de funcionamiento, fecha y hora.

ASHRAE establece que “para un método de cálculo de carga térmica manual, refiérase al método CLTD/CLF en el capítulo 28 del Manual ASHRAE – Fundamentals de 1997” (ASHRAE , 2005, pág. 18.21).

### **Método CLTD/CLF para cálculo de carga térmica**

El método CLTD/CLF se encuentra explicado en el Manual de Fundamentos de ASHRAE en el capítulo 28 (ASHRAE, 1997). Consiste en ecuaciones cuyo objetivo es determinar la carga térmica que se tiene en un espacio, generada tanto por el calor proveniente del exterior como del interior.

Flores Quirós (2017), presenta un formulario preparado para ingresar los datos asociados a un determinado recinto, según el método CLTD/CLF (Ver **Anexo H**).

### **Cálculo de cargas externas**

#### **Cargas conductivas**

Esta carga toma en cuenta el flujo de calor que cruza las paredes, los techos y la conducción a través de las ventanas: El método CLTD toma como referencia una temperatura

de diseño interna de 25°C, por lo que, para valores diferentes de temperatura, se debe utilizar un factor de corrección (Flores Quirós, 2017, pág. 14). La ecuación que la es:

**Ecuación 2:** Cálculo de cargas externas

$$q = U A (CLTD)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

q = flujo de calor.

U = coeficiente de calor para paredes, techos, según tabla 24 del Capítulo 24, y para vidrios, según tabla 5 del Capítulo 29 del Manual de ASHRAE (ASHRAE, 1997).

A = área del techo, pared o ventana.

CLTD = diferencia de temperatura de carga térmica para enfriamiento, según las tablas 30 o 32 del Capítulo 28 del Manual de ASHRAE (ASHRAE, 1997). Este factor consta de la diferencia de temperatura entre el aire externo e interno y un factor de corrección.

“Cabe mencionar que el valor del flujo de calor debe calcularse para cada uno de los espacios por acondicionar” (Flores Quirós, 2017, pág. 14).

### Carga solar por radiación a través de ventanas

Las ventanas permiten el paso de la luz solar y de la radiación solar asociada. De acuerdo con Flores Quirós (2017), la ecuación anterior no toma en cuenta esta radiación de calor, por lo que es necesario definir una ecuación, para esos efectos.

La ecuación utilizada para el cálculo del calor por radiación es:

**Ecuación 3:** Carga solar por radiación a través de ventanas

$$q = A (SC)(SCL)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

q = flujo de calor.

A = área de la ventana considerada.

SC = coeficiente de sombra, según Capítulo 29 (ASHRAE, 1997). Este factor toma en cuenta la existencia o no de dispositivos para producir sombra (persianas, cortinas, etc.).

SCL = factor de carga solar para enfriamiento sin sombra, según tabla 36 del Capítulo 28 del manual anteriormente indicado.

### Carga a través de particiones, áticos y el piso

Flores Quirós (2017) explica que una partición es un espacio no acondicionado, que se encuentra adyacente a una habitación acondicionada. Existe un diferencial de temperatura entre los espacios, que crea un flujo de calor no deseado hacia el área por enfriar; con condiciones de este tipo se utiliza la siguiente ecuación:

**Ecuación 4:** Carga a través de particiones, áticos y el piso

$$q = UA (t_b - t_{rc})$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

q = flujo de calor.

U = coeficiente de calor para una partición o área de ático o del piso, según tabla 4 del Capítulo 24, del Manual de ASHRAE (ASHRAE, 1997).

A = área de la pared adyacente a la partición o área del ático o del piso, según el caso presente:

$t_b$  = temperatura en el espacio adyacente.

$t_{rc}$  = temperatura de diseño dentro del espacio acondicionado.

### Carga térmica interna para enfriamiento

“Dentro del espacio existen fuentes de calor, las cuales deben considerarse a la hora de calcularla carga térmica” (Flores Quirós, 2017, pág. 17).

ASHRAE define varias ecuaciones, con las que se calcula la carga interna del recinto, además de otras fuentes de material bibliográfico, dependiendo de la naturaleza de la fuente de calor (Flores Quirós, 2017, pág. 17).

- **Personas**

Flores Quirós (2017) indica que las personas son una fuente de calor interna que aumenta el calor sensible dentro de una habitación, además generan vapor de agua en sus procesos biológicos, el que luego es expulsado por la respiración y el sudor. Este vapor expulsado debe ser enfriado y condensado por el proceso de acondicionamiento de aire.

El calor sensible total producido por una persona no es convertido directamente en una carga de enfriamiento. Esto debido a que hay una parte del calor el cual es irradiado hacia los alrededores, para después ser liberado en forma conectiva.

Las ecuaciones para cuantificar la carga térmica generada por personas son:

**Ecuación 5:** Carga térmica sensible generada

$$q_{sensible} = N(\text{factor de calor sensible})(CLF)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

**Ecuación 6:** Carga térmica latente generada por personas

$$q_{latente} = N(\text{factor de calor latente})$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

N = número de personas dentro del espacio.

Factor de calor sensible y latente = estos factores representan la cantidad de calor promedio que genera una persona, según la actividad que está realizando, según la tabla 3 del Capítulo 28.

CLF = factor de carga para enfriamiento, por hora de ocupación, según la tabla 37 del Capítulo 8 (ASHRAE, 1997)

- **Luces, motores y otros artefactos**

Los bombillos, tubos fluorescentes y otros dispositivos que se utilizan para suministrar luz generan calor dentro del espacio (Flores Quirós, 2017) .

La siguiente ecuación es dada por ASHRAE para calcular esta carga térmica:

**Ecuación 7:** Carga térmica generada por iluminación

$$q_{ul} = W F_{ul} F_{sa} (CLF)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

$q_{ul}$  = Calor generado por iluminación.

$F_{ul}$  = factor de uso de la iluminación, según sea el apropiado.

$F_{sa}$  = factor de tolerancia, según sea el apropiado.

CLF = factor de carga para enfriamiento, según tiempo de utilización de la iluminación.

Para el caso de motores, el cálculo de calor se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

**Ecuación 8:** Cálculo de carga térmica para motores

$$q_p = P_{EF} CLF$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

$q_p$  = Calor generado por el motor.

$P_{EF}$  = Potencia consumida según la tabla del fabricante.

CLF = Factor de uso.

El calor generado por los demás artefactos eléctricos, tales como electrodomésticos, hornos u otros, se puede calcular según las ecuaciones:

**Ecuación 9:** Calor generado por artefactos eléctricos

$$q_{sensible} = q_{entrada} F_U F_R (CLF)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

**Ecuación 10:** Calor generado por artefactos eléctricos

$$q_{latente} = q_{entrada} F_L (CLF)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

$q_{sensible}$ ,  $q_{latente}$  = calor sensible y calor latente generado por el artefacto, según tablas 5 a la 9 del Capítulo 28.

$F_U$ ,  $F_R$ ,  $F_L$  = factor de utilización, de radiación y de carga.

## Ventilación e infiltración de aire

Dentro de un espacio acondicionado, es necesario reemplazar la masa de aire existente en forma constante, para evitar la acumulación de olores o gases tóxicos, así como mantener los niveles de oxígeno normales para la respiración humana. Por esta razón en los sistemas de aire acondicionado se debe introducir una cierta cantidad de aire desde el exterior del recinto (...). El calor necesario para enfriar esta masa de aire debe ser considerada en el cálculo de la carga térmica total (Flores Quirós, 2017, pág. 20).

Las ecuaciones utilizadas, según el método CLTD son:

**Ecuación 11:** Cálculo de calor sensible que debe removerse del aire

$$q_{sensible} = 1,23Q(t_o - t_i)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

**Ecuación 12:** Cálculo de calor latente que debe removerse del aire

$$q_{latente} = 3010Q(W_o - W_i)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

**Ecuación 13:** Cálculo de calor total que debe removerse del aire

$$q_{total} = 1,20Q(h_o - h_i)$$

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

Donde:

q = calor sensible, latente o total que debe removerse del aire exterior.

Q = caudal del aire de ventilación en litros por segundo.

t<sub>o</sub>, t<sub>i</sub> = temperatura exterior e interior del aire.

w<sub>o</sub>, w<sub>i</sub> = relación de humedad exterior e interior en kilogramos de agua por kilogramos de aire seco.

H<sub>o</sub>, H<sub>i</sub> = entalpia exterior e interior en kJ/kg de aire seco.

## Fotosíntesis

La fotosíntesis es un proceso de reducción que consiste en transformar el dióxido de carbono y agua en carbohidratos y oxígeno, al utilizar la luz como energía para el desarrollo de reacciones fotoquímicas, (...). Esto ocurre en los cloroplastos, que son organelas únicas de doble membrana con tamaño variable. La membrana interna conforma sacos denominados tilacoides donde se alojan los pigmentos, fotosistemas, cadena de transporte de electrones y enzimas que realizan las reacciones fotoquímicas (Rojas Montero, 2023, pág. 13).

La fotosíntesis generalmente se representa con la **Ecuación 14**.

**Ecuación 14:** Proceso de fotosíntesis

**Fuente:** (Rojas Montero, 2023)

### Importancia del CO<sub>2</sub> en cultivos controlados

“Otro parámetro climático que los productores deben considerar en cualquier forma de agricultura en un ambiente controlado son las concentraciones de CO<sub>2</sub>” (DryGair Energies LTD, 2023).

Antón y otros (2011) en su publicación explican sobre el CO<sub>2</sub> que actualmente es conocido por su efecto como gas invernadero, que contribuye al calentamiento de la atmósfera y al cambio climático; por ello, está rodeado de un aura negativa. Pero mucho más importante que su efecto como gas invernadero en la atmósfera y su posible contribución al cambio climático es que se trata de uno de las dos materias primas, junto con el agua, a partir de las cuales las plantas fabrican, en la fotosíntesis, su propia materia, de la cual dependen la mayoría de los seres vivos, bien como alimento primario, bien como alimento de su alimento: la vida se basa en el carbono y el CO<sub>2</sub> es la fuente de este carbono.

En ese contexto es fácil comprender que la exposición de las plantas a ambientes con una elevada concentración de dióxido de carbono durante cortos períodos de tiempo, generalmente estimula el crecimiento y la fijación fotosintética de carbono (Antón, y otros, 2011, pág. 6). Por lo tanto, para tener un aumento en el rendimiento final de la cosecha, cada vez más cultivadores añaden CO<sub>2</sub> en sus cultivos.

### Gases de efecto invernadero

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA): “A los gases que atrapan el calor en la atmósfera se les llama gases de efecto invernadero” (EPA, 2023).

La atmósfera contiene una variedad de gases cuya concentración varía desde niveles apenas detectables hasta el 78% de la masa, representado por el nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>). Algunos de los componentes han mantenido su concentración constante durante milenios, como

el oxígeno ( $O_2$ ), el hidrógeno ( $H_2$ ) o los gases nobles argón, neón etc.; otros, sin embargo, cambian en menos de una generación, como el vapor de agua, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano, óxidos de nitrógeno (...) El caso más público es el de los gases con efecto invernadero y, entre ellos, el  $CO_2$ , producto de la respiración y de los procesos de combustión espontánea o industrial. Su concentración en la atmósfera ha ido aumentando desde las 280 ppm (partes por millón, es decir, 0.028%) de mediados del siglo XIX, hasta las casi 370 actuales (Antón, y otros, 2011, pág. 5) .

Los gases de efecto invernadero son:

**Dióxido de carbono ( $CO_2$ ):** El dióxido de carbono ingresa a la atmósfera a través de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos, árboles y otros materiales biológicos (EPA, 2023).

**Metano ( $CH_4$ ):** El metano se emite durante la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo. También se generan emisiones de metano en prácticas ganaderas y otras prácticas agrícolas y a raíz de la descomposición de residuos orgánicos en rellenos sanitarios municipales para residuos sólidos.

**Óxido nitroso ( $N_2O$ ):** El óxido nitroso se emite durante actividades agrícolas e industriales, en la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos y también durante el tratamiento de aguas residuales.

**Gases fluorados:** Los hidrofluorocarbonos, los perfluorocarbonos, el hexafluoruro de azufre y el tricloruro de nitrógeno son gases de efecto invernadero sintéticos y potentes que se emiten en diversos procesos industriales (EPA, 2023).

## Huella de carbono

De acuerdo con Tecnología Organizativa (AEQ) La huella de carbono es el indicador que mide la cantidad de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), que produce de forma directa o indirecta el ser humano, las organizaciones y las empresas. Se mide en toneladas de  $CO_2$  emitidas y se calcula multiplicando los datos de las actividades (cantidad) por factores de emisión (AEQ, 2022).

De acuerdo con la publicación del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023), se entiende como huella de carbono “la totalidad de gases de efecto

invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto".

- Huella de carbono de una organización. Mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto provenientes del desarrollo de la actividad de dicha organización.
- Huella de carbono de producto. Mide los GEI emitidos durante todo el ciclo de vida de un producto: desde la extracción de las materias primas, al pasar por el procesado y fabricación y distribución, hasta la etapa de uso y final de la vida útil (depósito, reutilización o reciclado) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023, pág. 1).

La huella de carbono identifica la cantidad de emisiones de GEI que son liberadas a la atmósfera como consecuencia del desarrollo de cualquier actividad; permite identificar todas las fuentes de emisiones de GEI y establecer, a partir de este conocimiento, medidas de reducción efectivas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023, pág. 1).

### Cálculo de la huella de carbono

De acuerdo con el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023), en una primera aproximación puede decirse que el cálculo de la huella de carbono consiste en aplicar la **Ecuación 15**, como se muestra a continuación:

**Ecuación 15:** Cálculo de la huella de carbono

$$\text{Huella de Carbono} = \text{Dato actividad} \times \text{Factor de emisión}$$

**Fuente:** (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

Donde:

**El dato de actividad**, es el parámetro que define el grado o nivel de la actividad generadora de las emisiones de GEI. Por ejemplo, cantidad de gas natural utilizado en la calefacción ( $\text{kWh}_{\text{PCS}}$  de gas natural).

**El factor de emisión (FE)** supone la cantidad de GEI emitidos por cada unidad del parámetro “dato de actividad”. Estos factores varían en función de la actividad que se trate. Por ejemplo, en relación con la actividad descrita anteriormente (consumo de gas natural para la calefacción), el factor de emisión para 2022 sería  $0,183 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} / \text{kWh}_{\text{PCS}}$  de gas natural.

Como resultado de esta fórmula obtendremos una cantidad (g, kg, t, etc.) determinada de dióxido de carbono equivalente ( $\text{CO}_2 \text{ eq}$ ) (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023, pág. 3).

**Figura 23:** Cálculo de huella de carbono para una actividad

<b>EJEMPLO</b>	Para un medio de transporte cualquiera:
	$\text{Emisiones} = \text{Combustible consumido} \times \text{FE}$
	$\text{Emisiones} = \text{litros combustible} \times \text{FE (CO}_2 \text{ eq/litro)}$

**Fuente:** (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

Las unidades en las que estén expresados los factores de emisión han de escogerse en función de los datos de la actividad de que se disponga (...).

Por otro lado, cabe destacar a qué hace referencia el término  $\text{CO}_2$  equivalente ( $\text{CO}_2 \text{ eq}$ ), unidad utilizada para exponer los resultados en cuanto a emisiones de GEI. Los gases que se indican en el Protocolo de Kioto como máximos responsables del efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global, los denominados gases de efecto invernadero (GEI), son: el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), el óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ), los hidrofluorocarbonos (HFCs), los perfluorocarbonos (PFCs), el hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ) y, desde la COP 181 celebrada en Doha a finales de 2012, el trifluoruro de nitrógeno ( $\text{NF}_3$ ). Sin embargo, el  $\text{CO}_2$  es el GEI que influye en mayor medida al calentamiento del planeta; es por ello que las emisiones de GEI se miden en función de este gas. La  $\text{t CO}_2 \text{ eq}$  es la unidad universal de medida que indica el potencial de calentamiento atmosférico o potencial de calentamiento

global (PCG) de cada uno de estos GEI, expresado en términos del PCG de una unidad de CO<sub>2</sub> (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023, pág. 3).

Entiendase por potencial de calentamiento global (PCG), el factor que describe el impacto de la fuerza de radiación (grado de daño a la atmósfera) de una unidad de un determinado GEI, en relación a una unidad de CO<sub>2</sub>.

### **Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

La agricultura envuelve una de las principales necesidades del ser humano: no obstante, la huella ambiental que genera la actividad de producción de alimentos ocasiona grandes impactos negativos al medio ambiente según el manejo de la producción y de los recursos naturales a disposición [2] (Castro Granados, Brenes Peralta, Jiménez Morales, & Campos Rodríguez, 2021, pág. 110).

De acuerdo con Eurofins Enviroment Testing Spain, que es la red de empresas referente del sector ambiental en España, el análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que sirve para estudiar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad. Considera toda la historia del producto o actividad por estudiar, desde su origen hasta que termina siendo un residuo (Eurofins Enviroment Testing Spain, 2023).

Quispe Gamboa (2016), en su investigación, apunta que El ACV es un método de evaluación de las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad mediante la identificación y cuantificación de la energía, los materiales utilizados y los desechos liberados en el medio ambiente.

Ciertamente, el análisis de ciclo de vida de un producto permite la identificación de los principales impactos ambientales (vertidos, residuos, emisiones a la atmósfera, consumos de materias primas y de energía). Tiene en cuenta todas las etapas de su ciclo de vida, desde su origen, es decir, la extracción y procesado de materias primas, pasando por la producción, transporte y distribución, hasta el uso, mantenimiento, reutilización, reciclado y disposición en vertedero al final de su vida útil. Una vez identificados los principales impactos a lo largo de su ciclo de vida, permite realizar el análisis de alternativas en procesos productivos y la implementación de criterios ambientales en estrategias (Eurofins Enviroment Testing Spain, 2023).

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se expresa en términos de una unidad funcional que se refiere a la cantidad de productos o servicios necesarios para cumplir la función que se compara. Sirve de base para la comparación entre sistemas y, a partir de ella se cuantifican las entradas y salidas funcionales de un sistema productivo o de servicios.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) indica que una vez elegida la función, se selecciona la unidad funcional (UF), que representa la referencia elegida para expresar los resultados.

Es decir, la UF es la cuantificación del servicio suministrado por el sistema, la unidad común que representa la función del sistema.

Los resultados de los cálculos de un ACV se refieren siempre a la UF; por lo tanto, debe ser un valor cuantificable y aditivo (BID, 2020).

### **Etapas del Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

Eurofins Enviroment Testing Spain (2023) explica que la realización de un análisis de ciclo de vida es un proceso laborioso y complejo que requiere de técnicos ambientales especialistas. Dada su complejidad es necesario abordar el trabajo en diferentes etapas:

- **Definición de objetivos y alcance**  
Es necesario conocer los objetivos que perseguido con el estudio antes de abordarlo.
- **Inventario del Ciclo de Vida (ACV)**  
Se identifican y cuantifican todas las entradas (consumo de recursos y materiales) y todas las salidas (emisiones al aire, suelo, aguas y generación de residuos) que potencialmente pueden causar un impacto durante el análisis de ciclo de vida.
- **Evaluación de los Impactos del Ciclo de Vida**  
Se establece una relación de entradas y salidas en el inventario, con los posibles impactos sobre el medio ambiente, la salud humana y los recursos. Por último, se asignan los datos del inventario a cada categoría de impacto según el tipo de efecto ambiental esperado.

- **Interpretación de resultados**

Tras la realización del Análisis de Ciclo de Vida se habrá identificado en qué fases o elementos del ciclo de vida del producto se generan las principales cargas ambientales. Por ello, esos elementos serán clave a la hora de implementar las mejoras, puesto que son los causantes del mayor impacto ambiental.

## Tipos de análisis

Para el ACV se siguió lo indicado por la norma internacional de INTECO, específicamente la ISO 14040:2006 (principios y marco de referencia) y 14044:2006 (requisitos y directrices), así como las reglas de categoría de producto (Castro Granados, Brenes Peralta, Jiménez Morales, & Campos Rodríguez, 2021, pág. 110)

Eurofins Enviroment Testing Spain (2023), en su publicación, expresa que la clasificación de un análisis de ciclo de vida depende del nivel de detalle. Por esta razón, se pueden diferenciar hasta tres tipos de análisis de ciclo de vida ACV:

- **ACV conceptual:** se trata de un estudio cualitativo para identificar los potenciales impactos más significativos, los puntos más críticos. Por eso, los datos utilizados son muy generales, pero sí permiten saber las etapas más significativas de todo el ciclo de vida .
- **ACV simplificado:** este análisis toma solamente en consideración datos genéricos y abarca el Ciclo de Vida de manera superficial. Va seguido de una simplificación, donde se centra en las etapas más importantes y un análisis de fiabilidad de los resultados.
- **ACV completo:** consiste en un análisis en detalle a nivel cualitativo y cuantitativo. Tiene en cuenta todas las etapas y todos los datos disponibles.

## Metodología para realizar un Análisis de Ciclo de Vida

Eurofins Enviroment Testing Spain (2023) indica que dada la complejidad de un Análisis de Ciclo de Vida, se hace necesario disponer de una normalización o protocolo que marque las líneas por seguir durante todo el estudio. Por esta razón “International Standards Organisation” ISO ha elaborado una serie de normas ISO. Estas sirven de guía en la elaboración del Análisis de ciclo de vida ACV.

En 1994 se estableció dentro de ISO el comité técnico TC207 relacionado con la normalización de herramientas ambientales, incluido el ACV. Dentro de la normalización ISO se encuentran:

- ISO 14040: marco general, principios y necesidades básicas para realizar un estudio de Análisis de ciclo de vida
- ISO 14041: necesidades y procedimientos para elaborar la definición de los objetivos y alcance del estudio y para realizar el informe del análisis del inventario del ciclo de vida.
- ISO 14042: guía de la estructura general de la fase de análisis del impacto, AICV.
- ISO 14043: recomendaciones para realizar la fase de interpretación de un Análisis de ciclo de Vida o los estudios de un ICV.

## Energía incorporada (embodied energy) en los procesos de producción (EI)

La definición de la EI es la cantidad de energía directa e indirecta necesaria para producir bienes y servicios. La energía directa se refiere a la requerida por el proceso de fabricación, mientras que la indirecta es absorbida por la minería, la transformación y el transporte de los factores de producción (Quispe Gamboa, 2016, pág. 39).

La evaluación de la productividad de un sistema agrícola debe tomar en cuenta las salidas energéticas en términos de productos, pérdidas por factores climáticos u otros; estos son derivados del estrés a que es sometida la planta y que le obliga a canalizar energía para resistirlo. También son importantes los insumos o entradas energéticas complementarias a la del flujo de radiación solar. Es decir, los subsidios energéticos que recibe un determinado cultivo, ya sea

para mejorar su productividad biológica y económica, así como los requeridos para mantener su estructura biológica y su funcionamiento (The Oil Crash, 2013).

El sector agrícola produce, transforma y consume energía en función de la actividad y tecnología bajo la cual este insumo es aprovechado para la obtención de alimentos, forraje, fibra y otras materias primas para el proceso de agregación de valor (Vega Charpentier, 2015, pág. 1).

El funcionamiento de los agro-ecosistemas actuales se basa en dos flujos energéticos: el natural que corresponde a la energía solar y un flujo «auxiliar», controlado directamente por el agricultor que recurre al uso de combustibles fundamentalmente fósiles, (...). El primer flujo es el propio o natural de funcionamiento del ecosistema, es una energía abundante, gratuita y limpia; el segundo flujo corresponde a energía «almacenada», sus existencias son finitas, es relativamente cara y, por lo general, no es limpia en el sentido que su uso da origen a fenómenos de contaminación (The Oil Crash, 2013).

La energía tiene un rol clave habilitante para la seguridad alimentaria y la nutrición. Es esencial para los procesos agrícolas y es necesaria en cada etapa de las cadenas agroalimentarias en cuanto al bombeo de agua para irrigación, la fertilización, la siembra mecanizada, el almacenamiento y transporte de percederos, las redes de frío, el cultivo en condiciones controladas y el procesamiento agrícola e industria artesanal, entre otras funciones.

Asimismo, hay energía contenida en los fertilizantes, plaguicidas, maquinaria e infraestructura agrícola, como también en el material de siembra y la ración animal (Vega Charpentier, 2015, pág. 1).

Por lo tanto, la sistematización de metodologías e indicadores en el uso eficiente de la energía son necesarios, para el incremento de la productividad y la eficiencia productiva de las cadenas agrícolas de alimentos.

“La agricultura es, en última instancia, un proceso de conversión de energía: conversión de energía solar -junto con varias entradas de energía fósil y química- en energía de alimento” (Vega Charpentier, 2015, pág. 2).

Por cuanto se considera a la energía como aspecto central para lograr los objetivos de desarrollo sostenible, la eficiencia energética permite conciliar la creciente demanda de energía y su impacto en la base de recursos naturales: es una de las maneras más fáciles y más rentables para combatir el cambio climático, mejorar la calidad del aire, reducir los costos de energía para

las empresas y los consumidores y ofrecer beneficios múltiples (Vega Charpentier, 2015, pág. 4).

Fernández del Reguero (2020), en su estudio en la producción de tomate, explica que para el análisis energético se han incluido tanto los outputs energéticos totales, medidos por la producción bruta del tomate en la finca, como los inputs energéticos totales, diferenciados en varios niveles.

“El nivel cero atañe al output energético, es decir, a la producción bruta (o neta) de tomates en la finca a estudiar” (Fernández del Reguero, 2020, pág. 7).

“Los niveles sucesivos corresponden a los insumos agrícolas, tomados en consideración en términos energéticos” (Fernández del Reguero, 2020, pág. 7).

El nivel uno representa el consumo de energía directa (E.D). Hace referencia al combustible y electricidad que se consume directamente en los campos de cultivo. Esta energía se utiliza sobre todo para maquinaria y riego, aunque no se debe olvidar el gasto energético en vehículos profesionales y la mano de obra o labor humana (Fernández del Reguero, 2020, pág. 7).

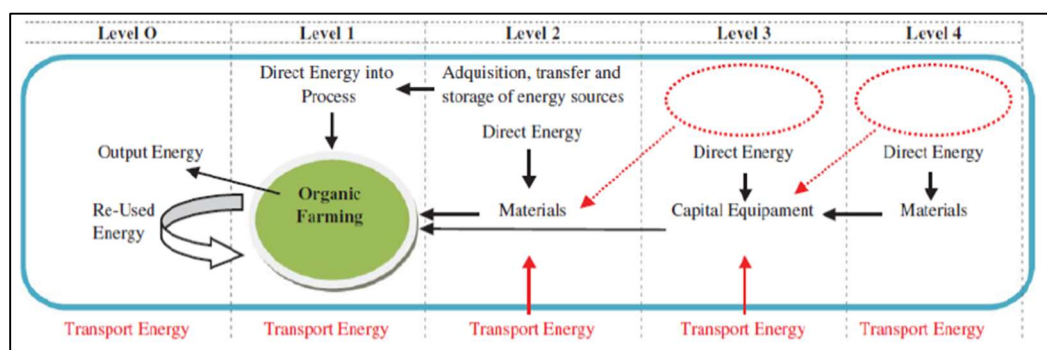
En el segundo nivel se incluye el consumo de energía indirecta (E.I), que ha de tenerse en cuenta si se desea obtener una visión global de los impactos que genera el sistema en el medio ambiente. La energía indirecta es aquella que no se utiliza directamente en el campo de cultivo, pero es necesaria para la producción.

Los elementos principales son los fertilizantes, semillas, pesticidas, fitosanitarios y otros elementos de protección de cultivo. También se deberá contabilizar el consumo de combustible y electricidad invertidos en extracción, transporte y transformación de los recursos necesarios para la producción (...), así como los materiales metálicos (acero, hierro, etc.) y no metálicos (plásticos) que se utilizan en los sistemas agrícolas (Fernández del Reguero, 2020, pág. 8).

En los niveles 3 y 4 se incluyen los insumos relacionados con el consumo energético del capital fijo (E.C). El tercer nivel hace referencia al consumo energético vinculado a la amortización de la maquinaria, mientras que el cuarto nivel contabiliza el consumo energético de reparación y mantenimiento (Fernández del Reguero, 2020, pág. 8).

En la siguiente **Figura 24** se representan dichos flujos.

**Figura 24:** Flujos de energía



**Fuente:** (Fernández del Reguero, 2020)

La estimación de Input Energético (I.E) se realiza calculando el consumo total de energía, es decir, el sumatorio de la energía directa, energía indirecta y capital fijo. Desde el enfoque de “el sistema como un todo”, el input energético hace referencia a la Demanda Energética Acumulada (CED) que se denomina Energía incorporada (Embodied Energy); para medir dichos insumos se utilizan los coeficientes de energía  $\beta^{-1}$  (Fernández del Reguero, 2020, pág. 10).

La **Ecuación 16** indica cómo se calcula el Input Energetico, donde (t) corresponde al cultivo analizado.

**Ecuación 16:** Input Energético hace referencia a la energía incorporada (Embodied Energy)

$$I.E_{(t)} (KJ) = \sum Input_{(i)} (u.f) \times \beta^{-1}_{(i)} (MJ. u.f)$$

**Fuente:** (Fernández del Reguero, 2020)

## Integración de tecnología

Gracias a la influencia de la tecnología en la agricultura, las mejoras en la producción, la mejora en la gestión de los recursos utilizados y el aumento de la seguridad laboral, ha hecho que el sector agrícola y ganadero haya tenido una evolución mayúscula.

La sostenibilidad se ha convertido en uno de los pilares en las industrias y la del agro es una de las que más muestra interés en ello. Aprovechando las innovaciones tecnológicas, se puede apuntar a un mejor aprovechamiento de los insumos, al reducir los impactos ambientales (Agropinos, 2019).

Todos los cultivos sostenibles, a través del mundo, tienen un elemento en común: implementan la tecnología en sus procesos. Las soluciones innovadoras que ofrece la tecnificación en la actualidad son las principales herramientas para lograr una agricultura sostenible, dado que permite la optimización de recursos, insumos para invernaderos y tiempos; puede mejorar la calidad de la producción, así como promover la continuidad de las labores en el campo (Agropinos, 2019).

De acuerdo con Agropinos (2019), estrategias como el manejo integrado de plagas, desde los sistemas de riego hasta la cosecha de los productos, son necesarias para lograr la sostenibilidad, que pueden potenciar sus resultados mediante la tecnificación.

## Externalidad positiva

“Algunos actos de consumo conllevan efectos externos o efectos secundarios no contabilizados en el precio de la transacción. Las externalidades de consumo pueden ser positivas o negativas” (Sostenible o Sustentable, 2023).

Una externalidad es una situación en la que los costos o beneficios de producción y/o consumo de algún bien o servicio no se reflejan en su precio de mercado. En otras palabras, son externalidades aquellas actividades que afectan a otros sin que estos paguen por ellas o sean compensados. Existen externalidades cuando los costos o los beneficios privados no son iguales a los costes o los beneficios sociales. Los dos tipos más importantes son las economías externas (externalidad positivas) o las deseconomías externas (externalidades negativas) (Alimentando la inocuidad, 2024).

Antes de hablar sobre externalidades positivas, es importante identificar qué es una negativa, Sostenible o Sustentable (2023), en su publicación, explica: Una externalidad negativa es el coste dañino que recibe la sociedad provocado por una actividad particular de consumo; hay que recordar que nuestras acciones pueden tener efectos negativos en los demás.

En 1920 el economista británico Arthur Pigou aconsejó a los gobiernos impuestos para las empresas contaminantes para compensar el perjuicio causado a terceros. Los impuestos no gustan a nadie, pero los impuestos pigouvianos ayudan a compensar a la sociedad los impactos de las externalidades negativas. Quién contamina, paga. No es fácil determinar el valor monetario de cosas como el agua transparente o el aire limpio, pero es útil una estimación para aplicar políticas medioambientales que ayuden a mejorar la calidad de vida (Sostenible o Sustentable, 2023).

Una externalidad positiva se produce cuando con una acción particular se obtiene un efecto positivo hacia el medio ambiente y la sociedad; las decisiones de consumo y las pequeñas acciones a veces son poderosas (Sostenible o Sustentable, 2023).

## Cultivo de lechuga

La lechuga, *Lactuca sativa* L; es una planta anual autógama perteneciente a la familia de las Asteráceas, clasificada como la hortaliza de hoja por excelencia y es la más consumida como ensalada verde debido a su calidad culinaria. Esta especie presenta una gran diversidad debido a sus diferentes tipos de hojas y a sus hábitos de crecimiento, sin embargo, se diferencian cinco variedades botánicas: la longifolia (Lam.), donde se encuentran las lechugas Romanas o Cos; la capitata (L.) la cual se conoce como Mantecosas; la crispa L. que son conocidas como arrepolladas o cabeza redonda; la acephala Dill. o nybacea, que presenta hojas sueltas y dispersas y la augustuana All; que son lechugas espárrago o de tallo (Lizano Astorga, 2020, pág. 5).

La lechuga es producida prácticamente en todo el mundo mediante diferentes técnicas de cultivo, sin embargo, es mayormente producido en zonas templadas, tropicales y subtropicales donde las condiciones ambientales favorecen su crecimiento (...). La temperatura óptima para el correcto crecimiento de las plantas de lechuga está entre los 15 °C y 18 °C,

temperaturas inferiores a 12 °C y superiores a 24 °C el crecimiento de las plantas se ve limitado (Lizano Astorga, 2020, pág. 5).

Sábada y otros (2008) en su publicación se refieren al requerimiento hídrico en un sistema de cultivo de balsas cerrado (hidropónico) donde no se genera un drenaje de lavado, de forma que la solución nutritiva se va salinizando paulatinamente, hasta que pueda darse el caso de que sea necesario un cambio del agua contenida en las balsas. Mediante este sistema se determinó el consumo de cada unidad producida, donde se establece que una lechuga con un ciclo de vida de 62 días requiere de 8,7 litros de agua.

La **Tabla 2** presenta los resultados obtenidos referentes a la cantidad requerida de agua por planta según el ciclo de vida medido en días.

**Tabla 2:** Litros de agua requeridos por cada unidad de lechuga en sistema hidropónico

Fecha plantación	Fecha recolección	Ciclo en días	Litros agua/planta
19-sep-07	30-oct-07	41,00	6,7
31-oct-07	30-ene-08	91,00	7,8
30-ene-08	1-abr-08	62,00	8,7
3-abr-08	14-may-08	41,00	9,6
14-may-08	18-jun-08	35,00	14,4
19-jun-08	22-jul-08	33,00	14,2

**Fuente:** (Sábada, y otros, 2008)

En la estimación de huella hídrica en el cultivo del sistema de la cadena agroecológica convencional requiere de 84 litros de agua para la producción de 1 kg de lechuga. Este volumen contempla la huella gris como el agua necesaria para diluir o compensar el agua contaminada por los fertilizantes sintéticos aplicados al cultivo (Loachamín Oña, 2019, pág. 62).

Pittí P., y otros (2024) en su estudio científico sobre la evaluación económica del cultivo de lechuga romana bajo ambiente controlado, establecen las siguientes condiciones para el cultivo de lechuga:

En cuanto a la línea de tiempo experimental, es importante señalar, que una vez que las semillas fueron insertadas en los oasis, se cubrieron con un plástico fino para mantener la humedad y evitar la entrada de luz, durante el proceso de germinación que duró tres días. Luego

de transcurrido ese tiempo, se les retiró el plástico y se dejaron 17 días más creciendo con luz LED y solución nutritiva; luego se procedió a trasplantarlas a las bandejas de cultivo (láminas de foam).

Las condiciones de cultivo fueron las siguientes: Temperatura 21°C, Humedad relativa 60%, CO<sub>2</sub> 1,200 ppm, fotoperíodo que comprendía 16 hrs/día (luz artificial) y 8 hrs/día en oscuridad, pH (solución nutritiva entre 5.5 a 6.5 conductividad eléctrica entre 1-2.5 mScm-1 y se utilizó una técnica de flujo profundo recirculante para el sistema hidropónico (Pittí P., y otros, 2024, pág. 22).

La intensidad de luz que recibieron las plantas por tratamiento se determinó utilizando el medidor quantum de espectro completo, marca Apogge. Modelo MQ-500, el cual fue utilizado al inicio y final del experimento para obtener un promedio de la intensidad de luz que recibieron las plantas durante el proceso de cultivo y desarrollo. Para la determinación de la intensidad de rojo lejano se utilizó un espectro radiómetro modelo ST (Pittí P., y otros, 2024, pág. 22).

Los valores referentes a intensidad de la luz requerido para para cada tratamiento del cultivo de lechuga del experimento realizado por Pittí P., y otros (2024) se detallan en la **Tabla 3**.

**Tabla 3:** Valores de intensidad de la luz para el cultivo de lechuga en ambiente controlado

Tratamiento	Detalle
T1	259 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ + 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ de rojo lejano aplicados 8 días antes de la cosecha
T2	193 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$
T3	332 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$
T4	456 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$
T5	599 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

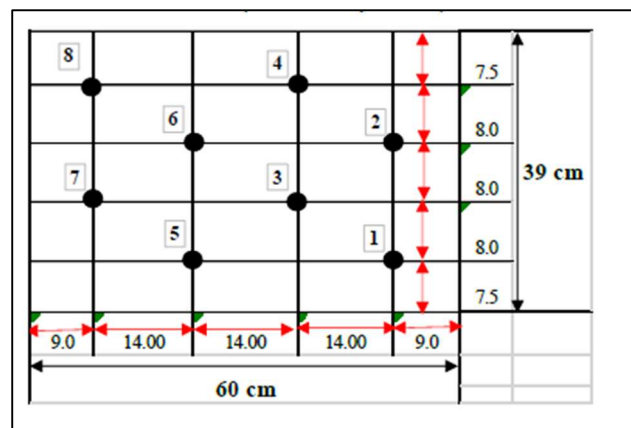
**Fuente:** (Pittí P., y otros, 2024)

En cuanto a los métodos y materiales utilizados Pittí P., y otros (2024) resaltan la utilización de un modelo de agricultura protegida, conocida como PFAL con una estructura multinivel que incluye bandejas.

Las bandejas plásticas utilizadas para cada nivel en cada una de las torres utilizadas en este experimento tenían una dimensión de 66 cm x 45 cm x 6.5 cm, a las cuales se les colocó una lámina de foam con una dimensión de 60 cm x 39 cm, que contaba con ocho orificios en cada uno de los cuales se colocó una planta de lechuga contenida dentro de un sustrato de oasis (2.2 cm x 2.2 cm x 3.8cm) (Pittí P., y otros, 2024, pág. 20).

En la **Figura 25** se observa la distribución de las plantas, de acuerdo con lo anterior.

**Figura 25:** Distribución de plantas de lechuga



**Fuente:** (Pittí P., y otros, 2024)

De acuerdo con Pittí P., y otros (2024), en las PFAL, las plantas por cultivar pueden ser vegetales de hoja, hierbas, tubérculos, plantas medicinales y otros con una altura de 30 cm o menos, ya que la distancia entre niveles es de 40 cm aproximadamente, para un uso máximo del espacio.

Por otra parte Pittí P. y otros (2024) recomiendan una premezcla recirculante durante todo el proceso de crecimiento y desarrollo de fertilizantes, nitrato de calcio y sulfato de magnesio.

## CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

Arias (2012) indica: “Es el conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas de investigación mediante la prueba o verificación de hipótesis” (pág. 19). En general es el conjunto de pasos, técnicas y procedimientos usados para buscar la solución a un problema de investigación planteado.

De acuerdo con Valverde Araya (2021): “Corresponde a aquella estructura implementada de manera organizada para recolectar, ordenar y finalmente analizar la información; permite así, llevar a cabo la interpretación de los resultados, de acuerdo con el problema que se investiga (pág. 125).

### Enfoque de la investigación

El presente trabajo de investigación se elabora con base en un enfoque cuantitativo no experimental, debido a los objetivos y problema de la investigación, inicialmente planteados y según las características, necesidades o bien naturaleza del presente proyecto de investigación. Se determina que dicho enfoque es el que se ajusta con lo indicado y se cuenta con un sustento teórico suficiente que permite la implementación de este.

Según lo anterior, se procede con recolección de datos, tanto en literatura como en campo (de ser necesario), cálculos y análisis energéticos, evaluación y desempeño de sistemas, de acuerdo con los requerimientos obtenidos en memorias de cálculo, además, en la selección de tecnología, según lo disponible en el mercado,

Hernández, Fernández, & Baptista (2014), indican que un enfoque cuantitativo: “Utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (pág. 4).

### Método de la investigación

Existen distintas formas de clasificar un proyecto de investigación, ya sea por sus características, objetivos, área de aplicación o bien enfoque dado a este. Muñoz Razo (2011) en su libro: *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*, explica que es posible clasificar una

tesis en tres tipos diferentes, “atendiendo exclusivamente al método de investigación y las técnicas de recopilación que se utilizarán para obtener la información” (pág. 14).

La clasificación que se puede dar a una investigación según el método y técnica utilizados son:

Las tesis que utilizan datos documentales (documental), “cuyo método de investigación se concentra exclusivamente en la recopilación de datos de fuentes documentales, ya sea de libros, textos, sitios Web o cualquier otro tipo de documentos gráficos, icnográficos y electrónicos” (Muñoz Razo, 2011, pág. 14).

Otro tipo de tesis son las que investigan en el campo (investigación de campo), “las investigaciones cuya recopilación de información se realiza dentro del ambiente específico donde se presenta el hecho o fenómeno de estudio” (Muñoz Razo, 2011, pág. 14).

También existen tesis que combinan los datos teóricos con las investigaciones en el campo (combinada): “Son tesis en cuyo método de recopilación y análisis de datos se conjunta la investigación documental con la de campo, con la finalidad de profundizar en el estudio del tema propuesto para tratar de cubrir todos los posibles ángulos” (Muñoz Razo, 2011, pág. 14).

De acuerdo con los anteriores conceptos, el análisis de este proyecto estará relacionado con el método documental y el tipo de campo. Por consiguiente, está claro que la tesis desarrollada usa el método combinado.

## **Fuentes de información**

Durante el proceso de elaboración de este proyecto se utilizaron fuentes informativas de diferentes medios que hicieron un aporte a todas las áreas que se involucra esta investigación.

La **Tabla 4** menciona las fuentes que permitieron lograr un correcto entendimiento, interpretación, desarrollo y finalización de cada una de las etapas de este trabajo, además de su respectivo aporte.

**Tabla 4:** Fuentes de información

Fuente	Comentarios
MAG, Extensión Agrícola de Palmares	Información sobre actualidad en Costa Rica en proyectos de agricultura urbana y uso de nuevas técnicas de producción.
Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica	Conocimientos relacionados con el uso de métodos hidropónicos y ambientes controlados para la producción de alimentos.
CNFL	Información sobre proyecto sostenibilidad en Coronado.
IMN	Factores de emisión de gases de efecto invernadero e información sobre temperatura promedio en San José.
ARESEP	Precios y tarifas establecidos de ley para los vectores energéticos.
Ingenieros expertos y técnicos	Conocimiento en áreas como diseño eléctrico, aire acondicionado, sistemas de riego, iluminación, estructuras y conocimientos agrónomos.
Universidades nacionales e internacionales	Con base en proyectos relacionados con el tema.
Empresas proveedoras y/o fabricantes de equipo relacionado con el proyecto	Consulta, obtención de información relevante y asesoramiento.
Literatura	Relacionada con los diferentes temas que abarca la investigación (combustibles fósiles, gases de efecto invernadero, energía eléctrica, sistemas de climatización, técnicas de cultivo, sistemas de riego, entre otros).
Weather Atlas	Clima y previsión meteorológica mensual San José, Costa Rica.

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

## Variables o unidades de análisis

La siguiente matriz detalla las variables o unidades de análisis involucradas en la elaboración de la presente investigación de enfoque cuantitativo.

Como se muestra en la **Tabla 5**, dicha matriz está conformada de las variables, indicadores y las definiciones conceptuales, operacionales e instrumentales para la recolección de los datos en cada objetivo específico planteado.

**Tabla 5:** Variables o unidades de análisis

Objetivo	Variable	Indicador	Definición conceptual	Definición operacional	Definición instrumental
1. Determinar la eficiencia energética de la producción de alimentos vegetales en ambiente controlados mediante una unidad funcional.	Eficiencia energética	Se evalúan el consumo energético de todos los equipos y procesos involucrados en el desarrollo del proyecto.	El uso eficiente de la energía (ahorro energético), es el objetivo de reducir la cantidad de energía requerida para proporcionar productos y servicios.	Se recurre a información recolectada por medio de entrevistas realizadas a proveedores de equipos e instituciones gubernamentales, además valores obtenidos en la memoria de cálculo.	Entrevistas personales, vía telefónica y correo electrónico, cuestionarios formulados para la obtención de la información necesitada. Consulta a fichas técnicas.
2. Evaluar la utilización de técnicas y tecnologías de bajo consumo hídrico y energético que propicien condiciones controladas a cultivos.	Técnicas y tecnologías de bajo consumo hídrico y energético.	Se investiga sobre proveedores de tecnologías que utilicen energía limpia y hagan uso racional de	Refiérase a cualquier equipo y metodología utilizados para el cultivo de alimentos haciendo uso sostenible de los recursos naturales.	Se recurre a información recolectada por medio de entrevistas realizadas a proveedores de equipos, manuales técnicos y búsquedas en internet,	Entrevistas personales, literatura relacionada al tema, hojas de cálculo en Microsoft Excel y uso de ecuaciones

		los recursos naturales, además de técnicas de cultivo.		además de profesionales agrícolas.	de ingeniería
3. Analizar si es económicamente sostenible la implementación de granjas urbanas controladas en la ciudad para la producción de alimentos vegetales.	Sostenibilidad económica.	Se analiza costo de equipos, consumo energético, transporte e insumos involucrados en la producción.	La sostenibilidad económica implica el uso de prácticas económicamente rentables que sean tanto social como ambientalmente responsables.	Se determinan costos totales de producción para ser comparados con productos similares en el mercado.	Análisis de condiciones ideales para la producción, hojas de cálculo en Microsoft Excel, información documental y uso de ecuaciones de ingeniería
4. Establecer las externalidades positivas del reemplazo de la agricultura tradicional por ambientes controlados.	Externalidades positivas	Se calculan las emisiones de huella de carbono (tCO <sub>2</sub> eq), consumo de agua (l) y consumo de energía (kW) resultante de cada tecnología estudiada.	Una externalidad positiva se produce cuando con una acción particular se obtiene un efecto positivo hacia el medio ambiente y la sociedad.	Se analizan resultados de emisiones de huella de carbono (tCO <sub>2</sub> eq), consumo de agua (l) y consumo de energía y se comparan con resultados del uso de técnicas de cultivo tradicionales para apreciar resultados.	Factores de emisión de gases de efecto invernadero de instituciones enfocadas en su estudio, uso de ecuaciones y hojas de cálculo en Microsoft Excel.

Fuente: Elaboración propia (2024)

## **Instrumentos**

A lo largo del desarrollo de este proyecto se hizo uso de ciertos instrumentos para la recolección o bien obtención de aquella información indispensable para llevar a cabo con éxito la investigación. A continuación, se indican dichos recursos de investigación:

- Entrevista en la Extensión Agrícola del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en Palmares de Alajuela, dirigida al personal encargado de proyectos relacionados con agricultura urbana.
- Entrevista en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, ubicada en La Garita de Alajuela, dirigida a la persona encargada de realizar investigaciones sobre ambientes controlados para el cultivo de alimentos.
- Consultas a ingenieros y técnicos con experiencia en temas relacionados con la investigación.
- Trabajos de investigación de otras universidades nacionales e internacionales relacionados con el tema de la investigación.
- Entrevistas realizadas, vía correo electrónico, a diferentes funcionarios de instituciones, relacionadas con temas ambientales, tarifas de energía, meteorología e investigación.
- Utilización de literatura relacionada con las diferentes aéreas de estudio de investigación.
- Uso de diferentes manuales técnicos con información de equipos y materiales requeridos para el desarrollo del trabajo.

## **Proceso para la recolección y análisis de datos**

Inicialmente se realizó una visita a la Extensión Agrícola del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) en Palmares de Alajuela, para recolectar toda la información relacionada con el tema de agricultura urbana y, de esta forma, conocer la actualidad nacional en la implementación de nuevas técnicas de cultivo amigables con el ambiente.

Posterior a la visita al MAG, se inició una investigación para establecer la existencia de proyectos en el país, vinculados con el tema de estudio y de índole público, para esto se buscó información en instituciones como la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, ente enfocado a promover y desarrollar la investigación para impulsar la innovación tecnológica y el desarrollo en mejoramiento del sector agrícola, así como, contribuir con la conservación del ambiente y la calidad de vida de la sociedad.

Fueron consultados diferentes organismos gubernamentales y privados sobre la existencia de incentivos o exoneraciones que apoyen proyectos de cultivos sostenibles.

Una vez conocida la actualidad nacional, fueron contactadas diferentes empresas nacionales y extranjeras dedicadas al diseño y venta de equipos requeridos para conformar un ambiente controlado de cultivo, además de empresas suplidoras de insumos y materiales; el objetivo es conseguir precios y características técnicas de los sistemas.

En este punto es importante el análisis de información literaria y experiencias implementadas, para establecer un producto agrícola base y un sistema de cultivo base, que haga uso del riego hidropónico y maximice el uso del área de cultivo, además de aprovechar los recursos naturales y la propiciación del ahorro de energía,

De seguido se buscó información y literatura relacionada con las diferentes tecnologías y equipos requeridos por el proyecto, así como temas vinculados a estos, entre ellos: gases de efecto invernadero, huella de carbono y eficiencia energética.

Fue efectuada una argumentación de los costos demandados durante la implementación de un ambiente controlado completo, en la región, para poder visualizar y medir la viabilidad económicamente. Los análisis se realizaron en dólares o, en su defecto, en euros y se trasladaron a sus costos equivalentes en dólares, por tratarse de una divisa fuerte.

El siguiente paso fue cuantificar externalidades positivas como: la huella de carbono, la eficiencia energética y el ahorro de recursos como agua. Los resultados obtenidos fueron comparados con datos referenciales relacionados con el uso de técnicas tradicionales en cultivo de alimentos, con el fin de estimar el beneficio y buscar réditos económicos.

Finalmente, llevado a cabo las distintas etapas antes descritas, se procede a determinar la conveniencia de la introducción de este proyecto en ciudades del Gran Área Metropolitana y a establecer conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

### Actualidad en Costa Rica sobre agricultura urbana en ambientes controlados

Uno de los mayores problemas de los ambientes controlados para el cultivo de alimentos es el alto costo en relación con el alcance económico del agricultor local, explica el ingeniero agrónomo Eduardo Lee, Jefe de la Extensión Agrícola del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), en el cantón de Palmares de Alajuela. También agrega que para poder ser implementada esta técnica es necesario bajar costos, al desarrollar tecnologías locales, como sensores o bien importando accesorios y equipos tecnológicos de países como China, país donde es más barata la fabricación. Lee ha tenido experiencia en el desarrollo de sistemas de monitoreo para control de pH y sensores para sistemas de riego, además de ser partidario de la agricultura orgánica.

Dicha entrevista tuvo lugar el 09 de octubre del 2023, donde explicó que, desde hace 10 años se trabaja en proyectos de agricultura urbana a pequeña escala, con el objetivo de formar costumbres de buena nutrición en la familia y promover fuentes de empleo. En general son proyectos con invernaderos pequeños que van de los 25 a los 50 m<sup>2</sup> donde únicamente se brinda asesoría de forma gratuita sin ningún tipo de financiamiento. La estadística a nivel nacional de continuidad de estos emprendimientos es 1%, muy pocas personas aprovechan el aprendizaje por la razón que sea, explica el funcionario.

En Costa Rica no existe control en la producción agrícola únicamente se brinda asesoría y se establecen normas. De acuerdo con lo anterior el MAG ha trabajado en la búsqueda de alternativas de producción enfocadas en proteger el medio ambiente y la salud de los individuos, estas contemplan los siguientes objetivos:

- Rescatar las tierras de cultivo mediante técnicas de producción que protejan el suelo y políticas, para no utilizar agroquímicos, apostando a la agricultura orgánica.
- Fomentar costumbres de buena nutrición en la familia con productos inicuos, que no utilicen químicos y que sean de bajo costo monetario.

Para el cumplimiento de los anteriores objetivos se han empleado métodos basados en agricultura orgánica, lo que limita un desarrollo más amplio del concepto de ambiente protegido o controlado. Es necesario destacar que para catalogar un cultivo como orgánico, tiene que ser estrictamente cultivado con tierra o utilizado el suelo, no emplear químicos y estar certificado por el Servicio Fitosanitario del Estado (SFE). Por su parte, los sistemas hidropónicos empleados para ambientes controlados o protegidos no utilizan el suelo, razón por la cual la producción, bajo esta técnica, no puede ser clasificada como orgánica, aun siendo una agricultura limpia de pesticidas y químicos; ante el enfoque del MAG en la producción orgánica, se considera pertinente aclarar dicha diferenciación. Se debe destacar la necesidad de un mayor acercamiento con técnicas que, además de promover el bienestar ambiental y la salud humana, también masifiquen y garanticen la producción con uso eficiente de recursos naturales y a la misma vez con una rentabilidad económica.

En la **Figura 26** se pueden observar algunas investigaciones llevadas a cabo en el MAG, de carácter orgánico.

**Figura 26:** Experimentación orgánica



**Fuente:** MAG, Extensión Agrícola de Palmares de Alajuela (2023)

Con relación a la existencia de ayudas gubernamentales para el desarrollo de nuevas formas innovadoras de producción de alimentos sostenibles, se consulta a Víctor Julio Carvajal Porras actual ministro de Agricultura y Ganadería. Este manifiesta que, dentro de la legislación costarricense se contemplan exoneraciones fiscales y aplicación de la tarifa reducida del 1% del IVA, para el fomento a la actividad agropecuaria como tal. Se establece el procedimiento por seguir, así las listas taxativas de maquinaria, equipo e insumos que se ajustan a la modalidad de producción con ambiente protegido, que se aproxima, de alguna forma, al modelo de producción de bajo impacto ambiental y adaptable a las condiciones de la urbanidad (ver **Anexo A**).

Es importante dejar claro que esta exoneración corresponde a un régimen especial de tipo agropecuario y funciona para la compra de insumos, maquinaria y servicios. Para acceder a esta exoneración (1% del IVA) es necesario que el interesado se registre como productor agropecuario ante el MAG y ante el Ministerio de Hacienda.

En virtud de que los productores también deben estar registrados en el Ministerio de Hacienda, se indagó sobre posibles beneficios para el cultivo de alimentos, de manera sostenible y eficiente. El director general de Hacienda, Rudolf Lucke Bolaños explica, que no existe ninguna disposición de carácter legal que dispense de las obligaciones tributarias directamente a proyectos conocidos como granjas urbanas (ver **Anexo B**).

Ante las consultas hechas a los diferentes ministerios, se destaca de manera resumida la reducción de impuestos para la compra de equipos e insumos para proyectos del sector agropecuario, pero se carece de un trato especial que beneficie el producto final durante su comercialización, en los mercados nacionales.

En el ámbito de la investigación y desarrollo la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, promueve la investigación con el fin de impulsar la innovación tecnológica y el desarrollo empresarial para el mejoramiento del sector agrícola, al contribuir con la conservación del ambiente y la calidad de vida de la sociedad. Al tener esta dependencia un ligamen con el tema abordado, el 18 de octubre del año 2023 se entrevistó al ingeniero agrónomo Gustavo Quesada Roldán para conocer sobre la actualidad y cómo se ha abordado el análisis de técnicas de producción como la agricultura urbana en ambientes controlados. El ingeniero investigador expone que se buscan recursos económicos para convertir un espacio disponible de 12 m<sup>2</sup> en un cuarto de producción de plantas bajo el esquema de

agricultura vertical tipo indoor, esta utiliza espacios cerrados con estructura a diferentes alturas, que recurren necesariamente al uso de luz artificial y solución nutritiva con recirculación de agua.

La inversión requerida es alta y debe considerar tecnología y equipos capaces de controlar variantes como: temperatura, humedad relativa (HR), concentración de CO<sub>2</sub>, entre otras.

Inicialmente se otorgó un pequeño presupuesto con el cual se empezaron a desarrollar luces LED fabricadas en el país para acelerar el proceso de fotosíntesis y el desarrollo de las plantas. Esta iniciativa se hizo con el propósito de reducir costos y tratar de que el proyecto sea un modelo de producción sostenible y atractivo en el tiempo.

Por consiguiente, el plan piloto está a la espera de recursos económicos que le permitan concretarse, sin embargo, se ha dado una continuidad a la investigación en temas como: el aprovechamiento de espacio y los recursos, reducción del uso de agroquímicos, mejoramiento del tiempo entre cosechas. Esto, sin dejar de lado la búsqueda de aspectos que permitan diferenciar y dar un alto valor agregado a los cultivos desarrollados de manera controlada, entre ellos la inocuidad y el alto aporte nutricional.

**Figura 27:** Agricultura en invernaderos



**Fuente:** (EEAFBN, 2024)

Los fondos económicos son esenciales para consolidar el proyecto piloto y dar paso a que los resultados queden demostrados a nivel investigativo.

Se consideró pertinente e importante conocer la existencia de créditos financieros, capaces de ofrecer el respaldo necesario en la consolidación de un proyecto de agricultura urbano. Aquí se destaca Fundecooperación para el Desarrollo Sostenible, que es una fundación cuyo trabajo es

dirigido a satisfacer necesidades de financiamiento y asistencia técnica a los micro, pequeños y medianos empresarios (MiPyMes), con actividades de carácter sostenible, innovadoras y comprometidas con el ambiente, donde existe un crédito denominado “Ciudad Verde”. Estas iniciativas de transformación urbana promueven la agricultura urbana, la arquitectura verde, el eco diseño, los encadenamientos productivos y el turismo sostenible.

El financiamiento puede llegar hasta los ₡30 000 000,00 en la fundación que es de carácter privado; aunque la modalidad de pago y requisitos son flexibles, la tasa de interés es elevada (ver **Anexo C**).

Algunos bancos del estado como el Banco Nacional de Costa Rica y el Banco Popular, disponen de recursos propios y del programa Banca para el Desarrollo que puede ser empleado para financiar este tipo de proyectos; sin embargo, los requisitos no pueden ser cubiertos por las medianas y pequeñas empresas y quedan imposibilitadas para acceder.

El costo de la energía eléctrica es un aspecto importante, de acuerdo con la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), encargada de establecer los precios, tarifas del sector de energía (electricidad e hidrocarburos). Se han logrado tarifas eléctricas especiales para impulsar la actividad del hidrógeno verde, al igual que en centros de recarga (T-VE), pero actualmente no se cuenta con una tarifa específica para favorecer actividades de agricultura urbana sostenible, según explica David Chacón Huaman funcionario de la Intendencia de Energía (ver **Anexo D**). Por su parte la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), por medio de Miguel Febles González del departamento de Proceso Recursos Naturales y Mejoras de Cuenca, explicó sobre la existencia de la Finca de la Sostenibilidad en Coronado, donde hay un proyecto de hidroponía, una huerta orgánica y un vivero forestal, con fines educativos en temas ambientales, pero sin relación con el propósito de la presente investigación.

La información expuesta marca un punto de partida que visualiza la necesidad de investigación a profundidad sobre el tema abordado por este trabajo, debido a que el panorama nacional refleja que no se ha hecho lo necesario para investigar y adoptar formas modernas que sean eficientes para producción de alimentos, de manera sostenible y sana; se aprovechan, de manera eficiente, el espacio y los recursos. Aunque la iniciativa existe, la falta de recursos y ayuda gubernamental no es suficiente, pues se consideran claras las facilidades y dificultades a las que se enfrenta esta propuesta científica.

## Ubicación del proyecto

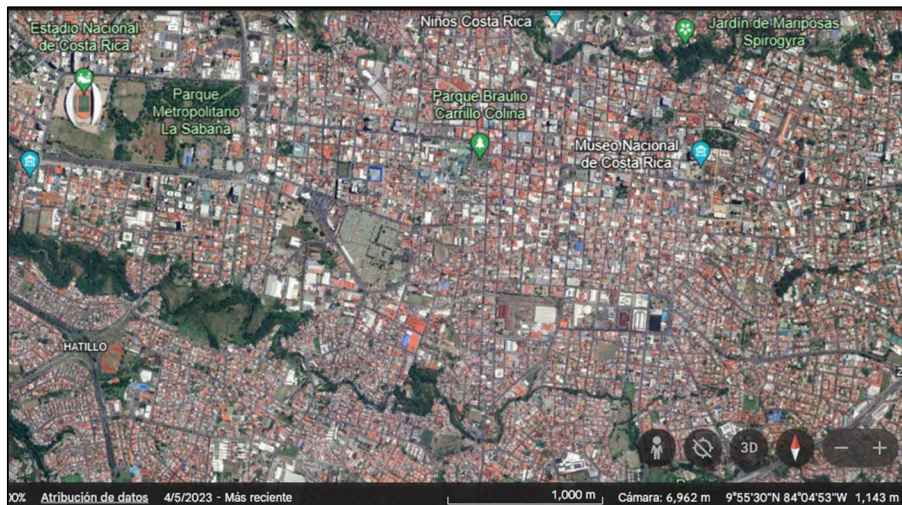
Idealmente el cuarto de cultivo que plantea este documento se podría ubicar en parques o espacios, contiguo a los lugares de venta y distribución de alimentos, tales como supermercados, tramos, etc., de esta forma el producto no necesitaría de transporte y se brindaría fresco al consumidor.

A ser este un análisis de conveniencia sobre la introducción de la agricultura urbana en la Gran Área Metropolitana (GAM), se considera pertinente la ubicación de este proyecto dentro de la ciudad, con mayor densidad, de las cuatro que conforman esta región; de acuerdo con lo anterior, la ciudad de San José cuenta con la concentración más alta de población,

Ubicada en el cantón Central de la provincia del mismo nombre, concentra en un 1,85% del territorio a cerca del 30% del total de la población de Costa Rica con una densidad de 1380 hab/km<sup>2</sup> y es la región que más aporta a El Producto Interior Bruto (PIB).

La **Figura 28** es una captura satelital de la ciudad con algunos puntos de referencia importantes como el Parque Metropolitano La Sabana.

**Figura 28:** Captura satelital de la Ciudad de San José

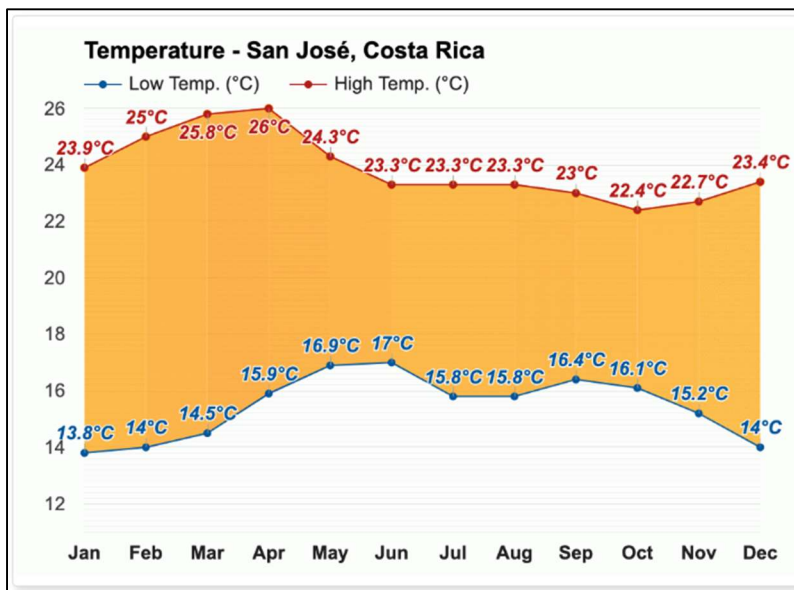


**Fuente:** (Google Earth, 2024)

Con relación al clima, solo hay dos estaciones, seca y lluviosa. La época seca se extiende de diciembre hasta marzo, abril es un mes de transición y la temporada lluviosa va de mayo hasta octubre.

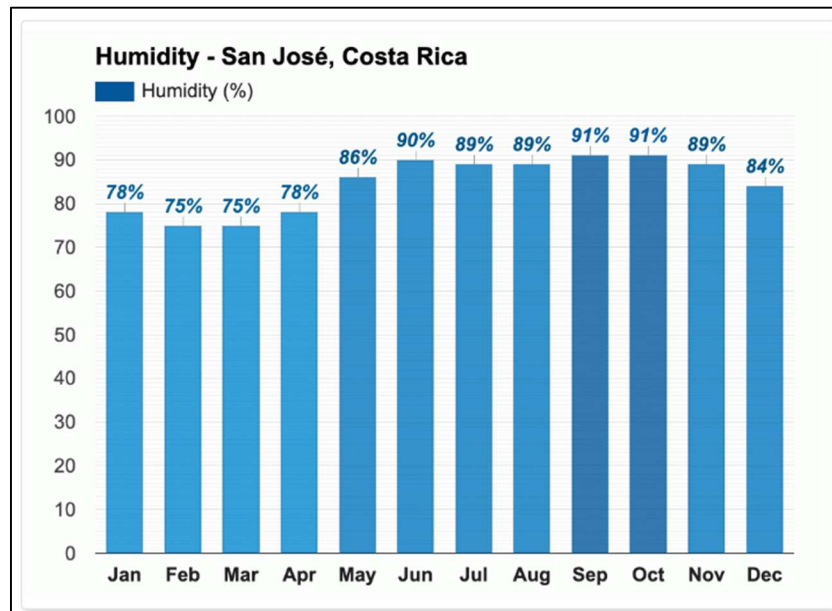
Debido a su altura de 1,172 msnm tiene un clima templado para todo el año. La temperatura media anual más alta está dentro del rango de 24,4 °C en diciembre y 26 °C en el mes más caliente que es abril, esto durante el día, los registros más bajos se dan en la noche y madrugada donde la temperatura puede descender hasta los 13,8 °C en el mes de enero, como lo muestra la **Figura 29**.

**Figura 29:** Temperatura media en San José



**Fuente:** (Weather Atlas, 2024)

Por su parte la humedad relativa (HR) varía extremadamente, se ha observado que en octubre se presenta la más alta, con un porcentaje de 91%. Por otro lado, febrero y marzo experimentan las más bajas, con un porcentaje aproximado de 75%. La **Figura 30** ofrece los valores de HR promedio registrados para cada mes.

**Figura 30:** Humedad relativa (HR) media en San José

**Fuente:** (Weather Atlas, 2024)

Por tanto, una vez analizada la anterior información la **Tabla 6** indica los valores de temperatura y HR que serán considerados para el desarrollo de la presente investigación. Se usan los valores más críticos registrados en algunos meses, que puede llevar a los equipos y sistemas utilizados dentro del proyecto a su operación bajo condiciones extremas y, por ende, consumos de energía reales.

**Tabla 6:** Valores medios de temperatura y HR de San José, considerados para el proyecto

Temperatura media máxima °C	Temperatura media mínima °C	HR media
26 °C	13,8 °C	Entre 75 y 91%

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

## Selección de un cultivo adecuado para la unidad experimental

Para la continuación de esta investigación se recurre a literatura y publicaciones relacionadas con el tema, además de experiencias implementadas por diferentes profesionales en la materia. La finalidad de esto es seleccionar un cultivo óptimo que se adapte y permita desarrollar el análisis de una manera sencilla y clara, al lector.

Utilizar un monocultivo adecuado permite plasmar los resultados y conclusiones de acuerdo con los objetivos previamente planteados; asimismo, estos pueden ser entendidos e interpretados.

Establecer criterios y condiciones es necesario para entablar un perfil de planta y realizar una selección adecuada. Se deben tomar en consideración aspectos como fenología del cultivo, variables agroclimáticas y fisiológicas que hayan sido anteriormente estudiadas por otras investigaciones y que estén disponibles para su uso. También son importantes otros criterios que permitan medir la rentabilidad económica, la eficiencia energética y cualquier externalidad consecuente.

En la **Tabla 7** se presenta un listado de criterios selectivos, que consideran lo antes planteado y que permitirán la realización de los objetivos mediante un cultivo específico.

**Tabla 7:** Criterios para la selección de un cultivo para la unidad experimental

Criterio	Descripción
1	Disponibilidad de información agronómicas, asociada a la fenología del cultivo.
2	Disponibilidad de información agroclimática.
3	Disponibilidad de fórmulas nutritivas y variables químicas del compuesto nutricional requerido.
4	Disponibilidad de información fisiológica.
5	Productividad de cultivos.
6	Demanda y preferencia de la población.
7	Valor nutricional.
8	Capacidad de adaptarse a sistemas hidropónicos.

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Una vez valorado el anterior listado, se establece como cultivo de referencia la lechuga (*Lactuca sativa L.*), por considerarse una de las hortalizas de mayor consumo de los costarricenses con alta susceptibilidad a plagas y enfermedades; por ello, se hace necesaria la búsqueda de nuevas técnicas de cultivo. Además, su alta demanda y producción prácticamente en todo el mundo, facilita el acceso a información referente a sus hábitos de crecimiento y así como a sus requerimientos.

Algunos tipos específicos como la lechuga Romana (*de nombre científico Lactuca sativa L. var. longifolia*) presentan las siguientes variables agronómicas relacionadas a su fenología: altura de 20 a 30 cm (porte alto), mayor longitud de tallo, alta producción de hojas largas, grandes y erguidas de verde intenso. En lo referente al peso fresco se reporta un promedio de 108 g y 167 g por planta de lechugas, en sistemas hidropónicos.

Se estima que la cosecha de esta hortaliza puede tardar entre 50 a los 75 días en sistemas hidropónicos NFT bajo ambiente protegido. Es importante destacar que primero se siembran las semillas en bandejas para conformar el almácigo, que tarda unos 25 DDS (días después de sembrado), posteriormente es traslado y trasplantado dentro de recinto protegido donde tendrá su desarrollo final, que puede tardar entre 25 a 40 DDT (días después de trasplantado).

Con relación al peso fresco, en sistemas orbitales bajo ambiente controlados, se han reportado lechugas con un peso promedio de 103,6 g en 60 días (este tiempo incluye DDS y DDT).

Continuando con el análisis de las variables agronómicas es importante resaltar el trabajo del ingeniero e investigador Gustavo Quesada Roldán de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, quien resalta que cuando la planta se encuentra en estado juvenil puede tener un aporte nutricional más elevado que cuando se encuentra al final del ciclo de vida y que la utilización de luz artificial hace que su metabolismo se modifique y acelere, lo que le permite producir mayor cantidad de vitaminas.

En la actualidad existe una tendencia mundial sobre el consumo de brotes tiernos conocido con el nombre de Baby leaf que básicamente es cosechar hojas jóvenes. Esta práctica beneficia la comercialización de las hortalizas, al aportar un valor agregado y una diferenciación del producto; asimismo, la elección de cultivares más precoces permite desarrollar más ciclos de cultivo y obtener más plantas anualmente.

Analizada toda la anterior información sobre el cultivo de lechuga Romano se instauran como referencia para este proyecto las variables fenológicas expuesta en la **Tabla 8**, ya que se consideran confiables y con respaldo científico.

**Tabla 8:** Variables Agronómicas, asociadas a la fenología para el cultivo de lechuga

Tipo de lechuga	Altura (cm)	Peso fresco promedio (g) en ambiente controlado	Crecimiento (días)	Cosechas en un mismo espacio
Romana ( <i>Lactuca sativa</i> <i>L. var.</i> <i>longifolia</i> )	20 a 30 cm	103,6 g	60 (25 DDS y 35 DDT)	10 (al año)

Fuente: Elaboración propia (2024)

Es importante indicar que cuando se habla de crecimiento en la **Tabla 8**, se hace referencia a 60 días que están divididos en 25 DDS y 35 DDT. Dado a que las plantas únicamente requieren permanecer por 35 días dentro del ambiente protegido, se puede establecer 10 cosechas durante el año en un mismo espacio, sin importar la estación y el clima.

También se debe considerar que los almácigos se traen con una edad de 25 DDS provenientes de viveros, preferiblemente que estén ubicados cercanos al proyecto. Lo anterior permite que mientras las plantas cumplen con la etapa de germinación en un vivero, otro lote al mismo tiempo desarrolla la etapa final dentro del cuarto de cultivo que acelera la producción. **La Figura 31** ofrece una lechuga de condiciones promedio (tamaño, peso, follaje y color).

**Figura 31:** Lechuga promedio

Fuente: (INFOJARDIN, 2023)

La existencia de información agroclimática de calidad indica los parámetros recomendados para el cultivo de lechuga. Normalmente se cultiva bajo climas frescos y la temperatura óptima para el correcto crecimiento está entre los 15 y 18 °C y temperaturas inferiores a 12 °C y superiores a 24 °C pueden limitar el crecimiento. Además, se requiere una HR de entre 60% y 80%.

Se debe destacar que los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración de las plantas son: la radiación, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. Un conocimiento de este fenómeno es fundamental para optimizar el consumo de agua y aumentar el rendimiento del cultivo, que contribuya, al mismo tiempo, al empleo adecuado del recurso hídrico.

Con respecto al consumo de agua de esta planta, existen registros científicos que indican que en cultivos convencionales se requiere 84 litros de agua para la producción de 1 kg de lechuga; esto es una estimación de la huella hídrica. También se accedió a otros registros de cultivares en ambientes protegidos, que establecen un consumo de 8,7 litros por lechuga, para sistemas hidropónicos de balsas; al considerar un peso promedio de 103,6 g por lechuga, se puede estimar un requerimiento de 83,97 litros de agua por 1 kg de lechuga.

En relación con las variables agroclimáticas, este proyecto hará uso de luz artificial por encontrarse en un ambiente cerrado. Debido a las ventajas que esta ofrece, con relación al proceso de fotosíntesis, se recurre a la tecnología LED, pues se determinó que es una tecnología moderna que reduce costos asociados al consumo eléctrico y sistemas de enfriamiento.

Según el anterior planteamiento, se recurre a trabajos científicos, que hicieron uso de dicha tecnología y se logra establecer una receta lumínica con resultados favorables y demostrados.

Por consiguiente y, de acuerdo con lo expuesto en el marco teórico sobre iluminación artificial para el desarrollo de plantas, se considera conveniente que el sistema de iluminación recurra a luminarias con características iguales o similares a la descrita en los siguientes puntos:

- 40 % de luces LED rojas (640 nm), 40 % de luces LED azules (470 nm) y 20 % de luces LED blancas.
- Un PPF (densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos) de entre 220  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a 300  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .
- Espectro lumínico (longitudes de onda) azules (470 nm) y rojas (640 nm).

- Fotoperiodo (que consiste en los ciclos de luz y oscuridad) de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.
- La ubicación de las plantas a 30 cm perpendicularmente de la fuente de luz.

Este modelo descrito combina luces azules, blancas y rojas, es importante indicar que, aunque la planta puede utilizar todos los fotones durante la fotosíntesis, incluidos los blancos, prefieren el rojo y el azul. La razón de incluir luz blanca en la combinación, radica en brindar comodidad a la hora de hacer labores o trabajos por personal dentro del módulo de cultivo.

Una vez explicadas cada una de las variables agroclimáticas, tomadas como referencia para este trabajo científico, que se resumen en la **Tabla 9**, se debe destacar que algunos valores como el requerimiento hídrico y la radiación PAR son referenciales únicamente. Esto, debido que en un mundo en evolución continua los fabricantes de equipos y la continua investigación permiten acceder a mejores productos para la horticultura, cada día.

**Tabla 9:** Variables agroclimáticas utilizadas como referencia para el proyecto

<b>Variables agroclimáticas para la lechuga (<i>Lactuca sativa L. var. Longifolia</i>)</b>			
<b>Temperatura óptima crecimiento</b>	<b>Requerimiento hídrico (litros/kg de lechuga)</b>	<b>Humedad relativa (HR)</b>	<b>Radiación PAR</b>
15 y 18 °C	83,97 litros por kg de lechuga	Entre 60% y 80%.	Entre 220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Otros valores o parámetros importantes de analizar, son las variables químicas que están estrechamente ligadas con la solución nutritiva. El análisis químico permite identificar diferentes aspectos como la concentración de nutrientes, presencia de iones, dureza y nivel de pH, entre otras.

El pH en la solución nutritiva afecta directamente la distribución y biodisponibilidad de los nutrientes para la planta; para la lechuga hidropónica se reportan valores óptimos que oscilan entre 5,5 y 6,5. Por su parte la temperatura y oxígeno disuelto en la solución son factores que están estrechamente relacionados, el rango adecuado recomendado de temperatura oscila entre 18 y 25

°C. Para la conductividad eléctrica (CE), que es el factor que representa la cantidad de iones disueltos en la solución, se recomiendan valores para este cultivo que oscilan entre 1,5 mS/cm a 2,5 mS/cm.

Dado lo anterior, la **Tabla 10** ofrece las variables químicas de referencia utilizadas, la información fue obtenida de diferentes fuentes literarias y estudios científicos que concluyeron con resultados positivos.

**Tabla 10:** Variables químicas para el compuesto nutricional en cultivo de lechuga

pH	Temperatura	Conductividad eléctrica (CE)
Entre 5,5 y 6,5	Entre 18 y 25 °C	Entre 1,5 mS/cm a 2,5 mS/cm

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Dentro de la cuantificación de los diferentes factores externos que afectan el desarrollo de la planta denominada lechuga, se examina información fisiológica de diferentes medios disponibles.

Se debe resalta que compuestos como el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) son esenciales para el proceso de fotosíntesis, la concentración de este en el aire, que rodea la planta, afecta su desarrollo. Al aumentarse esta, se incrementa la actividad fotosintética, que se refleja en un aumento del rendimiento y la producción.

Con base en estudios consultados, se ha demostrado que un enriquecimiento de CO<sub>2</sub> de entre 600 y 720 μmol/mol aumenta en un 37% el crecimiento de las plantas con respecto a un rango de 300 a 320 μmol/mol, considerado como la concentración atmosférica.

Está claro que la inyección de CO<sub>2</sub> en un ambiente de cultivo protegido tiene sus beneficios, pero también tiene sus inconvenientes, explica el experto Javier Torregrosa, con experiencia en temas de cultivos bajo ambientes controlados. Manifiesta que la inyección de CO<sub>2</sub> es costosa y delicada, un exceso de la misma puede ser tóxica y dañar las plantas. Este mecanismo se usa en cultivos que utilizan calefacción (en climas fríos) donde es permisible reinyectar el compuesto al

invernadero, de una manera económica, debido que es producido por la quema de combustibles fósiles.

Para una fácil comprensión, se debe resaltar que 1  $\mu\text{mol/mol}$  es equivalente a 1 ppm (partes por millón); esto permite relacionar las unidades que determinan la concentración de este compuesto.

De acuerdo con la anterior explicación el trabajo en desarrollo utiliza una concentración de entre 300 a 320  $\mu\text{mol/mol}$  (ppm) de  $\text{CO}_2$  dentro del módulo de cultivo, similar a la concentración atmosférica. Lo anterior debido a que manejar estos niveles mediante ventilación e intercambios de la masa de aire con el exterior, es factible de una manera económica; además, los resultados obtenidos en otras investigaciones, así como las recomendaciones, se consideran aceptables.

Para lo anterior será necesario hacer uso de un sistema de ventilación eficientes y evitar que los niveles puedan bajar a más de 100 ppm, lo que haría descender la actividad fotosintética y perjudicar al cultivo.

La **Tabla 11** ofrece la información de los niveles de  $\text{CO}_2$  que deben ser establecidos y mantenidos dentro del ambiente controlado en desarrollo, lo anterior mediante renovaciones de aire controladas por equipos de medición.

**Tabla 11:** Concentración de  $\text{CO}_2$  utilizada para el cultivo de lechuga en ambiente controlado

Concentración de $\text{CO}_2$	
Concentración dentro del módulo de cultivo	Concentración atmosférica de referencia
300 a 320 $\mu\text{mol/mol}$ (ppm)	300 a 320 $\mu\text{mol/mol}$ (ppm)

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Una vez establecidos los parámetros de referencia agronómicos, agroclimáticos, variables químicas y variables fisiológicas, se procede a la revisión de la productividad, que es otro criterio importante. Al hacer referencia a la productividad de este vegetal fresco, se refiere a la cantidad de producción por unidad de superficie, en función de la interacción entre el genotipo del cultivar y las condiciones ambientales.

Algunos cultivos tradicionales de lechuga en campo abierto reportan una media de producción de 1500,00 a 2000,00 cajas de 15 kilogramos por hectárea, lo equivalente de 22 500,00 a 30 000,00 kg/ha. Se hace énfasis que en cultivares del tipo Romana, el promedio asciende a

3000,00 cajas o sea 45 000,00 kg/ha aproximadamente. En sistemas de cultivo modernos que hacen uso de ambientes protegidos como invernaderos y sistemas hidropónicos estos valores se establecen en términos de densidad, al indicar valores de entre 22 a 24 plantas/m<sup>2</sup>.

Con relación a la demanda y la preferencia del cultivo, se destaca que, en el caso particular de Costa Rica, se reportan más de 2000 fincas dedicadas a la producción; Cartago es la provincia con mayor área sembrada. Es una de las hortalizas de mayor consumo en la dieta de las personas y representa una importante fuente de ingresos y empleo. Anualmente el consumo va en aumento, lo que hace necesario la inversión constante en técnicas modernas de cultivo. El uso de ambientes protegidos, sistemas hidropónicos y otras herramientas permiten la mejora continua del producto, de acuerdo con la demanda y la exigencia del consumidor.

La lechuga es un alimento de suma importancia para la población, por su alto valor nutritivo y porque aporta minerales como: hierro, potasio, calcio y vitamina A, B y C.

Finalmente, condiciones de cultivo como su tamaño adaptable a áreas pequeñas, rapidez de cosecha, facilidad para destacar valores agregados que le pueden dar mayor atractivo a un proyectos, alta demanda, valor nutricional e información científica disponible, hacen de la lechuga la hortaliza ideal para alcanzar los objetivos planteados en esta pesquisa científica. Lo anterior no significa que esta metodología no pueda ser empleada en otras plantas que den frutos como el tomate o el chile, solo que estas plantas requieren de utilizar mayor área en su desarrollo.

### Selección de la técnica para el cultivo en la unidad experimental

Un sistema de cultivo apropiado facilita la producción de hortalizas y permite hacer manejable el crecimiento y desarrollo.

A menudo, la técnica empleada influye en el aumento de la producción, mejora la calidad, permite que el espacio disponible pueda utilizarse de forma eficiente y reduce costos de mano de obra.

Inicialmente, se identificaron las necesidades y se establecieron criterios para la escogencia de la técnica de cultivo empleada; esta debe contar con un mecanismo que facilite el cuidado sin afectar el rendimiento y desarrollo de las plantas.

En la **Tabla 12**, se presenta una serie de criterios analizados que dieron parte a la escogencia de dicha técnica dentro de esta investigación.

**Tabla 12:** Criterios para la selección de la técnica de cultivo en la unidad experimental

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
1	Eficiencia energética.
2	Bajo impactos ambientales y aprovechamiento de los recursos naturales.
3	No utilizar suelo.
4	Aprovechamiento del espacio dentro de áreas urbanas.
5	Aumento del rendimiento y la productividad.
6	Utilización de energía limpia de manera eficiente.
7	Bajo costo económico en la producción de alimento.
8	Capacidad de producir en cualquier época del año.
9	No utilizar agroquímicos para el control de plagas y enfermedades.

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Se plantea una práctica agrícola moderna que permita el fácil acceso a los alimentos sanos y limpios. Posterior a una revisión del estado del arte, se propone usar un sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) o de película de nutriente multiniveles, por considerarse ideal para el cultivo de lechugas, hierbas y otras hortalizas de hojas, además de aprovechar el agua mediante la recirculación y masificar el uso del espacio disponible.

En este método en particular las raíces se sumergen en una solución de nutrientes, en lugar de ser cultivadas en el suelo. Su desarrollo es mediante canales inclinados, por donde circula la mezcla nutritiva y que están dotados de una entrada y salida que facilita la recirculación del líquido. Encima de la canaleta se coloca una bandeja con agujeros donde las plántulas son introducidas para su desarrollo mediante el sustrato que les ofrece soporte.

Tanto la canaleta como la bandeja están soportadas sobre un bastidor metálico o rack en diferentes niveles, cada nivel de cultivo dotado de tuberías y válvulas, que permitan realizar un flujo controlado del compuesto nutricional.

Los sistemas NFT requiere de un monitoreo de la solución nutritiva de manera continua, la medición de variables como el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica (CE), son fundamentales en el correcto funcionamiento del sistema y el desarrollo de las plantas.

La teoría identifica que un pH óptimo mantiene los nutrientes disponibles y de forma balanceada, mientras que la CE es un factor que representa la cantidad de partículas que están disueltas; cuanto mayor sea la cantidad de estas, mayor es el gasto de energía por parte de la planta, en el momento de la absorción.

Para el mejor aprovechamiento del espacio, se instaura el uso de niveles múltiples en orden vertical o multiniveles. Se recurre a esta topología, por permitir la siembra de mayor cantidad de plantas en un área reducida; al aprovechar el espacio, la productividad aumenta. Está demostrado que, mediante el aprovechamiento del espacio vertical, la producción aumenta en cantidad de plantas, se habla de hasta entre 20 y 30 veces más que en sistemas abiertos tradicionales.

Sumado a lo anterior, la versatilidad que ofrece la configuración en niveles contenidos, dentro de un módulo, da paso a que el proyecto pueda ser instalado en cualquier ubicación de la ciudad.

Se destaca que una producción de vegetales ubicada cerca de la población, ofrece una condición favorable con una menor dependencia del transporte. Se reduce el consumo de combustibles contaminantes fósiles, costos de logística y facilita aspectos como oferta y demanda del producto fresco recién cultivado.

Es conveniente denotar que la técnica NFT, manejada en ambiente controlado, no hace uso de agroquímicos fitosanitarios de origen químico, para el control de enfermedades y plagas; la intención es ofrecer vegetales limpios y saludables. Lo anterior es posible gracias al empleo de un sistema de producción agrícola cerrado y artificial, donde todas las variables que afectan el desarrollo del vegetal son controladas por medios automatizados, con base en una receta previamente establecida, ya probada.

Un ambiente cerrado permite el uso de luz artificial, para satisfacer la necesidad de las plantas e influye para que su metabolismo se modifique, se acelere y produzca más vitaminas.

La iluminación LED es esencial para mejorar la fotosíntesis en los cultivos, lo que se traduce en plantas más saludables y productivas. Además, ofrece la posibilidad de cultivar en cualquier época del año e incluso en lugares donde el clima es demasiado frío o cálido. La posibilidad de cultivar todo el año y en cualquier clima es fundamental para un abasto confiable de alimentos.

Es importante mencionar que el módulo de cultivo o unidad, que se experimenta, utiliza agua y energía eléctrica, que es ambientalmente favorable. Esto, dado que en Costa Rica más del 99% de energía eléctrica utilizada proviene de fuentes renovables como la hidroeléctrica, geotérmica, eólica, solar y biomasa.

Una vez evaluados cada uno de los criterios, de manera parcial y, con fundamento en la teoría disponible, se destaca a la agricultura vertical mediante un sistema hidropónico tipo NFT en ambiente controlado, como una técnica moderna que permitirá el análisis de los objetivos que se estudian en este trabajo científico.

### Componentes requeridos para la producción de vegetales bajo ambiente controlado

Una vez conocidos los aspectos fundamentales, como el tipo de cultivo y las variables necesarias para obtener el rendimiento y la productividad, se buscan soluciones de agricultura vertical de interior con equipos y sistemas apropiados, para controlar las variables en el cultivo de lechuga; se hace uso de la experiencia e investigación que han aplicado estas herramientas y que logran buenos resultados.

La combinación de ingeniería y de aspectos biológicos permiten soluciones integrales de cultivo hidropónico vertical dentro de interiores. Los ambientes controlados de producción también son conocidos como fábricas de alimentos, debido a que reemplazan extensas superficies de cultivo tradicionales por una estructura de cultivo con una producción de hasta diez veces mayor que una granja tradicional.

Una vez analizados varios diseños de fábricas de plantas automatizadas, que pueden adaptarse a las necesidades del proyecto, se opta por la utilización de los sistemas y equipos descritos en la **Tabla 13**. Se considera siempre la búsqueda de factores como el rendimiento a un bajo costo y la capacidad de producir durante todo el año.

**Tabla 13:** Componentes requeridos para la producción de vegetales bajo ambiente controlado

<b>Sistemas y equipos requeridos</b>	
1	Cuarto de cultivo sellado y estructura para la distribución.
2	Iluminación LED para horticultura.
3	Sistema de climatización, control de temperatura y humedad relativa (HR).
4	Sistema de para riego hidropónico con solución nutritiva con control de pH, CE e inyección de oxígeno (O <sub>2</sub> ).
5	Centro de carga, protecciones e instalación eléctrica.

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Cada uno de los factores que se van a controlar por medio de los sistemas planteados, por sí solos no determinan si el rendimiento será óptimo. La interdependencia e interacción, entre ellos, es lo que domina el comportamiento; es importante considerar, dentro del sistema, la optimización, para una mayor producción.

### **Módulo de cultivo y estructura vertical**

Como módulo de cultivo se implementará el uso de un contenedor de carga tipo refrigerado de 40 pies conocido también con el nombre de contenedor Reefer.

La capacidad o volumen útil de estas unidades es de 57,76 m<sup>3</sup>, y pesan, vacíos, 4 889,00 kg.

Sus dimensiones internas expresadas en sistema internacional corresponden a 11,48 metros de largo x 2,26 metros de ancho x 2,18 metros de alto. Es un tipo de contenedor creado con la finalidad de transportar mercancías que necesitan estar a bajas temperaturas, congeladas o mantener un control de su atmósfera interior. Ofrecen condiciones que permiten mantener temperaturas bajas o constantes dentro de la unidad durante un traslado, mediante la utilización de

un aislamiento térmico que impide que los cambios de temperatura del exterior afecten la del interior.

Se pensó en implementar una de estas unidades dotadas de aislamiento, en el proyecto, debido a su facilidad de mantener la temperatura en el interior; se disminuyen en costo y tamaño del sistema de climatización, lo que provoca ahorro de energía.

De acuerdo con la investigación de mercado, estas unidades usadas se consiguen con un costo de **US\$ 4200,00**. El monto no incluye el equipo de refrigeración en este trabajo, ya las plantas por cultivar tienen otros requerimientos de temperatura. Otro aspecto importante de considerar es la reutilización de estos contenedores, ya que se les amplía la vida de uso y se reduce la emisión de desechos al medio ambiente.

Se debe resaltar que se usa como referencia un coeficiente de transmisión térmica menor a  $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  para el aislamiento; de acuerdo con la literatura, este debe estar dentro de ese rango para cultivos, en ambientes controlados. Los espesores de los aislamientos en las paredes de los contenedores pueden variar según el uso para el que originalmente fueron diseñados y, por tratarse de un material que se reutiliza, es importante contemplarlo durante su adquisición. Un valor de conductividad pequeño, en un material, refleja que su conductividad es reducida, al ser un material apto para ser usado como aislante.

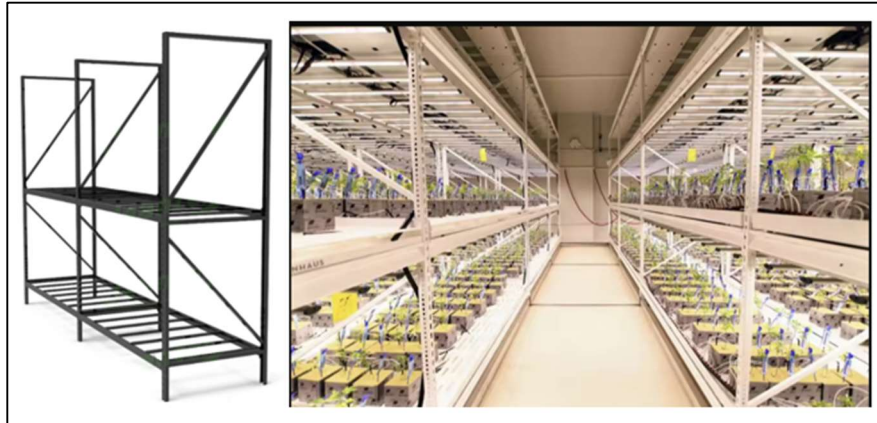
Dentro del área de cultivo hermética es necesario colocar una estantería modular que define cada nivel de cultivo soportando la canaleta y la bandeja que contienen las plantas en desarrollo; esto también es conocido con el nombre de rack o bastidor.

Cada estante debe contar con una pendiente de entre 1% y 3% y la longitud de los canales no debe exceder los 18 metros. Además, se debe respetar para la correcta oxigenación y flujo de la solución de nutrientes. Los racks se ajustan a las medidas internas del contenedor, sus dimensiones son 90 cm de ancho y una altura no mayor a 2,18 m.

Se consultó a un proveedor de este tipo de estructuras modulares y el precio varía según el material de fabricación y el acabado. Un set construido con acero galvanizado tiene un costo de **US\$2 200,00** y son necesarios 2 set completos; de esta manera, el costo total asciende a **US\$4 400,00**.

En la **Figura 32** se puede ver el tipo de estantería que se emplea para poder trabajar con multiniveles de cultivo, es una estructura modular que soporta la canaleta y la bandeja.

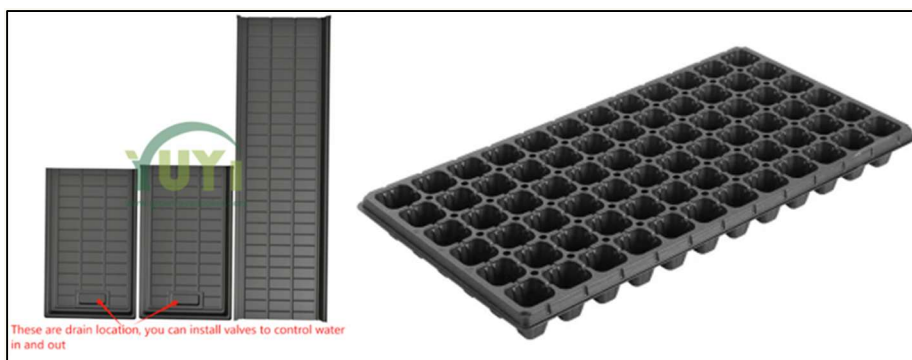
**Figura 32:** Estantería empleada para cultivos verticales (multinivel)



**Fuente:** (Yuyi Tecnología , 2024)

Una vez conocido el tipo de módulo (contenedor) que define el cuarto de cultivo y las estructuras empleadas, se analiza el canal de recirculación de la solución nutritiva y a la bandeja de cultivo, que se muestra en la **Figura 33**.

**Figura 33:** Canales recirculación y bandejas de cultivo para hidroponía NFT



**Fuete:** (Yuyi Tecnología , 2024)

Tanto las canaletas como las bandejas, son fabricadas de acrilonitrilo butadieno estireno, que es un material termoplástico también conocido como ABS y tienen una vida útil de hasta cinco años, de acuerdo con un fabricante consultado.

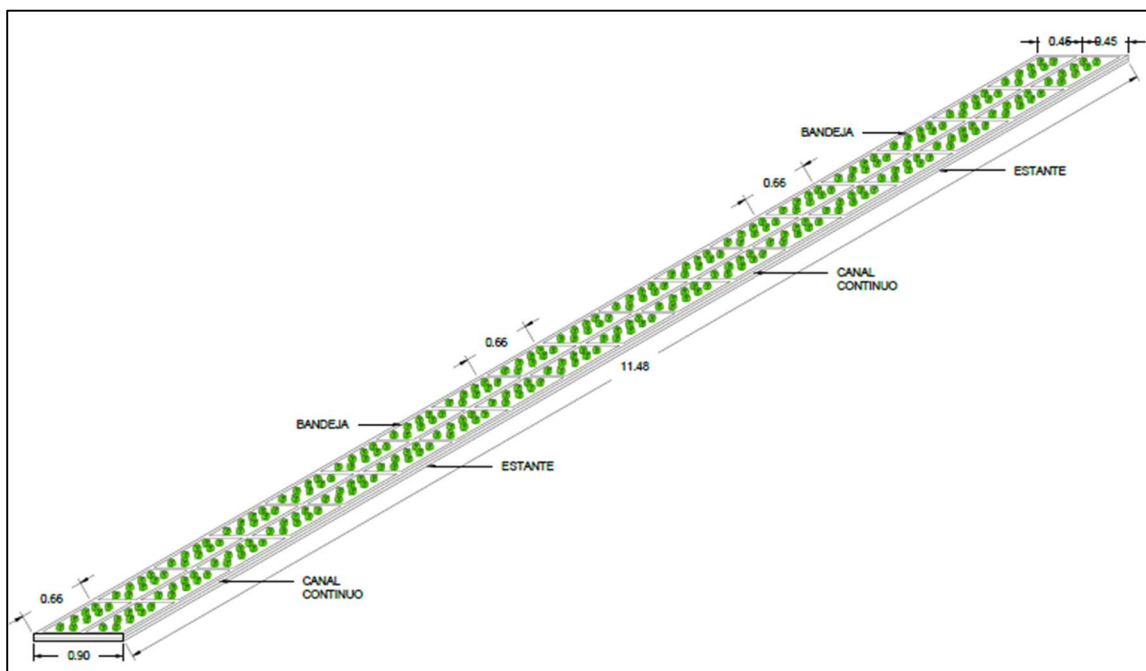
El canal o canaleta, como tal, es continuo y se provee en secciones para su fácil armado, también cuenta con entrada y salida respectivamente que permite recircular la disolución de elementos nutritivos. Se solicitó su fabricación con medidas especiales para ser adaptado al proyecto, con un ancho de 90 cm y una longitud acorde con la del contenedor.

Dicho canal debe ser capaz de albergar 2 bandejas de cultivo, cada una de 45 cm de ancho por 66 cm de largo, con una capacidad de 8 plantas por bandeja, como se aprecia en la **Figura 34**.

Se debe denotar que el conjunto de canal continuo y bandeja se adquieren con medidas especiales requeridas para el aprovechamiento del espacio disponible. De acuerdo con un proveedor consultado, un set compuesto de una distancia cercana a 12 metros de canoa con espesor de 4 mm y 36 bandejas con 3,5 mm de espesor, tiene un costo de US\$460,00.

Según la anterior información dotar todo el proyecto de canaleta y bandejas tiene un costo total de **US\$3 680,00** lo que incluye 92 metros de canal y 288 bandejas.

**Figura 34:** Colocación de la canaleta y la bandeja de cultivo



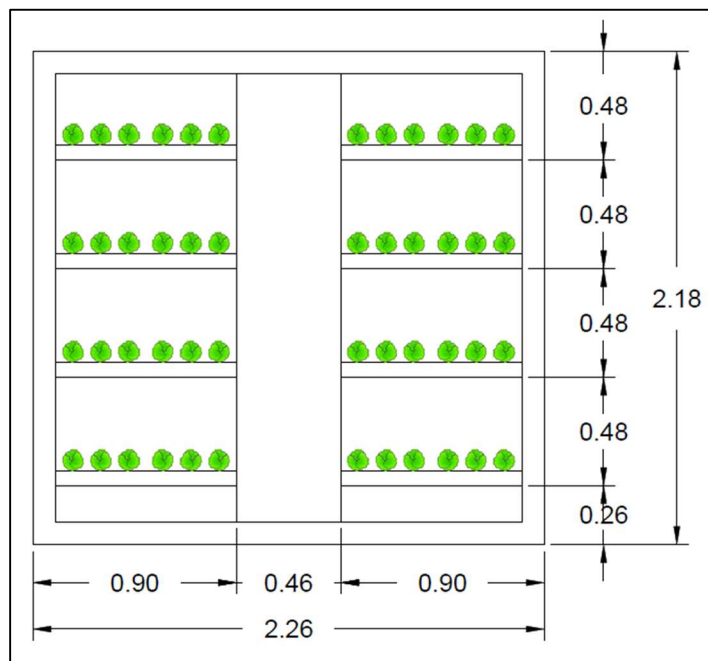
**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Importante acotar que, para establecer la distribución de las plantas sobre el área de cultivo, se utilizó un trabajo científico desarrollado con lechuga Romana, en Panamá, en el año 2023, información que está incluida en la sección del marco teórico; de igual manera, para obtener las características especiales en los canales y las bandejas, se usó el trabajo en mención.

Conociendo que se utilizan un total de 288 bandejas y que cada una tiene capacidad de 8 plantas de lechuga, se puede establecer que la producción total corresponde a **2304,00 unidades de lechuga cada 35 días**.

En la **Figura 35** se puede apreciar, a manera de resumen, las dimensiones internas del contenedor, asimismo la colocación de los bastidores. Se contempla un pasillo para trabajos de mantenimiento de 46 cm al centro del módulo.

**Figura 35:** Configuración interna del cuarto de cultivo



**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Es trascendental aclarar que las investigaciones consultadas reflejan que, en cultivos de hojas con alturas no mayores a 30 cm, como es el caso de la lechuga Romana, la distancia entre niveles debe ser de 40 cm, como mínimo. Hay que considerar también la colocación de las luces

LED, que se sujeta en el contra nivel superior, que además de restar espacio necesita de una altura considerada para que la iluminación sea suficiente.

Conforme con lo anterior y para poder trabajar con la mayor cantidad de niveles, se optó por usar una separación entre estos, de 48 cm, al contemplar el espesor de cada estante, correspondiente a 6,5 cm; el primer nivel se coloca a 28 cm del nivel de piso, al aprovechar el espacio muerto.

Se debe recalcar que este trabajo de investigación no es un diseño como tal de un módulo de cultivo con ambiente controlado. Sin embargo, es necesario la revisión de todas las variables antes descritas, mediante las herramientas disponibles, para la extracción de información que la investigación requiere.

### **Iluminación LED para horticultura**

Al tener un sistema cerrado se vuelve inevitable el uso de luz artificial, como fuente de energía, para las plantas. Además, es importante considerar que en zonas urbanas los edificios tienden a generar sombra sobre los vecinos, lo que comprometería la producción si se dependiese de la luz natural.

Anteriormente se indicó la implementación, en este trabajo, de la tecnología LED como herramienta esencial para mejorar la fotosíntesis en el cultivo lechuga Romana. La escogencia de este tipo de luminaria moderna, se debe a que reduce costos de consumo eléctrico y no desperdicia energía, al transformarla en calor; esto la hace altamente eficiente y permite plantas más saludables y productivas.

Al inicio de esta sección se estableció una receta lumínica extraída de trabajos científicos afín, bajo la cual se solicitó recomendación a la empresa Ball Horticultura Company para identificar un accesorio con un desempeño similar. Esta compañía es representante de la marca PHILIPS y cuenta con experiencia en proyectos de este tipo en países como Colombia.

Después de analizada la distribución de las plantas en el cuarto de cultivo y el requerimiento lumínico, se recomienda utilizar la iluminaria GreenPower LED production module 3.0, modelo GPL PM 210 DRW LB L150 de la marca PHILIPS (ver **Anexo E**).

Este modelo, en específico, ha sido desarrollado para mejorar los resultados y la eficiencia en cultivos multicapa de lechuga y otras verduras de hoja verde. Los módulos estándar de encendido y apagado vienen con fórmulas de luz probadas.

Se debe destacar que la potencia térmica o cantidad de energía que se disipa en calor no sobre pasa el 18% de la energía consumida. Además, el arreglo de colores rojo, azul y blanco provisto en esta luminaria, han generado alta satisfacción entre los usuarios y la han convertido en el modelo más vendido. Hay que dejar claro que la luz blanca roba eficiencia, sin embargo, es requerida dentro del área de producción durante tiempos prolongados de trabajos de mantenimiento. En un área pequeña como la que abarca este proyecto, la diferencia en eficiencia energética, debido al uso de luz blanca, no es significativa, mientras que en un cultivo de grandes dimensiones sí lo es.

De acuerdo con la explicación brindada en el capítulo del marco teórico, las plantas pueden utilizar todos los fotones (blanco, amarillo y verde), sin embargo, el rojo y el azul son los mejores espectros de luz para la fotosíntesis.

La iluminaria presenta las siguientes proporciones de colores por lámpara: 72% de rojo (R), 18% de blanco (W) y únicamente un 10% de azul (B). Estos porcentajes difieren a los indicados en la fórmula que originalmente se pensó utilizar, sin embargo, han sido considerados en el trabajo de investigación, debido al respaldo basado en experimentación e investigación con el que goza un producto de esta índole, además de haber sido ya probado en granjas con resultados favorables. Cabe resaltar que todos los demás parámetros de la fórmula lumínico original se mantienen, entre ellos el fotoperiodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad.

Esta investigación establece utilizar la iluminación artificial, en su mayoría, durante horas nocturnas, debido a que la diferencia térmica entre el interior y el exterior es menor durante este periodo. Esto favorece a disipar la carga térmica producto de las lámparas y el costo de algunas tarifas eléctricas, que es mejor durante estas franjas horarias.

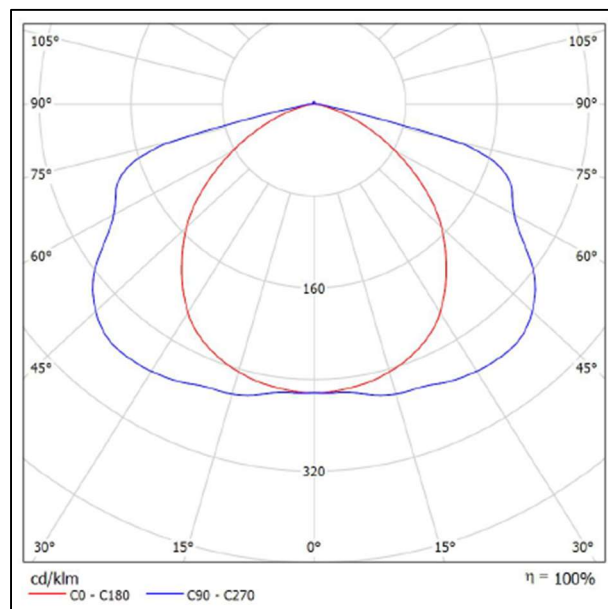
En la **Tabla 14** se brinda las especificaciones técnicas de la iluminaria GreenPower que será implementada en el desarrollo de la investigación.

**Tabla 14:** Descripción técnica de luminaria LED GreenPower

<b>Luminaria LED para horticultura</b>	
Modelo	GPL PM 210 DRW LB L150
Marca	PHILIPS
Combinación de colores	72% (Rojo), 18% (Blanco) y 10% (Azul)
Potencia nominal máxima	79 W
Potencia térmica	18 %
Alimentación	120 VAC, 1 fase, 60 Hz
Flujo de fotones Típ.	210 $\mu\text{mol/s}$
Longitud	1500 mm
Vida promedio	36 000 horas

**Fuente:** (Signify Holding, 2019)

En la **Figura 36** se muestra el gráfico de intensidad luminosa que permite visualizar la distribución. La distancia de cualquier punto de la curva al centro indica la intensidad luminosa de esa fuente en esa dirección. Se estima que cada iluminaria está instalada a una altura de 41,5 cm sobre la superficie de cultivo.

**Figura 36:** Gráfico de intensidad luminosa para modelo GreenPower

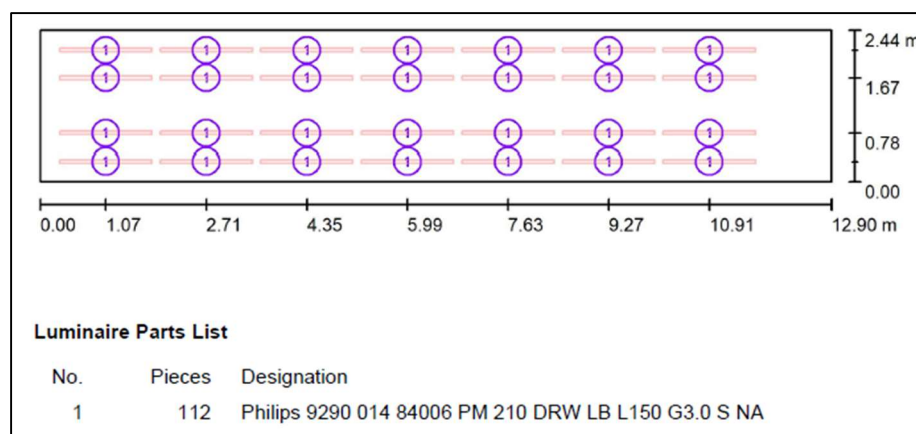
**Fuente:** (Ball Seed Company, 2024)

De acuerdo con el uso del programa DIALux se determina que la cantidad de luminarias requeridas, en relación con el área de cultivo y la manera en que están estructurados los niveles, corresponde a 14 unidades por cada estante o línea de cultivo; esto representa 28 módulos idénticos distribuidos por nivel. Al conformarse el proyecto de cuatro niveles de cultivo, son necesarias un total de 112 luminarias con un costo de **US\$26 100, 00**; dicho monto incluye los accesorios necesarios para la instalación (ver **Anexo F**).

El encendido y apagado de las luces se realiza por medio de un temporizador análogo con un costo de **US \$10,00** en el mercado. Este accesorio permite múltiples eventos on/off por día, se repite cada 24 horas y necesita de una alimentación de 120V, 1 fase, 60 Hz, 15 A y un consumo de 1875W (ver **Anexo N**).

En la **Figura 37** se indica la distribución de las luminarias en cada nivel de cultivo; se necesita de 14 unidades por cada estante, lo que representa 28 luminarias por nivel.

**Figura 37:** Distribución de luminarias en área de cultivo



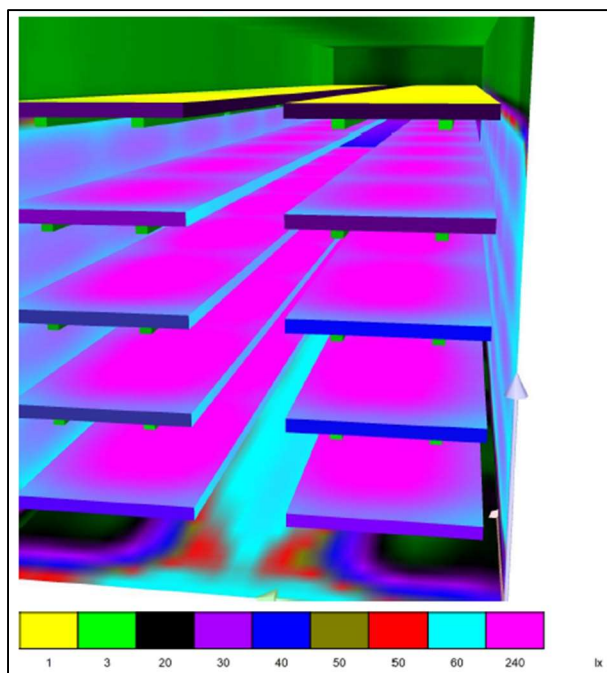
**Fuente:** (Ball Seed Company, 2024)

Según el comportamiento de la fuente de luz artificial, en la ficha técnica del modelo en referencia, se manifiesta que cada lámpara requiere de 79 W (ver **Anexo G**); al multiplicar esa potencia por las 112 unidades, se obtiene una carga total instalada por iluminación de 8,84 kW.

Como último punto, en la **Figura 38** se puede observar la representación de colores falsos que proporciona el programa DIALux. Esto permite ver la difusión de la luz para confirmar su

homogeneidad y es importante para asegurar que no queden zonas sin iluminar dentro del espacio de cultivo.

**Figura 38:** Representación de colores falsos dentro del cuarto de cultivo



**Fuente:** (Ball Seed Company, 2024)

### **Sistema de climatización, control de temperatura y humedad relativa (HR)**

La investigación en desarrollo requiere climatizar en interior del cuarto de cultivo para crear condiciones de temperatura y humedad específicas, recomendadas para el desarrollo de la planta de lechuga.

Inicialmente se recurre a publicaciones y literatura, relacionados, que describen los equipos necesarios para proveer las condiciones agroclimáticas al módulo de cultivo. De conformidad con lo anterior se resuelve hacer uso de los siguientes elementos:

- Una unidad de aire acondicionado, que es el sistema encargado de controlar la temperatura y el exceso de humedad en el aire, dentro del cuarto de cultivo.

- Extractores y ventiladores para mantener un intercambio de aire entre el interior y el exterior de la cámara. Se permiten renovaciones de la masa de aire y se colabora con mantener el nivel de CO<sub>2</sub> dentro del rango permitido.
- Sistema de control de insectos y plagas (mallas y lámparas anti mosquitos).
- Un higrómetro para medir la humedad en aire y determinar si se necesita humidificar o un deshumidificar.
- Un termómetro, cuya función es medir la temperatura del aire y asegurarse que está en el rango adecuado.
- Un Medidor de CO<sub>2</sub>, para verificar que el nivel esté dentro del rango requerido (niveles atmosféricos).

### Unidad de aire acondicionado

La mejor manera de controlar el ambiente en un cuarto de cultivo es mediante el uso de dispositivos de aire acondicionado; estos regulan la temperatura y la humedad de manera automática conforme con parámetros pre establecidos.

Para iniciar con el dimensionamiento de la unidad de aire acondicionado del proyecto, se vuelve necesario analizar la información de la **Tabla 15** donde se muestran los valores medios de temperatura y HR anuales en la ciudad de San José y las condiciones requeridas dentro del contenedor para el cultivo de la lechuga. La tabla destaca una HR de 75 %, como la más baja que se reporta durante el año. Este valor está dentro del rango requerido para el desarrollo del cultivo en cuestión (entre 60 y 80%) y es el más bajo reportado durante el año. Al estar distante del límite inferior permisible, se determina que no es necesario utilizar un equipo de humidificación en el proyecto, debido a que esta condición se regula por sí sola, mediante las renovaciones controladas de la masa de aire que tendrán lugar dentro del recinto. También se debe considerar el proceso de evapotranspiración de las plantas, en el cual el aire interno del recinto absorbe el vapor de agua que estas producen.

El no requerimiento de un equipo deshumidificador, es exclusivamente para este proyecto y para las condiciones climáticas presentes en la ciudad de San José, donde la humedad se mantiene alta durante el año. Para un eventual traslado del módulo de cultivo a otra ubicación geográfica,

donde las condiciones climáticas son diferentes, será necesario reconsiderar la implementación de este equipo y dimensionarlo para dichas condiciones.

**Tabla 15:** Condiciones externas existentes e internas requeridas

<b>Variables</b>	<b>Condiciones internas (dentro del contenedor)</b>	<b>Condiciones externas (ciudad de San José)</b>
Temperatura	18 °C	Entre 13,8 y 26 °C
Humedad relativa (HR)	Entre 60 y 80%	Entre 75 y 91 %
Altura m s. n. m.	1172	1172

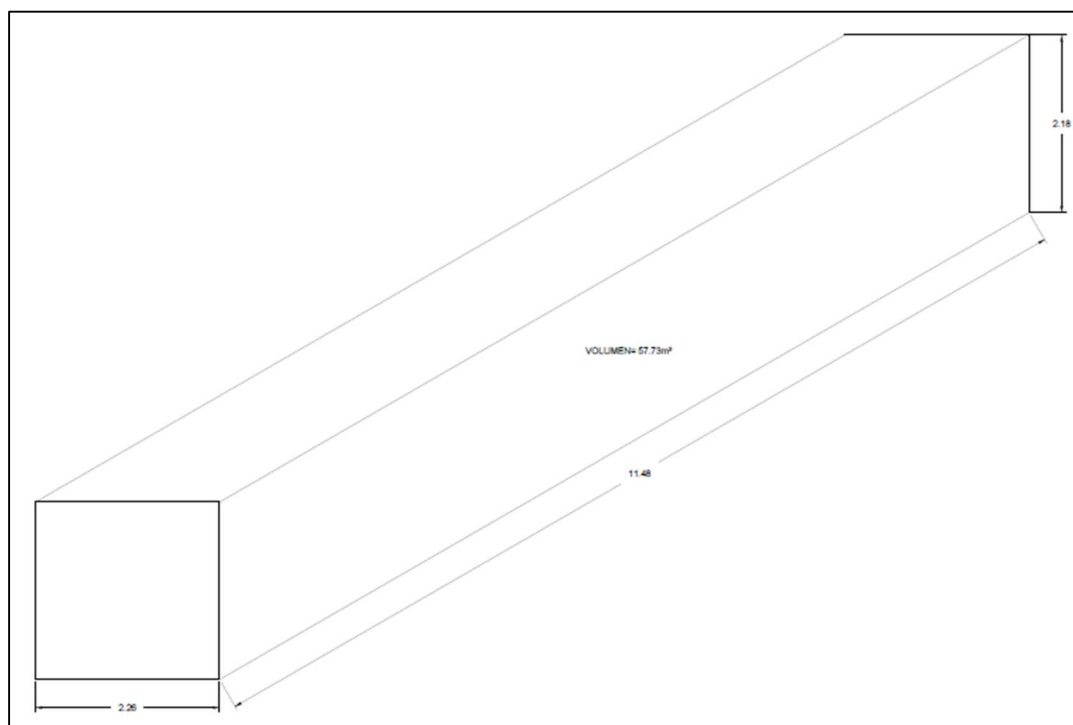
**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Es necesario tomar en consideración el escenario donde la humedad interna del aire sobrepase el 80%, que será frecuente debido a los intercambios con el exterior. Bajo esta condición, el aire acondicionado actúa como un sistema deshumidificador, al secar el exceso de humedad y ayudar a mantenerla en el nivel de confort requerido por las plantas (HR no mayor al 80%).

De acuerdo con lo anterior es conveniente realizar un correcto dimensionamiento de la unidad de aire acondicionado. Esta debe cumplir con la exigencia requerida y evitar el funcionamiento continuo o desproporcionado que tendría un impacto directo en el consumo eléctrico, que no es conveniente para la búsqueda de la factibilidad de este proyecto.

El análisis que se presenta a continuación, toma los datos reunidos en la **Tabla 15** y las dimensiones internas del cuarto para determinar el área por climatizar y la capacidad del equipo por instalar (ver **Figura 39**).

**Figura 39:** Dimensiones internas del área por climatizar



**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Es importante contemplar las recomendaciones científicas relacionadas con cuartos de cultivo con ambientes controlados, que hablan de un coeficiente de transmisión térmico menor a  $0,15 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  para paredes, techos y pisos. De acuerdo con lo anterior, las paredes del contenedor deben ser térmicamente aisladas; además, se consultó la ficha técnica de un fabricante de aislamientos. En esta se establece que para un espesor de panel de poliuretano de 140 mm el coeficiente de transmisión térmico correspondiente es de  $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ , lo que cumple con la recomendación antes descrita (ver **Anexo I**).

Se debe destacar que el coeficiente de transmisión térmico en el Sistema Internacional (SI) se mide en unidades  $\text{W/m}^2\text{K}$  o en  $\text{W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$ , que son unidades equivalentes. Para el cálculo de la carga térmica este trabajo hace uso del método CLTD, descrito en el marco teórico y tomado del manual de ASHRAE del año 1997, debido a que sus resultados presentan un margen de error aceptable y el procedimiento para el cálculo son pasos secuenciales fáciles de comprender por el lector.

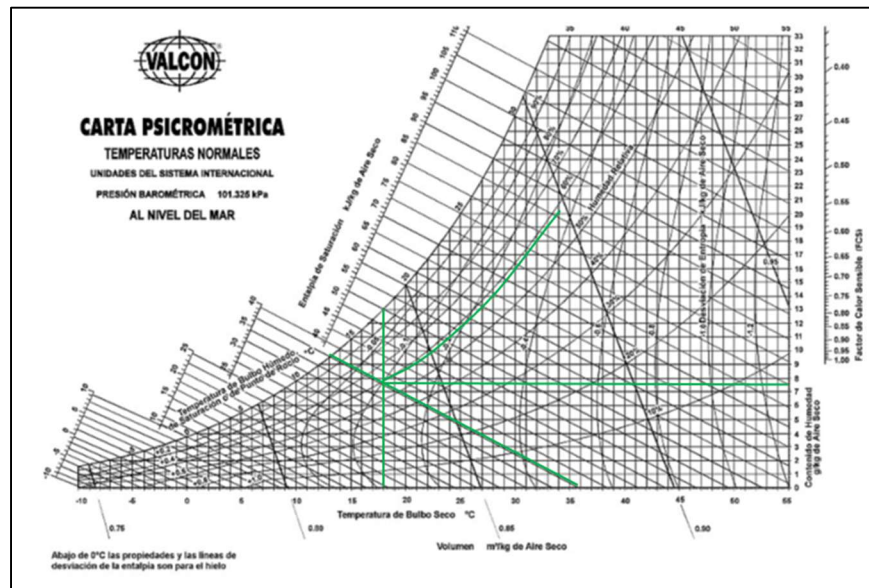
Se considera necesario plantear dos escenarios para el cálculo de la carga térmica, debido a que la temperatura media en San José varía entre el día y la noche. Los valores más bajos se registran durante la noche, lo que hace ideal este horario para conectar la carga correspondiente a la iluminación. La diferencia térmica nocturna generada entre el interior y exterior del módulo favorece a disipar el calor producido por las lámparas, lo que se traduce en un ahorro de energía eléctrica.

La tecnología LED empleada, únicamente convierte en calor el 18% de la energía consumida, por lo que la pérdida es baja y los escenarios son los siguientes: cálculo de la carga térmica con la iluminación LED activa y cálculo de la carga térmica con la iluminación LED apagada.

**a) Cálculo de la carga térmica con la iluminación LED activa**

- Comprende un periodo 16 horas distribuidas en 12 horas de noche y 4 horas de día.
- Empleando el formulario descrito en el **Anexo H**, se recopila la información requerida para los cálculos donde:
  1. La temperatura de bulbo seco (TBS<sub>máx.</sub>) corresponde a 18 °C (**Tabla 15**, temperatura media considerada para este periodo).
  2. La temperatura de bulbo húmedo (TBH) correspondiente a la anterior es 13,8 °C.
  3. Aplicando la carta psicométrica se obtiene: 59% de HR y el un contenido de humedad (w) correspondiente a 7,5 g<sub>w</sub>/kg<sub>a</sub>, (ver **Figura 40**).

**Figura 40:** Uso de carta psicrométrica (caso con iluminaria LED activa por 16 horas)



**Fuente:** (Henríquez Granados , Orellana Mejía, & Rosa Chávez , 2016)

4. Se identifica la temperatura ambiente diaria denominada RANGO y correspondiente a 16 °C (Tabla 15).
5. Se identifica la temperatura interior ( $t_r$ ) correspondiente a 18 °C (Tabla 15).
6. Se calcula la temperatura media ( $t_m$ ) con la fórmula del Anexo H.

$$t_m = TBS_{m\acute{a}x.} - (RANGO / 2)$$

$$t_m = 18 \text{ °C} - (16 \text{ °C} / 2)$$

$$t_m = 10 \text{ °C}$$

Se recurre a una temperatura media única para los segmentos de noche y de día, en lo que los LED están encendidos, lo anterior debido a que las 4 horas del día en que los LED funcionan son horarios cercanos a la noche. Por ejemplo, entre las 16:00 y las 18:00 horas y entre las 06:00 y 08:00 horas. En estos horarios aún se mantiene la temperatura baja, que favorece, además, la sombra de los edificios y demás condiciones de la ciudad.

7. Una vez identificados todos los datos necesarios, se determina que la carga térmica corresponde a 2 377,27 W, en el periodo que están encendidas las luminarias LED. Para el anterior cálculo se empleó de la **Tabla 16**, que es una herramienta dinámica, elaborada de acuerdo con el método CLTD.

**Tabla 16:** Cálculo de carga térmica con iluminaria LED activa 16 horas

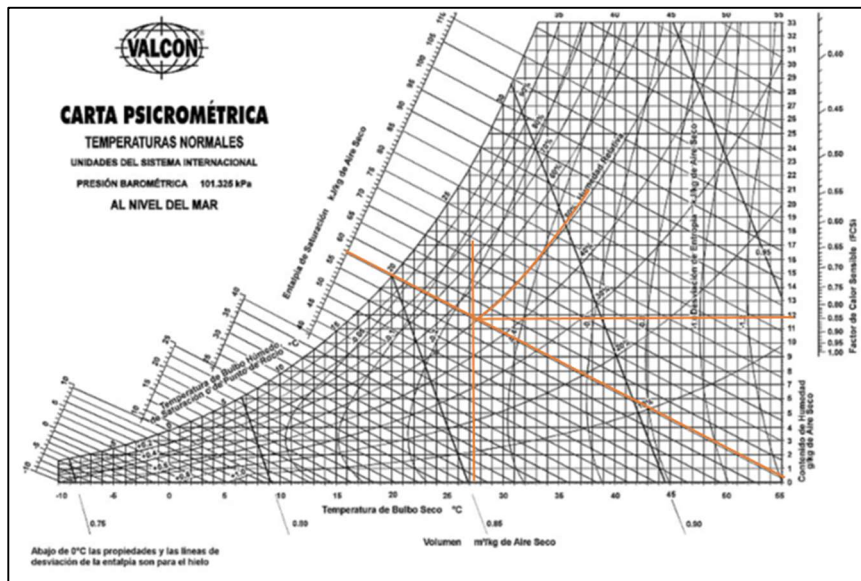
Calculo de carga térmica de enfriamiento. Método CLTD, ASHRAE 1997									
Hecho por:	Esteban Vargas Arguedas				Recinto:	Contenedor empleado como cuarto de cultivo			
Periodo:	16 horas distribuidas en 12 horas de noche y 4 horas de día								
Localidad:	Ciudad de San José								
Condiciones	TBS (°C)	TBH (°C)	% HR	m s. n. m.	w (gw/kg a)				
Exterior:	18	13,8	59%	1172	7,5				
Interior	18								
Temp Interior	tr (°C)	18							
am.Diar.Pr	RANGO (°C)	16							
Temp. Media	tm(°C)	10							
<b>Carga termica (W)</b>									
Sensible      Latente									
Techo	R (m2 K/w)	Roof #	CLTD	CLTD	25,5 -tr	tm - 29,4	CLTD corr		
	Fabricante	Tabla 31	Tabla 30				(°C)		
	5,56		43	43	7,5	-19,4	31,1		
	Aplicación de la Ecuación 2								
U (W/m²K)	A	CLTD corr							
Fabricante	(m2)	(°C)							
0,14	25,94	31,1							
								112,94	
Paredes	R (m2 K/w)		CLTD	CLTD	25,5 -tr	tm - 29,4	CLTD corr		
	Fabricante		Tabla 32				(°C)		
	5,56		43	43	7,5	-19,4	31,1		
	Aplicación de la Ecuación 2								
U (W/m²K)	A	CLTD corr							
Fabricante	(m2)	(°C)							
0,14	59,9	31,1							
								260,80	
Piso	R (m2 K/w)		CLTD	CLTD	25,5 -tr	tm - 29,4	CLTD corr		
	Fabricante		Tabla 32				(°C)		
	5,56		43	43	7,5	-19,4	31,1		
	Aplicación de la Ecuación 2								
U (W/m²K)	A	CLTD corr							
Fabricante	(m2)	(°C)							
0,14	25,94	31,1							
								112,94	
Personas	Cantidad	Sensible		CLF	Aplicación de Ecuación 5				
		Tabla 3		Tabla 37					
Sensible	2	70		1					
								140,00	
Personas	Cantidad	Latente		CLF	Aplicación de Ecuación 6				
		Tabla 3		Tabla 37					
Latente	2	45		1					
								90,00	
Iluminación	Potencia (W)	FUL	FSA	CLF	Aplicación de Ecuación 7				
	Fabricante			Tabla 38					
	8840	1	1	0,18					
								1591,20	
Motores	Potencia (HP)	Cantidad	Tabla 4	CLF	Aplicación de Ecuación 8				
	Fabricante	Extractores	(W)	Tabla 38					
2 de 1/4 HP	0,25	2	187	0,75					
								70,13	
Aire fresco	Constante	Q	to	ti	Aplicación de Ecuación 11				
		l/s	(°C)	(°C)					
Sensible	1,23	0,571	26	18	8				
								5,62	
Aire fresco	Constante	Q	wo	wi	Aplicación de Ecuación 12				
		l/s	(kg w / kg a)	(kg w / kg a)					
Latente	3010	0,571	0,0075	0,0112	-0,0037				
								-6,36	
Subtotal Sensible/ Latente (W)								2293,63	83,64
Carga térmica total (W)								2377,27	

Fuente: Elaboración propia (2024)

## b) Cálculo de la carga térmica con la iluminación LED apagada

- Comprende un periodo ocho horas diurnas donde no se hace uso de la luz artificial, de acuerdo con fotoperiodo establecido.
- Mediante la aplicación del formulario del **Anexo H**, se determina que:
  1. La temperatura de bulbo seco (TBS máx.) corresponde a 28,5 °C (de acuerdo con tabla de temperaturas para Costa Rica, manual de ASHRAE).
  2. La temperatura de bulbo húmedo (TBH) correspondiente a la anterior es 20 °C.
  3. Aplicando la carta psicrométrica se obtiene: 50 % de HR y el un contenido de humedad (w) a correspondiente a 11,5 g<sub>w</sub>/kg<sub>a</sub>, (ver **Figura 41**).

**Figura 41:** Uso de carta psicrométrica (caso con iluminaria LED desactivada)



**Fuente:** (Henríquez Granados , Orellana Mejía, & Rosa Chávez , 2016)

4. Se identifica la temperatura ambiente diaria o RANGO que corresponde a 26 °C (**Tabla 15**).
5. Se identifica la temperatura interior (tr) correspondiente a 18 °C (**Tabla 15**).
6. Se calcula la temperatura media (tm) con la fórmula del **Anexo H**.

$$t_m = TBS_{m\acute{a}x.} - (RANGO / 2)$$

$$t_m = 28,5 \text{ }^\circ\text{C} - (26 \text{ }^\circ\text{C} / 2)$$

$$t_m = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

7. Como paso siguiente se determina que la carga térmica corresponde a 878,36 W, cuando las luminarias están apagadas. De igual manera al caso anterior se empleó de la **Tabla 17** elaborada bajo el método CLTD.

**Tabla 17:** Cálculo de carga térmica con iluminación LED apagada 8 horas

Calculo de carga térmica de enfriamiento. Método CLTD, ASHRAE 1997									
Hecho por:	Esteban Vargas Arguedas				Recinto:	Contenedor empleado como cuarto de cultivo			
Periodo:	8 horas de día								
Localidad:	Ciudad de San José								
Condiciones	TBS (°C)	TBH (°C)	% HR	m s. n. m.	w (gw/kga)				
Exterior:	28,5	20	50%	1172	11,5				
Interior	18								
Temp Interior	tr (°C)	18							
am.Diar.Pr	RANGO (°C)	26							
Temp. Media	tm(°C)	15,5							
<b>Carga termica (W)</b>									
Sensible      Latente									
Techo	R (m2 K/w)	Roof #	CLTD	CLTD	25,5 -tr	tm - 29,4	CLTD corr		
	Fabricante	Tabla 31	Tabla 30				(°C)		
	5,56		43	43	7,5	-13,9	36,6		
	Aplicación de la Ecuación 2								
U (W/m²K)	A	CLTD corr							
Fabricante	(m2)	(°C)							
0,14	25,94	36,6							
								132,92	
Paredes	R (m2 K/w)		CLTD	CLTD	25,5 -tr	tm - 29,4	CLTD corr		
	Fabricante		Tabla 32				(°C)		
	5,56		43	43	7,5	-13,9	36,6		
	Aplicación de la Ecuación 2								
U (W/m²K)	A	CLTD corr							
Fabricante	(m2)	(°C)							
0,14	59,9	36,6							
								306,93	
Piso	R (m2 K/w)		CLTD	CLTD	25,5 -tr	tm - 29,4	CLTD corr		
	Fabricante		Tabla 32				(°C)		
	5,56		43	43	7,5	-13,9	36,6		
	Aplicación de la Ecuación 2								
U (W/m²K)	A	CLTD corr							
Fabricante	(m2)	(°C)							
0,14	25,94	36,6							
								132,92	
Personas	Cantidad	Sensible		CLF	Aplicación de Ecuación 5				
		Tabla 3		Tabla 37					
Sensible	2	70		1					
								140,00	
Personas	Cantidad	Latente		CLF	Aplicación de Ecuación 6				
		Tabla 3		Tabla 37					
Latente	2	45		1					
								90,00	
Iluminación	Potencia (W)	FUL	FSA	CLF	Aplicación de Ecuación 7				
	Fabricante			Fabricante					
APAGADAS	8840	1	1	0,18					
								0,00	
Motores	Potencia (HP)	Cantidad	Tabla 4	CLF	Aplicación de Ecuación 8				
	Fabricante	Extractores	(W)	Tabla 38					
2 de 1/4 HP	0,25	2	187	0,75					
								70,13	
Aire fresco	Constante	Q	to	ti	Aplicación de Ecuación 11				
		l/s	(°C)	(°C)					
Sensible	1,23	0,571	16	18	-2				
								-1,40	
Aire fresco	Constante	Q	wo	wi	Aplicación de Ecuación 12				
		l/s	(kg w / kg a)	(kg w / kg a)					
Latente	3010	0,571	0,0115	0,0075	0,004				
								6,87	
Subtotal Sensible/ Latente (W)								781,48	96,87
Carga térmica total (W)								878,36	

Fuente: Elaboración propia (2024)

**c) Explicaciones generales para Las Tabla 16 y Tabla 17**

- Ambas tablas hacen referencia únicamente a las ecuaciones requeridas para este caso particular y descritas en el marco teórico.
- Es necesario tener en cuenta que el coeficiente de transmisión térmico (U) empleado es 0,14 W/m<sup>2</sup>K y que la resistencia térmica (R) corresponde a 5,56 (m<sup>2</sup> K/W), según el material usado en paredes, techo y piso, mismo conocido comercialmente como panel Paneles Sándwich.
- Para ambos escenarios de cálculo se emplean las áreas descritas en la **Tabla 18** y correspondientes a techo, paredes y piso. Todos los elementos son construidos del mismo material.

**Tabla 18:** Áreas para el cálculo de carga térmica correspondiente a piso, paredes y techo

Elemento	Construcción	Área (m <sup>2</sup> )	U (W/m <sup>2</sup> K)
Techo	Panel de poliuretano	25,94	0,14
Paredes exteriores		59,90	
Piso		25,94	

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

- Para el cálculo de la carga térmica correspondiente a piso, techo y paredes, se recurre a la **Ecuación 2**. Información como U (W/m<sup>2</sup>K) y R (m<sup>2</sup> K/w), correspondieron a fichas técnicas de fabricantes reconocidos.
- Dentro del recinto de cultivo ocasionalmente trabajarán dos personas en labores de recolección y mantenimiento; dicha carga térmica se determina por las **Ecuación 5** y **Ecuación 6**, respectivamente.
- Para la carga térmica correspondiente, uso de la tecnología LED se emplea la **Ecuación 7**.
- Dentro del módulo de cultivo únicamente estarán en operación dos motores de ¼ HP y que son parte del equipo encargado de renovar la masa de aire (inyector y ventilador); para la carga térmica se emplea la **Ecuación 8**.
- Finalmente, la carga correspondiente al ingreso de aire fresco se determinó gracias al empleo de a la **Ecuación 11** y a la **Ecuación 12**, respectivamente. Se debe resaltar

que el caudal de aire de ventilación ( $Q$ ) está establecido en literatura científica consultada, donde se establece que este debe ser menor de 1,5 cambios de aire por cada 24 horas. De acuerdo con lo anterior, se utiliza 1,4 cambios cada 24 horas, lo que corresponde a 0,571 l/s (1,68 m<sup>3</sup>/h).

- Una vez conocida la cantidad de calor aportada por ambos escenarios, se realiza una sumatoria; da como resultado que la carga térmica total corresponde a 3 255,63 W.

Algunos puntos importantes de aclarar sobre el anterior cálculo de carga térmica, para este proyecto, son:

- Los parámetros de humedad en el ambiente y temperatura, considerados durante el análisis, ya contemplan la carga térmica que se produce de la evapotranspiración de las plantas de lechuga, durante su desarrollo y del sistema hidropónico.
- Aunque la finalidad de este trabajo no es un diseño del sistema, se emplea metodología reconocida para determinar con precisión la capacidad de los equipos requeridos y, de esta forma, obtener consumos energéticos fiables.

Posterior al análisis de la carga térmica dentro del recinto y correspondiente a **3 255,63 W**, se procede con la conversión a BTU/h (British Thermal Unit), que es la unidad de calor utilizada principalmente en equipos de aire acondicionado. Conociendo que 1 W corresponde a 3,41 BTU/h se determina que la potencia de refrigeración del sistema de aire acondicionado debe ser superior a **11 101,70 BTU/h**; por ello se emplea un equipo de 12 000 BTU/h, de acuerdo con los tamaños estándar disponibles.

Después de ser analizadas las opciones de equipos de aire acondicionado que ofrece el mercado, se toma la decisión de usar un sistema inverter, debido a que son equipos de alta eficiencia energética que reducen la potencia a la que funcionan al alcanzar la temperatura deseada. Así mantienen la temperatura estable y evitan que el equipo tenga picos de consumo al arrancar y frenar, lo que permite reducir el consumo de energía; en general se puede establecer que el consumo está en función de la temperatura.

Para la instalación se determina instalar la unidad evaporadora en uno de los extremos del contenedor, se emplea un ventilador para mitigar su longitud y permite que la distribución de la temperatura sea uniforme.

Se investigó en el mercado nacional sobre proveedores de estos equipos y se decidió utilizar la oferta proporcionada por la compañía Copper Group, debido a la tecnología de las unidades, la asesoría y su costo (ver **Anexo J**).

Esta empresa recomienda colocar un equipo INVERTER SEER 20 GOLD FIN, de la marca ADINA de 12 000 BTU. Este sistema ofrece un 90% de ahorro en consumo y requieren de una alimentación eléctrica de 220 V, 1 fase, 60 Hz (ver **Anexo K**).

El costo de la unidad de aire acondicionado, conforme con la anterior descripción, corresponde a **US \$ 550,80** a lo que se deben agregar un adicional de **US \$ 350,00** por la instalación que incluye materiales y accesorios. La vida útil de estos equipos es de hasta 15 años, siempre y cuando se ofrezcan los mantenimientos requeridos.

Para analizar de una manera precisa el consumo de energía eléctrica del sistema de climatización, se recurre al cálculo de carga térmica. Esta considera utilizar equipos emisores de calor, como la luminaria, en horarios nocturnos y de esta manera aprovechar la diferencia térmica entre el interior y exterior, de manera favorable para la disipación de temperatura, sin necesidad de un mayor consumo de los aires acondicionados.

En la **Tabla 19** se muestra la relación aplicada entre potencia térmica y potencia eléctrica para determinar el consumo por unidad de tiempo.

**Tabla 19:** Consumo eléctrico de equipo de aire acondicionado

Condición	Potencia térmica (W)	Energía (kJ/s)	Energía (kJ/h)	Potencia eléctrica (kW)	Eficiencia SEER 20	Tiempo de uso (h)	Consumo (kWh)
<b>LED encendidos</b>	2377,27	2,37	8532,00	2,37	20	16	1,896
<b>LED apagados</b>	878,36	0,88	2851,92	0,88	20	8	0,35
<b>Consumo total por día</b>							<b>2,25</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Con respecto a la eficiencia SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) en aires acondicionados es una medida que indica su eficiencia energética; la potencia eléctrica se divide entre el factor SEER y se obtiene el consumo real.

En general la unidad de aire acondicionado tendrá un consumo equivalente a 2,25 kWh diario.

## Extractores y ventiladores para renovación de la masa de aire

Durante el cálculo de la carga térmica se mencionó que la literatura recomienda realizar menos de 1,5 cambios de aire por cada 24 horas, para un cuarto de cultivo controlado. De acuerdo con esto, se emplea 1,4 cambios cada 24 horas, lo que es igual a 0,571 l/s (1,68 m<sup>3</sup>/h).

Dentro de un espacio climatizado de cultivo se vuelve necesario el reemplazo de la masa de aire existente, para mantener la higrometría, es decir, el nivel de humedad disponible en el aire circundante y los niveles de CO<sub>2</sub>.

De acuerdo con el flujo requerido, el proyecto plantea utilizar renovación de aire mecánica, es decir de manera forzada, al utilizar un ventilador y un extractor, con su respectivo motor eléctrico cada uno.

El extractor se ubica en lo alto para expulsar el aire agotado de la sala de cultivo. Por su parte el ventilador facilita el trabajo del extractor, al optimizar la renovación del aire; este se coloca en el fondo de la habitación y frente al extractor, con una velocidad inferior.

El costo de estos equipos, con su respectiva caja, para anclar a la pared, es de **US \$1 064,00**; ambos cuentan con motor de 0,25 HP sellado y se alimentan a 120 V, 1 fase, 60 Hz (ver **Figura 42**).

**Figura 42:** Extractor y ventilador eléctrico



**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Estos equipos también están provistos de una maya de protección y cobertor externo en su cuerpo de montaje, para evitar el ingreso de elementos adversos, como los insectos.

## Higrómetro y termómetro

Dentro del cuarto de cultivo es necesario un higrómetro y un termómetro para medir la humedad en aire y su temperatura. La medición de estas variables ayuda a determinar si se requiere humidificar o un deshumidificar y conocer si la temperatura es la apropiada. Las condiciones internas requeridas dentro de la granja vertical se indican en la **Tabla 15**.

Se debe reiterar que para este proyecto el equipo de aire acondicionado, además de mantener la temperatura, cumple con la función de deshumidificar el ambiente.

Mediante una búsqueda de equipos de medición disponibles en el mercado, se determina la implementación del termohigrómetro PCE-G1A con salida analógica (ver **Figura 42**), este equipo efectúa mediciones de HR y temperatura, también dispone de dos canales con salida analógica que convierten los valores de HR y temperatura en una señal 4-20 mA; mediante las salida analógica es posible registrar datos, controlar y regular variables.

Este equipo de medición es de instalación fija y posee sensores en lugares independientes para brindar datos fiables del lugar.

Los rangos de medición son: HR de 10% a 95% y temperatura de 0 °C a 60 °C y requieren de una alimentación eléctrica a 220 V, 1 fase a 60 Hz (ver **Anexo L**). El costo para adquirir este elemento considerado de alta precisión es de US \$1 364,5.

**Figura 43:** Termohigrómetro PCE-G1A con salida analógica



**Fuente:** (PCE-Instruments, 2024)

## Manejo del CO<sub>2</sub> mediante ventilación

Dentro del contenedor de cultivo el nivel de CO<sub>2</sub> se regula mediante la ventilación electromecánica forzada, este se vuelve crítico cuando está por debajo del nivel atmosférico

circundante; esto ocurre cuando el consumo de la planta supera la reposición proveniente del exterior.

Es de importancia destacar que si el nivel de CO<sub>2</sub> baja a más de 100 ppm la actividad fotosintética disminuye, lo que perjudica el desarrollo del cultivo. Con base en estudios científicos, la concentración que se utiliza para el cultivo de la planta de lechuga es de entre 300 a 320 µmol/mol (ppm), similar a la concentración atmosférica. De acuerdo con lo anterior, es necesario implementar un sistema de medición que ayude a controlar este parámetro y mantenerlo dentro del rango mediante la ventilación adecuada.

Con base en la necesidad de control, se determina incluir el transmisor de CO<sub>2</sub> de la serie AVC-320, diseñado para ambientes de alta humedad. Este accesorio es apropiado para sistemas de ventilación inteligente y monitoreo ambiental, utilizado principalmente en bodegas, invernaderos, cervecerías, fábricas de plantas, granjas, entre otros (ver **Figura 43**).

**Figura 44:** Medidor de CO<sub>2</sub> con señal de salida 0-4 mA DC



**Fuente:** (Aecl Group, 2024)

Este equipo es considerado de alta precisión, pues permite una señal analógica de 4 a 20 mA y se alimenta con una fuente de corriente continua de 20 ~ 36V DC; el costo de este sistema es de US \$272,00 (ver **Anexo M**).

## Sistema de riego hidropónico con solución nutritiva

Al principio del capítulo se especificó la técnica de película de nutrientes NFT como base para desarrollo del este análisis científico. Este mecanismo es una tecnología hidropónica de ambiente protegido que permite la recirculación de una mezcla compuesta de agua, en su mayoría y nutrientes, al existir una recirculación se permite la reutilización del agua, que facilita un ahorro y uso adecuado del líquido.

El sistema NFT se constituye principalmente de una bomba centrífuga, tuberías de distribución, canales de cultivo, un tanque de almacenamiento y una tubería recolectora. También es necesario un monitoreo continuo de la solución nutritiva mediante instrumentación, que permita el control del pH y la CE.

En la **Tabla 10** se muestran las variables químicas con las que debe cumplir el compuesto para el cultivo de lechuga específicamente, es requerido un pH de entre 5,5 y 6,5 y valores de CE entre 1,5 mS/cm a 2,5 mS/cm. También la mezcla debe estar a una temperatura entre 18 y 25 °C, de acuerdo con la literatura.

En lo referente al dimensionamiento del sistema de riego, se debe destacar que la investigación en desarrollo no es un diseño, pero busca los datos precisos mediante el empleo de métodos y técnicas de ingeniería, para un dimensionamiento adecuado de los diferentes equipos involucrados. Es fundamental implementar las recomendaciones hechas por fuentes bibliográficas, donde se destaca que la película de solución nutritiva en los canales de recirculación debe ser 1mm a 5 mm de altura, para lograr una adecuada oxigenación del agua. Así mismo, debe contar con una pendiente de 1% a 3% y la longitud de los canales no debe exceder los 18 metros. Todo lo anterior se consideró cuidadosamente en la búsqueda de las bandejas y los estantes de cultivo para que la solución nutritiva fluya sin problemas en el sistema, impulsada desde el tanque hacia la parte elevada de los canales de cultivo, para posteriormente descender a través de ellos por gravedad.

En la **Tabla 20** se detalla una lista de equipos y accesorios requeridos para poder efectuar dicha recirculación de una manera efectiva, de acuerdo con las condiciones de este proyecto en específico; también se incluye información como características técnicas y costos.

**Tabla 20:** Equipos requeridos en sistema de riego hidropónico NFT

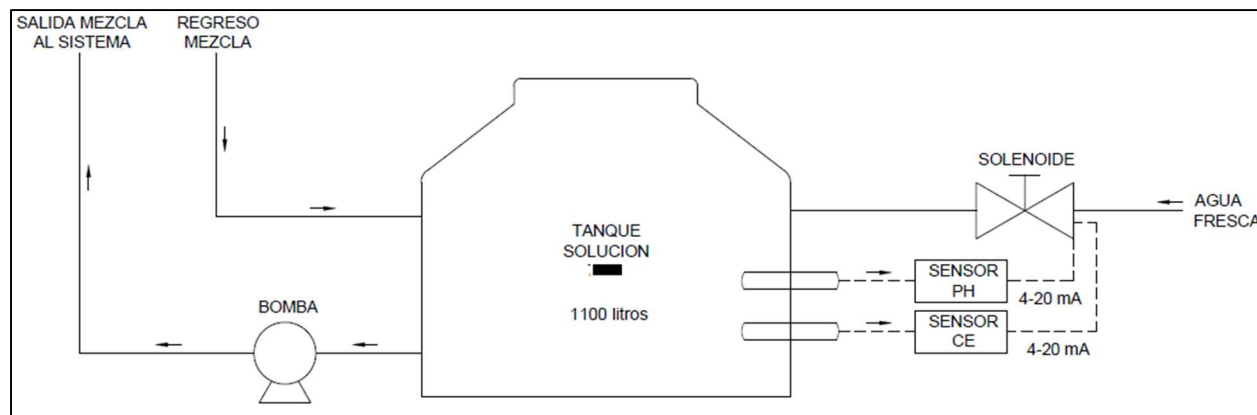
<b>Cantidad</b>	<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Costo</b>
1	Bomba de piscina, marca SWIM-PRO HAYWARD.	0, 75 HP, 120/240V, 1 fase, 60 Hz, 790 W, 5,2 A.	US \$334,00
1	Temporizador análogo Sinowell.	Múltiples eventos on/off por día y con repetición cada 24 horas, 120V, 1 fase, 60 Hz, 15 A, 1875W	US \$10,00
1	Sensor digital de pH, Memosens CPF81E.	Conexión de NPT ¾ de pulgada. Rangos: pH de 0 a 14, temperatura de 0 a 110 °C, presión de 1 a 10 bar (abs a 80 °C). Con transmisor, pantalla y señal de 0 a 4 mA.	US \$2 082,00
1	Sensor digital de CE, Memosens CLS21E.	Conexión de NPT 1 pulgada. Rangos: CE de 10 mS/cm a 20 mS/cm, temperatura de -20 a 135 °C, presión 17 bar (abs a 20 °C). Con transmisor de CM1, pantalla y señal de 0 a 4 mA.	US \$3 046,00
1	Válvula solenoide marca ASCO, modelo 8210.	Normalmente cerrada, conexión de 1 pulgada, voltaje 120 V/ 1 fase/ 60 Hz, 10,1 W, cuerpo en bronce. Rango de presión de operación: 150 a 5 psi.	US \$320,00
1	Tanque Durman con recubrimiento antimaterial que inhibe el crecimiento de algas, hongos y bacterias.	Capacidad 1 100,00 litros.	US \$400,00
1	Tubería de PVC, accesorios y losa de concreto.		US \$100,00
<b>Costo total de sistema de riego</b>			<b>US \$6 292,00</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

A continuación, se indican algunos puntos importantes que se deben tomar en consideración en la selección de los componentes para el sistema descrito:

- a. Se trabaja con una película de 5 mm de espesor dentro del canal, lo que permite determinar el volumen total de solución nutritiva que necesita el sistema, además se adiciona un 10% para compensar pérdidas. Según lo anterior, se necesita 594 litros de solución que se mantienen en un tanque con una capacidad de 1 100,00 litros.
- b. De acuerdo con el experto German Vargas representante de la empresa EverGreen, el uso de un sustrato en la raíz de cada planta mantiene la humedad y permite programar los riegos durante el día. A raíz de esto y con base en teoría consultada, se programa el sistema de riego para regar cuatro veces al día, a las 10:00 a.m., 12:00 p.m., 1:00 p.m., y a las 3:00 p.m.; la duración de cada riego se establece en 4 minutos y está en función del contenido de humedad volumétrica del sustrato y del porcentaje de drenaje.
- c. Según el anterior punto, la bomba solo opera cuatro veces al día por periodos de 4 minutos, lo que corresponde a un total de 16 minutos. Este equipo se acciona mediante un temporizador analógico, marca Sinowell (ver **Anexo N**).
- d. Dentro del tanque de 1 100,00 litros se instalan sensores de pH y CE para el control de la calidad de la mezcla. Cada sensor cuenta con un transmisor con comunicación de 0 a 4 mA, que permitirá el ingreso de agua fresca de reposición mediante una válvula solenoide normalmente cerrada, como lo indica la **Figura 45**.
- e. En el tanque se depositarán de forma manual los nutrientes y la cantidad de agua requerida, que son mezclados mediante un agitador eléctrico, que también cumple la función de introducir oxígeno.
- f. El costo total del sistema para riego hidropónico NFT corresponde a **US \$6 292,00**, según la **Tabla 20**.

**Figura 45:** Operación del sistema de riego NFT



**Fuente:** Elaboración propia (2024)

El sistema de riego utilizado cuenta con la capacidad para alimentar más de un contenedor o cuarto de cultivo, lo que facilitaría una eventual ampliación del proyecto con más unidades productivas y reduciría el costo mediante la distribución.

### Sustrato

El uso de sustrato en la raíz de las plantas permite mantener la humedad por un tiempo prolongado. De esta manera no es necesario que el sistema de riego mantenga una operación continua, ya que estos pueden ser programados durante el día y por periodos de tiempo cortos, que permite un ahorro de energía eléctrica.

Existen sustratos hidropónicos orgánicos e inorgánicos de diferentes tipos, algunos con mejores características que otros. El proyecto utiliza un sustrato inorgánico denominado piedra pómez debido a su prolongada duración, bajo costo y capacidad de retención de agua, debido a la alta porosidad.

En promedio, cada planta utiliza 50 gramos de esta piedra para desarrollar sus raíces, el costo total de este material corresponde a **US \$120,00** y puede ser utilizado durante varias cosechas sin sufrir degradación.

## Centro de carga, protecciones e instalación eléctrica

Para una distribución segura de la electricidad en los diferentes sistemas y accesorios que operan dentro del módulo de cultivo, se utiliza un centro de carga de la marca SQUARE D con 16 espacios, para albergar cada una de las protecciones de los diferentes circuitos.

La **Tabla 21** distribuye, del tablero principal, las protecciones requeridas y la distribución de la carga. Se reitera que el enfoque de la investigación no corresponde a un diseño, sin embargo, se realiza una propuesta del sistema eléctrico de la forma congruente para la consecución de información necesaria para el avance de la investigación.

Continuando con la distribución se recurre al total de la carga instalada, según la información de cada uno de los equipos y accesorios eléctrico empleados. Además, en el sitio de ubicación del módulo de cultivo se dispone de una alimentación monofásica 240/120 V, 60 Hz.

**Tabla 21:** Distribución de centro de carga eléctrico para el proyecto

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN							
CIRCUITO	UTILIZACIÓN	VOLTAJE (V)	CARGA (W)	POLOS/AMP	FASE A	FASE B	# DE CONDUCTORES (TW)
1	ILUMINACIÓN	120	1770	1 P/15 A	X		2 # 12
2	ILUMINACIÓN	120	1770	1 P/15 A		X	2 # 12
3	ILUMINACIÓN	120	1770	1 P/15 A	X		2 # 12
4	ILUMINACIÓN	120	1770	1 P/15 A		X	2 # 12
5	ILUMINACIÓN	120	1770	1 P/15 A	X		2 # 12
6	TOMAS GENERALES	120	2461	1 P/20 A		X	3 # 12
7	TOMAS GENERALES	120	2461	1 P/20 A	X		3 # 12
8 Y 9	EQUIPO A/C ,12 000 BTU	240	163,11	2 P /15 A	X	X	3 # 12
10 Y 11	TOMAS GENERALES	240	3870	2P / 20 A	X	X	3 # 5
12,13,14,15,16	LIBRES						
CARGA			17805		9787,55	8017,55	
TABLERO DE DISTRIBUCIÓN: TIPO CENTRO DE CARGA, MONOFÁSICO, 240/120 V, 3 HILOS 16 ESPACIOS, BARRAS 125 AMP, CON PROTECCIÓN INCORPORADA 2P/100 AMP							

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Con base en la información de la **Tabla 21** se recurre a proveedores eléctricos para presupuestar los materiales requeridos de la instalación eléctrica del cuarto de cultivo. De acuerdo con la cotización de la compañía Matelco Soluciones SA, se determina que este elemento representa un costo de **US\$1 168,00**, como se detalla en la **Tabla 22**.

**Tabla 22:** Costo de la instalación eléctrica del proyecto

MATERIALES E INSTALACIÓN ELÉCTRICA	
CENTRO DE CARGA 16 ESPACIOS SQUARE D	\$140,00
TOTAL DE BREAKER SQUARE D DE ENCHUFAR	\$180,00
CABLE, TUBERIA CONDUIT Y ACCESORIOS	\$648,00
MANO DE OBRA	\$200,00
<b>COSTO TOTAL</b>	<b>\$1 168,00</b>

Fuente: Elaboración propia (2024)

### Presupuesto total del proyecto

Al considerar que el presupuesto es la suma de todos los costos estimados de equipos, accesorios y materiales necesarios, para la concepción de la granja vertical, con ambiente controlado, se realiza una sumatoria de cada elemento descrito anteriormente. La **Tabla 26** destaca que la conformación del módulo de cultivo con todos sus componentes tiene un total de **US\$ 49 571,30**.

**Tabla 23:** Presupuesto del proyecto

Descripción	Costo
<b>Espacio de cultivo</b>	
Módulo de cultivo (contenedor)	\$4 200,00
Estructura vertical (racks)	\$4 400,00
Canaletas y bandejas	\$3 680,00
<b>Sistema de iluminación</b>	
Luminaria LED GreenPower	\$26 100,00
Temporizador análogo para control de luces	\$10,00
<b>Sistema para climatización</b>	
Equipo A/C de 12 000 BTU	\$550,80
Servicio de instalación de A/C y materiales	\$350,00
Extractores	\$1 064,00
Ventiladores	
Termohigrómetro con salida analógica	\$1 364,50
Transmisor de CO2 de la serie AVC-320	\$272,00
<b>Sistema de riego y nutrientes</b>	
Bomba	\$334,00
Temporizador análogo para control de bomba	\$10,00
Sensor digital de pH y transmisor	\$2 082,00
Sensor digital de CE y transmisor	\$3 046,00
Válvula solenoide	\$320,00
Taque de 1100 litros para formula nutricional	\$400,00
Losa de concreto	\$100,00
Sustrato	\$120,00
<b>Sistema eléctrico</b>	
Centro de carga e instalación eléctrica	\$1 168,00
<b>Total</b>	<b>\$49 571,30</b>

Fuente: Elaboración propia (2024)

Dentro del presupuesto descrito existe la posibilidad de incluir un sistema fotovoltaico incorporado a la red, que, además de respaldar la alimentación eléctrica en una eventualidad de fallo de la red, permite adquirir energía eléctrica a un mejor costo, en el caso de que las tarifas de la compañía proveedora sean altas.

### **Análisis de insumos requeridos para producir bajo ambiente controlado**

La producción de lechuga en ambiente controlado demanda insumos y materiales por cada periodo de cosecha, la electricidad es considerada uno de los recursos más críticos, debido a su alto costo. El aprovechamiento de recursos, entre ellos el agua, es necesario debido al enfoque de eficiencia que se contempla.

Dentro de los elementos necesarios para la producción de lechuga bajo ambientes controlados que no están directamente relacionados con los equipos, se destacan a continuación los siguientes:

- Fórmula nutricional
- Almácigo
- Energía eléctrica
- Agua

### **Fórmula nutricional**

Se emplea una solución para hidroponía de la marca EverGreen, recomendada para ser utilizada en toda clase de cultivos hidropónicos, entre ellos la lechuga. Esta solución nutritiva concentrada aporta nutrientes menores y mayores de forma balanceada; en la ficha técnica se puede ver el **Anexo O**.

De acuerdo con la **Tabla 23**, se recomienda utilizar una concentración de 5 ml de solución mayor y 2,5 ml de menor por cada litro de agua empleado.

**Tabla 24:** Aplicación de solución nutritiva de la marca EverGreen para hidroponía

CULTIVO	DOSIS POR LITRO		FRECUENCIA
	MAYOR	MENOR	
Hidroponía semilleros	2,5 cc	1,25 cc	Semillero con bandeja de reserva: cada 3 días Semillero sin bandeja de reserva: 2 veces al día
Trasplante (hidroponía en agua)	5 cc	2,5 cc	Cada 10 días (cambio total de la solución)
Trasplante (en medio sólido)	5 cc	2,5 cc	Dos veces al día, hasta humedecer
Sistemas de riego	5 cc	2,5 cc	3 veces al día
Plantas Ornamentales	5 cc	2,5 cc	Regar cada 15 días
Orquídeas	5 cc	2,5 cc	Atomizar cada 15 días

**MAYOR:** Solución Hidropónica Mayor. **MENOR:** Solución Hidropónica Menor

**Fuente:** (Ever Green, 2024)

En un cálculo realizado anteriormente se determinó que el sistema emplea 594 litros de mezcla nutritiva por bache. Según la dosificación, esta estaría conformada de: 2,97 litros de solución mayor, 1.48 litros de solución menor y 590 litros de agua.

El costo de ambas soluciones nutritivas es de US \$ 20,00 por galón y se recomienda una renovación total de la mezcla cada 10 días, debido a la pérdida de propiedades nutritivas. Por tanto, un periodo comprendido en 35 días, que es el tiempo que permanecen las plantas dentro de la granja vertical, necesita de cuatro cambios; en general se necesita un total de **17,8 litros** de solución nutritiva EverGreen con un costo de **US \$ 100,00**.

Se debe recordar que se estima un total de 60 días para que la planta esté lista para salir a la venta, que contempla 25 DDS y 35 DDT. Se toman en cuenta los 35 DDT para estos cálculos, debido a que corresponde al periodo que las plantas pasaron en el cuarto de cultivo bajo condiciones controladas.

EL fabricante de la solución nutritiva recomienda que una vez utilizado cada bache de mezcla, por 10 días, se puede emplear para otros propósitos, como puede ser en el riego de algún otro cultivo en suelo. Aunque pierda propiedades para hidroponía, aun ofrece muchos nutrientes que otras plantas pueden aprovechar; esto se describe como una reutilización o reaprovechamiento.

### Almácigos

Como se indicó al inicio de esta sección los almácigos, se compran a una empresa cercana con una edad de 25 DDS (días después de sembrada la semilla).

La cercanía entre el proyecto y la empresa proveedora, hace que se reduzca el consumo de hidrocarburos por concepto de transporte; se debe indicar que cada bandeja contiene 200 plantas

jóvenes. Se estima que el proyecto por cada cosecha necesitaría de 12 bandejas para llenar todos sus espacios de cultivo; esta carga puede ser trasladada en un vehículo pequeño. Al ser pocos los kilómetros por recorrer y la baja frecuencia que se incurre en este rubro, la investigación determina no considerar el costo del combustible y, de igual forma, el impacto ambiental que esto pueda generar.

Basado en oferta presentada por la empresa Villa Plants el costo de las 2 304,00 plántulas de lechuga es equivalente a **US\$ 100,00**.

### Consumo de energía eléctrica del proyecto

Una vez descritos cada uno de los componentes que conforman la granja vertical y que tendrán injerencia en controlar cada una de las variantes requeridas durante 35 días para el desarrollo de la planta de lechuga, se vuelve necesario conocer el consumo eléctrico en kWh de la fábrica de alimentos bajo carga productiva.

Analizando cada uno de los equipos por separado se determinó una carga instalada total de 14,23 kW y, de acuerdo al tiempo de operación, el consumo corresponde a **156,36 kWh por día** (ver **Tabla 24**).

**Tabla 25:** Consumo eléctrico total del módulo de cultivo en operación

Descripción	Carga instalada (kW)	Horas de operación	Consumo (kWh) diario
<b>Sistema de iluminación</b>			
Luminaria LED GreenPower	8,84	16	141,44
Temporizador para control de luces	1,88	0,2	0,38
<b>Equipos para climatización</b>			
Equipo de A/C (consumo máximo)	0,12	16	1,98
Equipo de A/C (consumo mínimo)	0,04	8	0,32
Extractores	0,19	24	4,46
Ventiladores	0,19	24	4,46
Termohigrómetro	0,10	24	2,40
<b>Sistema para riego</b>			
Bomba	0,79	0,3	0,24
Temporizador para control de bomba	1,88	0,2	0,38
Sensor digital de pH y transmisor	0,10	0,33	0,03
Sensor digital de CE y transmisor	0,10	0,33	0,03
Válvula solenoide	0,01	24	0,24
<b>Totales</b>	<b>14,23</b>		<b>156,36</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Considerando que las 2 304,00 plantas que albergará el sistema tienen una equivalencia a 238,70 kg de producto fresco y que permanecen por un periodo de 35 días dentro del cuarto de cultivo, se determina que el consumo eléctrico durante este periodo es de **5 472,60 kWh**, por lo que se requiere de **22,92 kWh por kg de biomasa húmedo producido**.

Después de consultar a en varias instituciones públicas relacionadas con la regulación de las tarifas eléctricas, se determinó que no existe en Costa Rica un incentivo o tarifa especial que considere investigaciones científicas relacionadas con la producción de alimentos sanos y que hagan uso de los recursos naturales de forma sostenible. Dado lo anterior y debido a que el proyecto está ligado a negocios de distribución de alimentos como supermercados, se puede acceder a una tarifa denominada Comercios y Servicios T-CO (ver **Anexo P**). Esta tarifa no utiliza los periodos punta, valle y nocturno, razón por la cual el consumo no se ve favorecido si se realiza durante horarios nocturnos como se había planteado en un inicio; sin embargo, la posibilidad queda abierta y sería muy favorable para la búsqueda de la factibilidad.

En la **Tabla 25** se aplica la tarifa comercial descrita y se obtiene como resultado un costo mensual correspondiente a **US\$ 1 065,68** (el valor se expresa en US dólares de acuerdo con el tipo de cambio del día, por considerarse una moneda más estable).

**Tabla 26:** Aplicación de tarifa eléctrica correspondiente

Aplicación de tarifa Comercios y Servicios T-CO			
Consumo x día (kWh)	Consumo x mes (kWh)		
156,36	4690,8		
	kWh	Costo	Costo total
Cargo fijo por energía hasta 3000 kWh	3000	\$0,22	\$660,00
Por consumo de energía, bloque mayor 3000 kWh	1690,8	\$0,13	\$226,57
Cargo fijo por potencia, bloque de 0 a 8 kW			\$179,11
Total			\$1 065,68

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Debido al alto costo de la energía eléctrica se investigó sobre la posibilidad de dotar a la granja de un sistema eléctrico fotovoltaico. De acuerdo con la compañía consultada, un sistema con capacidad requerida y con conexión a la red tiene un costo de **US\$ 32 800,00** (ver **Anexo Q**).

Dicho sistema incluye todos los elementos requeridos y se compone de 34 paneles solares instalados en la parte superior del contenedor.

Se recurre a un sistema con conexión a la red eléctrica, debido a que uno fuera de la red puede costar más del doble; además, es importante considerar el respaldo que tendría el módulo de cultivo ante eventualidades de falla de la red.

Se estima que la recuperación de la inversión en un sistema de energía solar va de los cuatro a los siete años y, de acuerdo con el proveedor, la vida útil, de esta energía, va de los diez años en adelante; todo depende de la calidad de los equipos, el correcto uso y el mantenimiento.

### **Consumo de agua requerido por el proyecto**

Se estima que en la agricultura protegida utiliza este recurso de manera más eficiente que en el cultivo tradicional a cielo abierto. El trabajo en desarrollo pretende el uso eficiente del recurso hídrico, al utilizar únicamente lo necesario de acuerdo con el requerimiento de la planta de lechuga.

Para cultivos protegidos se tiene como referencia un consumo de 8,7 litros por lechuga en sistemas hidropónicos, lo que representa un requerimiento de 83,97 litros de agua por 1 kg de lechuga en un tiempo de entre 60 y 62 días para el crecimiento. Esta medición corresponde a un sistema hidropónico de balsas flotantes, donde el riego es continuo y las plantas siempre están expuestas al agua (flotan sobre ella). A diferencia de las balsas en un sistema NFT, las plantas solo reciben el riego varias veces al día de manera intermitente y programada, por lo que se busca mayor eficiencia del recurso.

De acuerdo con lo anterior y, recurriendo al cálculo realizado para el sistema de riego, en donde se determina un requerimiento de 590 litros de agua cada 10 días y un periodo de las plantas de 35 días dentro del cuarto, se establece un consumo de agua correspondiente 2 360,00 litros (2,36 m<sup>3</sup>).

Considerando 238,70 kg de producto fresco, se determina que se necesitan de ***9,90 litros de agua por kg de biomasa húmedo producido.***

Se recurre a los tarifarios vigentes del AyA, que indican que para un consumo entre 0 a 15 m<sup>3</sup> se cobra US\$ 3,01 por m<sup>3</sup> consumido; por tanto, se establece el consumo con un costo de US\$ 7,10.

## Cálculo de huella de carbono, en función de los factores de emisiones

Uno de los beneficios de utilizar energías limpias es la reducción de la huella de carbono, que puede ser calculada en función de los factores de emisión, relacionados con el vector energético; para el caso concreto de este proyecto el vector utilizado es la energía eléctrica.

Para el cálculo de la huella de carbono, es importante conocer el consumo de la actividad, durante el tiempo que esta dure. De acuerdo con la información expuesta en la **Tabla 25** el proyecto en desarrollo tendría un *consumo anual de 56 289,00 kWh*. La huella de carbono es el resultado de multiplicar el anterior consumo por el correspondiente factor de emisión, para lo que se utiliza la **Ecuación 15** que aparece en el marco teórico.

Para Costa Rica los factores de emisión de gases de efecto invernadero son compilados por el IMN mediante un inventario nacional. Para el caso particular de la energía eléctrica dicho factor varía anualmente, debido a efectos climáticos que influyen y hacen necesario recurrir a hidrocarburos para la generación; por ejemplo, una sequía severa y prolongada disminuiría el recurso hídrico y afectaría directamente la producción hidroeléctrica.

Se recurre a un factor que no se vea afectado por circunstancias atípicas como El Fenómeno del Niño o años de pandemia, debido a que esto puede alterar el promedio de los otros años y brindar datos no reales sobre el proyecto.

Considerando lo anterior y, para efectos de cálculo, se utiliza el factor del año 2019, publicado por el IMN, como se aprecia en la **Tabla 28** y corresponde a 0,0365 kg CO<sub>2</sub> eq / kWh.

**Tabla 27:** Factor de emisión de gases de efecto invernadero, electricidad

Año	Factor de emisión kg CO <sub>2</sub> e/kWh	Incertidumbres	
		Límite inferior	Límite superior
2019	0,0365	1,37%	1,37%
2018	0,0395	ND	ND
2017	0,049	ND	ND
2016	0,0557	ND	ND
2015	0,0381	ND	ND
2014	0,1170	ND	ND

**Fuente:** (Instituto Meteorológico Nacional, 2020)

Conforme con la información descrita, se obtiene la huella de carbono correspondiente a la actividad desarrollada durante un año, por la presente investigación y que se establece en 2 054,54 kg CO<sub>2</sub> eq. Si la producción durante un año es 2 387,00 kg de producto fresco, se puede definir que ***1 kg de biomasa húmedo de lechuga produce 0,86 kg CO<sub>2</sub> eq.***

### Costos de producción del sistema

Para la estimación de los costos de producción, es fundamental establecer la vida útil del sistema productivo, que, para este caso, corresponde a la granja vertical contenida dentro del cuarto del cultivo. En su mayoría las tecnologías y materiales empleados presentan una vida útil superior a los 10 años, en el caso de los equipos ligada a un correcto mantenimiento. Bajo el anterior fundamento y para contemplación de cálculos, se establece la vida útil del módulo de cultivo en 10 años.

La **Tabla 28**, brinda en detalle los costos de operación requeridos en un periodo de 10 años dentro de los cuales el costo total del cuarto de cultivo será diluido paulatinamente e incorporado a la producción del vegetal. Los costos de producción corresponden a la sumatoria de insumos como: energía eléctrica, agua, fertilizantes y almácigos, necesitados durante el decenio para cada cosecha.

**Tabla 28:** Costos de producción de la lechuga en agricultura urbana

Costos de producción agricultura urbana		
Descripción	Detalle	Costo
Instalación del módulo de cultivo completo con todos sus componentes	Vida útil estimada de 10 años	\$49 571,30
Costos de producción	Periodo de 10 años	\$145 030,00
<b>Costo total de producción en 10 años</b>		<b>\$194 601,30</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Estimando una producción de 23 870,00 kg de producto fresco, durante la vida útil de la granja vertical, se determina que el ***costo de producción es correspondiente a US\$ 8,15 por kg de biomasa húmedo de lechuga.***

Analizando la información de otra manera, 1 kg de producto fresco está compuesto de 9,6 unidades de lechuga de acuerdo a las variables agronómicas que plantea el proyecto, por tanto, ***el costo de cada unidad corresponde a US\$ 0,84***. Desde esta perspectiva es posible comparar con el precio unitario en el mercado (ver **Anexo R**).

### **Análisis de comparación**

Para el análisis de la producción de hortalizas bajo el planteamiento de agricultura urbana, en ambiente controlado, se vuelve necesario recurrir a valores de referencia en parámetros como: huella de carbono, huella hídrica, productividad y rentabilidad, determinados por investigaciones recientes.

A diferencia de los métodos tradicionales que recurren a elementos como el suelo, empleo de recursos naturales desmedidos y, en ocasiones de agroquímicos, para combatir plagas y enfermedades producidas por los cambios climáticos, el sistema urbano en cuestión, emplea la energía eléctrica como vector energético, además de hacer uso adecuado del agua para el cultivo de la lechuga Romana (*Lactuca sativa L. var. longifolia*).

Analizado lo anterior y, debido a restricciones de alcance en cuanto a tiempo de la investigación, se emplea como referencia el trabajo realizado por los investigadores, al permitir un comparativo de cultivar alimentos sanos bajo ambiente controlado y alimentos con técnicas tradicionales.

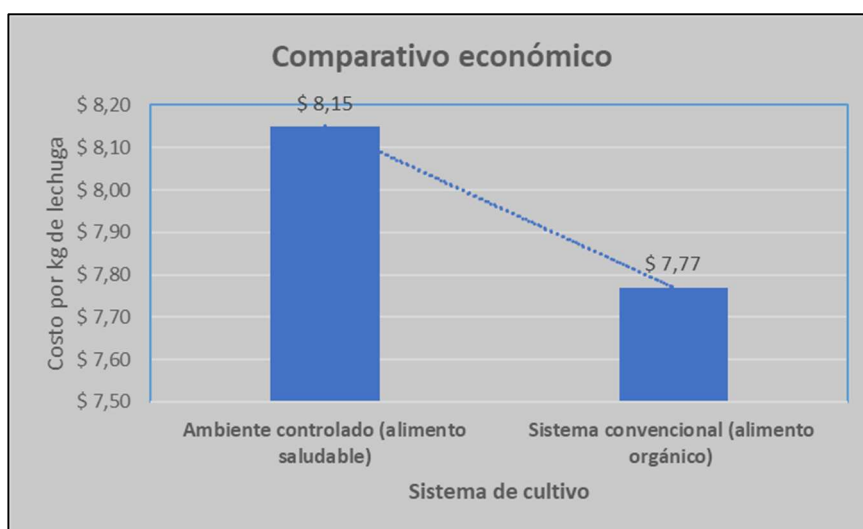
### **Análisis de comparación económico**

Anteriormente se determinó el costo de producción en la granja vertical en US\$ 8,15 por kg de biomasa húmedo, que considera la inversión inicial e insumos durante un periodo de 10 años. Por su parte, los investigadores Castro Granados, Brenes Peralta, Jiménez Morales, & Campos Rodríguez (2021), en su trabajo denominado “***Análisis de ciclo de vida de lechuga (Lactuca sativa) cultivada bajo un sistema orgánico y convencional, como insumo para toma de decisiones, en dos fincas agrícolas costarricenses***”, en el que se evalúa el impacto económico de un sistema de producción de lechuga orgánico y uno convencional, destacan un coste para un sistema convencional de US\$ 5,0 por kg de lechuga y de US\$7,77 para un kg producido, bajo la misma metodología, pero de manera orgánica.

Debido a la producción de alimentos saludables sin necesidad de químicos para el control de plagas y enfermedades, que destaca la presente investigación, es necesario que la comparación sea referenciada con un vegetal ideal, de origen orgánico. De acuerdo con esta salvedad, la diferencia en el costo final corresponde a 4,66%, como se muestra en el **Gráfico 1**.

Existen justificantes favorables al cultivo urbano en cuanto a la diferencia en el costo. Se pueden resaltar atributos como la clasificación Baby leaf (brotes tiernos), la no utilización durante su cultivo de recursos como el suelo y un uso adecuado del recurso hídrico.

**Gráfico 1:** Análisis de comparación económico



**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Otros factores que también se reflejan en la gráfica para la producción en ambiente controlado, corresponden al alto costo de los equipos requeridos y al elevado costo de la energía eléctrica, al no existir ninguna tarifa especial para impulsar proyectos de producción de alimentos sanos de manera sostenible. Además, a diferencia del sistema convencional, se da la reducción de costos en etapas como la comercialización y el uso de combustibles fósiles. Es una solución de producción de Km 0 o también denominada productos de proximidad, donde su principal característica es la poca distancia que hay entre su lugar de producción o de recolección y el punto de venta.

Es necesario destacar la reducción en la mano de obra que propicia el uso del módulo de cultivo controlado y la elevada probabilidad de garantizar la producción de manera programada.

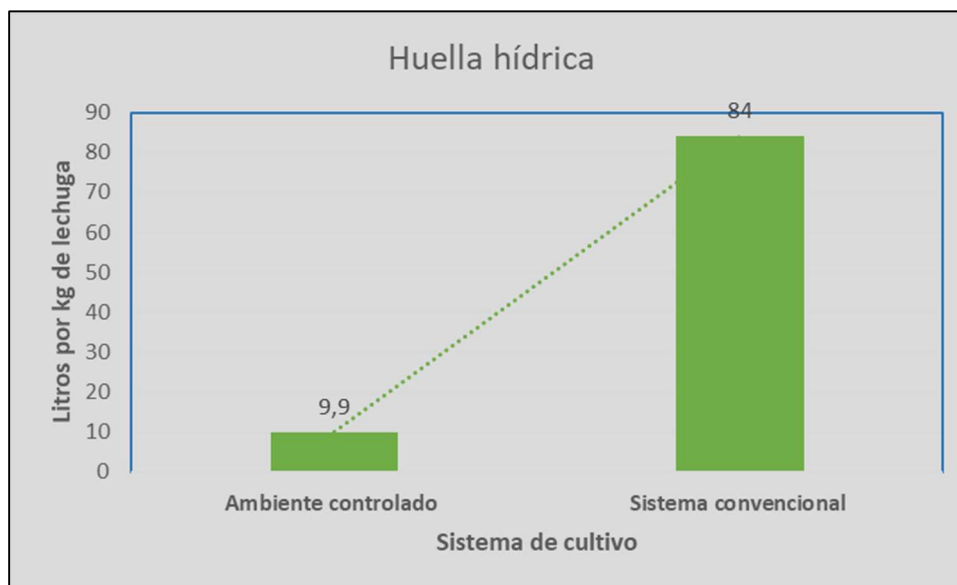
Esto, sin afectación de cambios climáticos que puedan dañarla o, bien sobreproducciones, debido a la mala programación que no permitan el aprovechamiento del vegetal. Sin duda, aprovechar el espacio permite cultivar más plantas; esto es fundamental dentro de cualquier ciudad.

### **Análisis de comparación ambiental**

De acuerdo con la investigadora Loachamín Oña (2019) en su trabajo denominado *“Estimación de impactos ambientales basados en el análisis de ciclo de vida de la fase agrícola de la cadena agroalimentaria convencional y agroecológica de la lechuga (*Lactuca sativa*) en el cantón Cayambe”*, la estimación de huella hídrica en el cultivo del sistema de la cadena agroecológica convencional requiere de 84 litros de agua para la producción de 1 kg de lechuga. Esto contempla la huella gris que corresponde al volumen de agua necesaria para diluir o compensar el agua contaminada por los fertilizantes sintéticos aplicados al cultivo.

Por otra parte, la presente investigación determina que se requieren de 9,90 litros de agua por kg de biomasa húmedo. Debido al origen natural de los nutrientes utilizados que se aplican de manera sistémica, no hay posibilidad de pérdidas por escorrentía ni posibles evaporaciones a la atmósfera; por esta no es necesaria la inclusión de la huella gris.

Los datos comparativos sobre la huella hídrica, permiten establecer un ahorro del 88,22% del recurso hídrico bajo el esquema de cultivo en ambiente controlado, la **Grafica 2** ofrece una comparación visual de los litros requeridos por kilogramos producidos en ambos sistemas.

**Gráfico 2:** Requerimiento de agua (huella hídrica)

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

Con relación al análisis de la huella de carbono, este trabajo científico determina que por cada kg de biomasa húmedo de lechuga se produce 0,86 kg CO<sub>2</sub> eq. Se debe destacar que la energía eléctrica corresponde al vector energético utilizado en las diferentes fases de la producción y, que al ser una solución de producción de km 0, el uso de hidrocarburos no es necesario.

Por su parte Loachamín Oña (2019) en su análisis de ciclo de vida, concluyó con una estimación de huella de carbono de 0,44 kg CO<sub>2</sub> eq por cada kg de lechuga producido bajo el sistema convencional. Este impacto fue debido a actividades de arado y rastra, aplicadas al suelo, además del uso de fertilizantes sintéticos y la quema de combustibles fósiles, durante la fase agrícola. Se debe destacar que esta medición de impacto ambiental no incluye la fase de distribución y comercialización del producto, compuesta generalmente por grandes recorridos entre un punto y el otro. Durante esta fase, se vuelve necesario la quema de combustibles fósiles, lo que da paso a un incremento de la huella de carbón.

De acuerdo con la teoría y a expertos consultados, la actividad de distribución de un bien es la más impactante dentro de un análisis de ciclo de vida. Debido a restricciones de alcance en cuenta a tiempo de la investigación y, a que no se encontró un estudio que incluya un análisis completo, no es posible la comparación de resultados de huella de carbono con técnicas

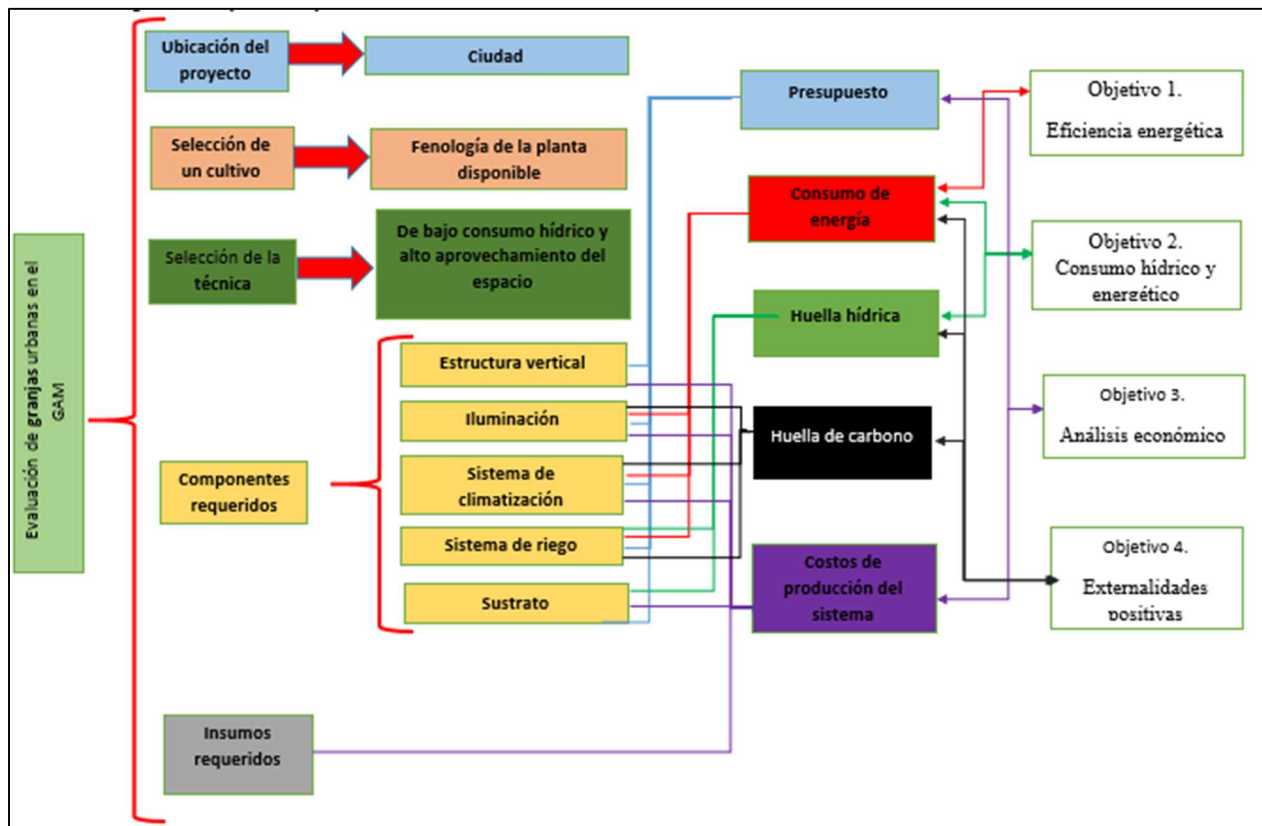
convencionales de producción; únicamente se cita el resultado de Loachamín Oña (2019) que permite visualizar un dato parcial.

### Diagrama de flujo de trabajo

La **Figura 46** corresponde a un diagrama de flujo de trabajo o flujograma que facilita la comprensión durante la lectura de este capítulo.

Se hace uso de este mecanismo por tratarse de un proyecto complejo que recurre a múltiples análisis y cálculos. En general se enmarca la ruta utilizada para llegar a cada objetivo específico.

**Figura 46:** Diagrama de flujo de trabajo



**Fuente:** Elaboración propia (2024)

## Resumen de resultados

A continuación, se presenta un resumen de los resultados y hallazgos obtenidos durante la investigación en orden de los objetivos específicos previamente planteados.

**Tabla 29:** Resumen de resultados en orden a los objetivos

1	Conveniencia de introducir la agricultura urbana bajo ambiente controlado en el GAM.
2	Se necesitan 22,92 kWh por cada kg de biomasa producido.
3	Mediante el empleo de técnicas hidropónicas y equipos de control, se reduce la huella hídrica y se necesitan 9,90 litros de agua por kg de vegetal.
4	El aprovechamiento de las condiciones climáticas, de un lugar específico en cuarto de cultivo, es posible mediante el uso de sistemas de climatización, reduce el consumo energético y mejora las condiciones.
5	El costo de producción es de US\$ 8,15 por kg de biomasa húmedo, por lo que es económicamente sostenible si se resaltan los valores agregados del producto.
6	El cultivo de lechuga bajo ambiente controlado tiene una huella de 0,86 kg CO <sub>2</sub> eq por kg de biomasa húmedo, además de una reducción de la huella hídrica, el aprovechamiento del espacio, no requiere de suelo, no emplea hidrocarburos y no utiliza agroquímicos.

**Fuente:** Elaboración propia (2024)

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- En esta tesis se determina la conveniencia de introducir la agricultura urbana bajo ambiente controlado en el GAM, como sustitución de los métodos tradicionales en la producción de alimentos sanos, por ser una tecnología económicamente sostenible. Además, es una solución de producción de km 0 que no recurre al uso de hidrocarburos con un bajo impacto hídrico y un aprovechamiento del espacio sin necesidad de suelo.
- Una vez finalizada la presente investigación, se determina un requerimiento energético de 22,92 kWh por cada kg de biomasa producido. Lo anterior mediante la definición de una unidad funcional y el dimensionamiento de un contenedor que integra tecnologías para propiciar las condiciones controladas en la producción de alimentos vegetales.
- Por medio de este estudio científico se determinó que mediante la implementación de técnicas hidropónicas como la de película de nutrientes NFT y equipos de control en el sistema de riego, es posible reducir la huella hídrica. Según lo anterior el sistema con condiciones controladas requiere de 9,90 litros de agua por kg de vegetal, sin necesidad de contemplar una huella gris. En sistemas convencionales, emplean hasta 84 litros de agua para la producción de la misma cantidad de lechuga, lo que corresponde a un ahorro de 88,22%.
- Por medio de un análisis teórico e investigativo se estableció la posibilidad de recurrir a sistemas de aire acondicionado integrados a otros equipos, para el aprovechamiento de condiciones climáticas externas en la climatización del cuarto de cultivo. Como es el caso de la combinación del aire acondicionado de alta eficiencia energética tipo invertir y equipos electromecánicos de inyección y extracción de la masa de aire que permiten mantener la higrometría y los niveles de CO<sub>2</sub> necesitados por el cultivo, sin necesidad de humidificadores.
- Al ser un sistema de producción cerrado y tener la afectación de la sombra producida por elementos como edificios, debido a su ubicación, se determinó la conveniencia de recurrir a la tecnología LED bajo una receta lumínica establecida como fuente de luz

artificial, para mejorar el proceso de fotosíntesis y acelerar el desarrollo de las plantas. Lo anterior porque reduce el consumo eléctrico y no desperdicia energía, sino que la transforma en calor con una potencia térmica de 18%.

- Mediante el análisis económico se concluyó que es necesario dar valor agregado al producto, para que la implementación de las granjas urbanas controladas en la ciudad, sea económicamente sostenible. Según lo anterior, el costo de producción en la granja vertical corresponde a US\$ 8,15 por kg de biomasa húmedo, mientras que para un kg orgánico producido de manera convencional es de US\$7,77. Esto representa una diferencia de 4,66% y debe justificarse al resaltar atributos como: la clasificación Baby leaf o la producción sostenible.
- El análisis de comparación ambiental concluyó que la actividad de cultivo de lechuga bajo ambiente controlado tiene una huella de 0,86 kg CO<sub>2</sub> eq por kg de biomasa húmedo de lechuga. La energía eléctrica es el único vector energético utilizado sin necesidad de recurrir a hidrocarburos, por ser una solución de producción de km 0. Por su parte, el análisis de ciclo de vida consultado para la producción de lechuga de manera convencional, destaca un impacto ambiental de 0,44 kg CO<sub>2</sub> eq, únicamente en la fase agrícola, sin agregar la fase de distribución y comercialización, donde se recurre a combustibles fósiles para realizar el recorrido y que, por lo general, es la fase más impactante en un análisis de ciclo de vida.
- El presente trabajo estableció externalidades positivas en el uso de ambientes controlados dentro de la ciudad, para la producción de alimentos vegetales, como: la reducción de la huella hídrica, el aprovechamiento del espacio, no existe impacto por el uso de suelo, se recurre a energía limpia y la ausencia de agroquímicos para el combate de enfermedades y daños ocasionados por factores climáticos.
- Se concluyó que bajo la tecnología propuesta es posible asegurar la cosecha, debido a que no depende de cambios climáticos, además de realizar programaciones de esta, con base en la demanda del punto de venta; siempre se puede ofrecer el vegetal fresco y sin riesgo de desperdicio.

## Recomendaciones

Finalmente, según los resultados obtenidos mediante el presente estudio, se recomienda lo siguiente:

- Para futuras investigaciones se recomienda la implementación de un Software que permita el monitoreo e interacción de las variables controladas, para su optimización, registro y posible control inteligente o remoto.
- Se sugiere desarrollar un prototipo o piloto de un cuarto de cultivo con condiciones controladas para dejar en evidencia resultados más exactos.
- En el caso de que el control de insectos por medio de cedazos, en los ventiladores, no sea suficiente, se recomienda recurrir a lámparas anti mosquitos.
- Para un eventual traslado del módulo de cultivo a otra ubicación geográfica, donde las condiciones climáticas son diferentes a la ciudad de San José, es necesario reconsiderar la implementación de un equipo humidificador dentro del análisis de climatización.
- Se recomienda reutilizar la formulación de nutrientes, que se cambia cada diez días en el otro tipo de cultivo, con menor requerimiento de nutrientes.
- Es necesario la búsqueda de ayuda gubernamental para mejorar las condiciones de proyectos de esta índole y poder acceder a tarifas eléctricas de bajo costo o periodos de bajo consumo como el nocturno.
- Dentro de las proporciones de colores de la luz artificial utilizada dentro del cuarto de cultivo, se recomienda considerar un porcentaje de luz blanca para permitir labores de mantenimiento.
- No se recomienda la inyección controlada de CO<sub>2</sub> dentro del cuarto de cultivo para acerar el desarrollo de los vegetales, por ser un procedimiento costo y delicado.
- En futuros trabajos afines, se sugiere analizar el apilamiento seguro de contenedores para un mayor aprovechamiento del espacio, lograr más volumen de producción y mayor aprovechamiento de los equipos y sistemas.
- La investigación queda abierta para futuros proyectos en los que se continúe trabajando en esta línea específica y puedan servir para retomarla posteriormente o como opción a trabajos futuros de otras investigaciones.

## CAPÍTULO VI: PROPUESTA

### Descripción

La presente investigación busca determinar la conveniencia de la introducción de la agricultura urbana mediante el análisis y comparación de la eficiencia productiva, energética, reducción de la huella de carbono y el aprovechamiento de los recursos naturales vs. los métodos tradicionales de producción de alimentos vegetales.

Mediante el establecimiento de una unidad funcional y la evaluación de técnicas y tecnologías de bajo consumo hídrico y energético, se puede determinar si es económicamente sostenible la implementación de esta técnica desarrollada en contenedores, bajo un ambiente controlado y, además, identificar las externalidades positivas producto de su utilización.

Las técnicas convencionales de cultivo utilizan de manera desmedida los recursos naturales y los agroquímicos para combatir plagas y enfermedades producidas por los cambios climáticos; por su parte, las diferentes fases de producción y comercialización necesitan también de la quema de hidrocarburos. De acuerdo con lo anterior este estudio científico tiene como idea principal buscar métodos de cultivo que, mediante energías limpias, garanticen la producción sin dependencia climática, al ofrecer vegetales sanos sin uso de agroquímicos, nutritivos y de fácil acceso al consumidor.

La ubicación elegida como modelo para el desarrollo del trabajo corresponde a la ciudad de San José que cuenta con la mayor densidad de población dentro del GAM.

### Propuesta

Este trabajo inició con la recopilación de información sobre las condiciones climáticas de la ciudad de San José, al analizar valores de temperatura y HR de varios años para obtener valores promedios.

Posteriormente y, bajo una serie de criterios selectivos, se eligió un vegetal funcional para el desarrollo del proyecto, la lechuga Romana (*Lactuca sativa L. var. longifolia*). Después de identificar las diferentes variables asociadas a esta legumbre, se procedió con una revisión del estado del arte y, bajo criterios de selección previamente establecidos, se determinó recurrir al sistema hidropónico NFT (Nutrient Film Technique) o de película de nutrientes multiniveles, como método de cultivo.

Establecidos el tipo de cultivo y la técnica, se continuó con el dimensionamiento de los diferentes componentes necesarios para dotar a un contenedor de todas las condiciones controladas requeridas para un desarrollo rápido y seguro de la lechuga, mediante la combinación de tecnologías de bajo consumo energético e hídrico. También se consideró el aprovechamiento del espacio, para lograr la mayor cantidad posible de hortalizas por metro cuadrado

Se realizaron cálculos matemáticos para determinar factores como consumo energético, requerimiento hídrico, impacto ambiental, externalidades positivas, así como costos de producción. Lo anterior, con la finalidad de determinar si es viable la sustitución de métodos tradicionales de cultivo por técnicas modernas, como la propuesta en este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aecl Group. (2024). *Aecl Group*. Obtenido de <https://www.aecl.com.tw/es/product/avc-310.html>
- AEQ. (19 de Enero de 2022). *¿Qué es la Huella de Carbono y por qué es importante?* Obtenido de Tecnología organizativa: [https://aeq-consulting.es/que-es-la-huella-de-carbono-y-por-que-es-importante/?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAiAmsurBhBvEiwA6e-WPIf6T0suxftRluwP4q9HGIFQVEoSeiS8UAjQEgMS4iFOBjelkYsM6xoCwq0QAvD\\_BwE](https://aeq-consulting.es/que-es-la-huella-de-carbono-y-por-que-es-importante/?gad_source=1&gclid=CjwKCAiAmsurBhBvEiwA6e-WPIf6T0suxftRluwP4q9HGIFQVEoSeiS8UAjQEgMS4iFOBjelkYsM6xoCwq0QAvD_BwE)
- Agropinos. (28 de Agosto de 2019). *Tecnología, la clave para lograr cultivos sostenibles*. Obtenido de <https://www.agropinos.com/blog/tecnologia-agricola-para-mas-sostenibilidad>
- Alimentando la inocuidad. (2024). *Sostenibilidad y economía circular*. Obtenido de <https://alimentandolainocuidad.com/sostenibilidad-y-economia-circular/>
- Antón, A., Aranda, X., Biel, C., Herralde, F., Montero, J., Montero, J. I., . . . Savé, R. (2011). *Manual del aplicador de CO2 en cultivos hortícolas*. España: Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.
- Arias, F. G. (2012). *El Proyecto de Investigación introducción a la metodología científica 6ª Edición*. Caracas - República Bolivariana de Venezuela: Editorial Episteme. Obtenido de file:///C:/Users/ESTEBAN/Downloads/FidiasG.Arias.ElProyectodelInvestigacin6ta.Edicin.pdf
- ASHRAE . (2005). *Manual ASHRAE*. Atlanta: ASHRAE .
- ASHRAE. (1997). *ASHRAE Handbook 1997 Fundamentals (Vol. Fundamentals)*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- Ávila Sánchez, H. (2019). *Agricultura urbana y periurbana: Reconfiguraciones territoriales y potencialidades en torno a los sistemas alimentarios urbanos*. México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, Universidad Nacional Autónoma de México. Obtenido de <https://doi.org/10.14350/rig.59785>
- Ball Seed Company. (2024). *Plan lumínico en Dialux Production of lettuce and leafy greens*. West Chicago: Ball Seed Company.
- BID. (2020). *Manual de implementación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en la construcción*. Argentina: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Cabezas, R. (2021). *MANUAL ESPECIALIZADO EN INSTALACIÓN Y PRODUCCIÓN DE CULTIVOS HIDROPÓNICOS*. Bolivia: iiiTAM Instituto de Investigación e Innovación Tecnológica en Agricultura Moderna.

Cannan Media. (2019 de marzo de 2019). *MÉTODO DE CULTIVO EN AGUAS PROFUNDAS: HYDRO DWC*. (A. I. CIENTÍFICOS., Editor) Obtenido de <https://es.cannabis-mag.com/methode-de-culture-en-eau-profonde-hydro-dwc/>

Castro Granados, J. R., Brenes Peralta, L., Jiménez Morales, M. F., & Campos Rodríguez, R. (2021). *Análisis de ciclo de vida de lechuga (Lactuca sativa) cultivada bajo un sistema orgánico y convencional, como insumo para toma de decisiones en dos fincas agrícolas costarricenses*. Costa Rica: Tecnología en Marcha.

Certis Belchim. (26 de 07 de 2022). *Agricultura tradicional: Características y diferencias con la intensiva*. Obtenido de <https://certisbelchim.es/agricultura-tradicional-caracteristicas-y-diferencias-con-la-intensiva/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20agricultura%20tradicional,cultivo%20familiar%20y%20de%20subsistencia.>

CNFL. (2024). Consolidado de Tarifas. CNFL.

Contreras Avilés, C. W. (2020). *Fábrica de plantas con iluminación artificial para el cultivo y preservación sostenible de hierbas medicinales*. Panamá: Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá. Obtenido de <http://portal.amelica.org/ameli/journal/324/3241484001/html/>

Copper Group . (2024). San José.

Corponet. (9 de junio de 2022). *La agricultura industrial: qué es, características y concepto*. Obtenido de <https://blog.corponet.com/la-agricultura-industrial-que-es-caracteristicas-y-concepto>

Dantherm Group . (1 de agosto de 2023). *Por qué la agricultura en ambientes controlados (CEA, del inglés «Controlled Environment Agriculture») es el futuro de la agricultura*. Obtenido de <https://www.danthermgroup.com/es-es/calorex/por-qu%C3%A9-la-agricultura-en-ambientes-controlados-cea-del-ingl%C3%A9s-controlled-environment-agriculture-es-el-futuro-de-la-agricultura>

DryGair Energies LTD. (2023). *Climatización Hidropónica: Invernadero e Interior*. Obtenido de <https://drygair.com/es/blog-es/climatizacion-hidroponica-invernadero-e-interior/>

EEAFBN. (2024). *Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno*. Obtenido de <https://eeafbm.ucr.ac.cr/>

EOS Data Analytics,Inc. (23 de abril de 2021). *Agricultura Intensiva: Propiedades E Impacto Ambiental*. Obtenido de <https://www.eosdataanalytics.com/es-es/la-agricultura-intensiva-necesidades-alimentarias-del-ser-humano>

- EPA. (2023 de Junio de 2023). *Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*. Obtenido de Descripción general de los gases de efecto invernadero: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Eurofins Enviroment Testing Spain. (14 de Agosto de 2023). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve*. Obtenido de <https://www.eurofins-environment.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida-que-es/>
- Ever Green. (2024). <https://www.evergreencr.com/>. Obtenido de <https://www.evergreencr.com/>
- Fernández del Reguero, S. (2020). *Análisis energético de un sistema agrario: estudio de caso de una parcela de tomates en el bajo Guadalquivir*. España: Universidad de León.
- Fernando Alzate, D., Jaramillo, J. E., Ramírez, R., Igor León, R., Villagrán, E. A., Ayarza, M. Á., & Mañunga, A. (2017). *Uso de información agroclimática y su aplicación en el diseño y optimización de estructuras para sistemas de agricultura protegida – Versión 1.0*. Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).
- Flores Quirós, L. A. (2017). *Diseño del sistema de aire acondicionado y ventilación para el edificio del Centro Nacional de Control del Dolor y Cuidados Paliativos*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Garzón Parra, V. (2019). *Diseño e implementación de sistema de control para distribución de luz para cultivos en ambientes controlados*. Colombia: Universidad de Los andes, Colombia.
- Generación Verde. (8 de abril de 2017). *Tipos de sistemas hidropónicos para cultivar*. Obtenido de <https://generacionverde.com/blog/hidroponia/tipos-de-sistemas-hidroponicos/>
- Google Earth. (2024). *Google Earth*. Obtenido de [https://earth.google.com/web/search/ciudad+de+san+jo%c2%b4se/@9.92741981,-84.08749263,1162.80424986a,11206.50576015d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCceDJO\\_fZzBAEdRlKEW\\_2xJAGeVDh0dy7U\\_Ald2CUDoM-lbAOgMKATA](https://earth.google.com/web/search/ciudad+de+san+jo%c2%b4se/@9.92741981,-84.08749263,1162.80424986a,11206.50576015d,35y,0h,0t,0r/data=CigiJgokCceDJO_fZzBAEdRlKEW_2xJAGeVDh0dy7U_Ald2CUDoM-lbAOgMKATA)
- Grupo Chamartin, Chamsa. (31 de marzo de 2021). *Agricultura Intensiva*. Obtenido de <https://grupochamartin.com/noticias/agricultura-intensiva/>
- Henríquez Granados, R. R., Orellana Mejía, M. J., & Rosa Chávez, L. E. (2016). *PROPUESTA PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE AIRE DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS EN EL EDIFICIO DE INGENIERÍA MECÁNICA*. El Salvador: Universidad de El Salvador.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: MCGRAW-HILL. Obtenido de <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp->

content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf

HORTITEC. (2024). *HORTITEC*. Obtenido de <https://www.hortitec-cr.com/products/50/temporizador-analogo-de-24-horas>

IDEAM. (2023). *Importancia de la radiación solar*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta#:~:text=Espectro%20electromagn%C3%A9tico%20de%20la%20radiaci%C3%B3n,200%20nm%20a%203.000%20nm>).

ILUMINET. (Enero de 2018). *ILUMINET*. Obtenido de <https://iluminet.com/que-es-un-lux/>

INFOJARDIN. (2023). *infojardin.com*. Obtenido de <https://fichas.infojardin.com/hortalizas-verduras/lechugas-lechuga-iceberg-lechuga-romana.htm>

Instituto Meteorológico Nacional. (2020). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero*. San José: IMN.

Kilimo. (2022). *Academia de riego Kilimo*. Obtenido de <https://academiaderiego.kilimo.com/informe-pasos-para-calcular-el-consumo-de-agua-de-los-cultivos/#>

Lira Oliver, A., & Guevara Mon, A. B. (2017). *Comprensión del espectro electromagnético en la región del espectro solar*. Colombia: Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.

Lizano Astorga, D. R. (2020). *Cultivo hidropónico NFT de lechuga (Lactuca sativa L.: Asteraceae) con diferentes cultivares, soluciones nutritivas y microorganismos benéficos en ambiente protegido en San Clara, San Carlos*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Loachamín Oña, E. S. (2019). *Estimación del impacto ambiental basado en el análisis del ciclo de vida de la fase agrícola de la cadena agroalimentaria convencional y agroecológica de la lechuga (LACTUCA SATIVA) en el cantón de Cayambe*. Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.

López Molina, Y. (2005). Control climático en invernaderos. *Horticultura*.

Martínez Fonseca, J. L., Tijerina Chávez, L., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A., & Becerril-Román, A. E. (2007). *Determinación de zonas agroclimáticas para la producción de mango (Mangifera indica L. "Manila") en Veracruz, México*. México: Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

Medium. (23 de Mayo de 2019). *¿Que es la Eficiencia luminosa?* Obtenido de <https://medium.com/@ledtse/que-es-la-eficiencia-luminosa-2214b237c853>

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Guía para el Cálculo de la Huella de Carbono y para la Elaboración de un Plan de mejora de una organización*. España: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Obtenido de [file:///C:/Users/ESTEBAN/OneDrive/Documentos/esteban/universidad/Licenciatura/Tesis%20Licenciatura/Gases%20de%20efecto%20invernadero/guia\\_huella\\_carbono\\_tcm30-479093.pdf](file:///C:/Users/ESTEBAN/OneDrive/Documentos/esteban/universidad/Licenciatura/Tesis%20Licenciatura/Gases%20de%20efecto%20invernadero/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf)
- Muñoz Razo, C. (2011). *Cómo elaborar y asesorar*. México: PEARSON EDUCACIÓN,. Obtenido de <http://www.indesgua.org.gt/wp-content/uploads/2016/08/Carlos-Mu%C3%B1oz-Razo-Como-elaborar-y-asesorar-una-investigacion-de-tesis-2Edicion.pdf>
- Naturgy. (21 de Diciembre de 2018). *La eficacia luminosa*. Obtenido de [https://www.naturgy.es/empresas/blog/la\\_eficacia\\_luminosa\\_elige\\_la\\_lampara\\_mas\\_eficiente](https://www.naturgy.es/empresas/blog/la_eficacia_luminosa_elige_la_lampara_mas_eficiente)
- Navarro Martínez, F. (18 de agosto de 2023). *Agricultura vertical: ¿moda o solución?* (INESEM, Editor) Obtenido de <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/agricultura-vertical/>
- OMS. (6 de Julio de 2022). *Informe de la ONU: El número de personas que padecen hambre en el mundo aumentó a 828 millones en 2021*. Obtenido de <https://www.paho.org/es/noticias/6-7-2022-informe-onu-numero-personas-que-padecen-hambre-mundo-aumento-828-millones-2021>
- ONU. (20 de julio de 2020). *10 cosas que debes saber sobre la agricultura industrial*. Obtenido de [https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/10-cosas-que-debes-saber-sobre-la-agricultura-industrial#:~:text=Seg%C3%BAn%20algunas%20estimaciones%2C%20la%20agricultura,U\\$%24%203%20billones%20al%20a%C3%B1o.](https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/10-cosas-que-debes-saber-sobre-la-agricultura-industrial#:~:text=Seg%C3%BAn%20algunas%20estimaciones%2C%20la%20agricultura,U$%24%203%20billones%20al%20a%C3%B1o.)
- PANEL SANDWICH GROUP. (2024). *PANEL SANDWICH GROUP*. Obtenido de <https://panelsandwich.mx/panel-refrigeracion/panel-camara-refrigeracion-muro>
- PCE-Instruments. (2024). *PCE-Instruments*. Obtenido de [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/termohigrometro-pce-instruments-termohigr\\_metro-pce-g1a-con-salida-anal\\_gica-det\\_5931349.htm](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/termohigrometro-pce-instruments-termohigr_metro-pce-g1a-con-salida-anal_gica-det_5931349.htm)
- Photosystem. (2019). *Micromoles de fotones, la medida de la luz para las plantas*. Obtenido de <https://photosystem.es/micromoles-de-fotones-la-medida-de-la-luz-para-las-plantas/>
- Pittí P., Y., González T., G., Brandao Delgado, J. L., Guillén Pérez, V., Serrano Reyes, J., Saengtharapip, S., & Tejedor E., W. (2024). *Evaluación económica de un cultivo de lechuga romana bajo ambiente controlado, a escala experimental*. Panamá: Revista Plus Economía.

- PROAIN. (27 de Octubre de 2020). *La radiación solar en cultivos bajo invernaderos*. Obtenido de <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/la-radiacion-solar-en-cultivos-bajo-invernaderos>
- PROMUEVEHIDROPONÍA. (27 de noviembre de 2014). *NASA: CULTIVOS HIDROPÓNICOS EN EL ESPACIO*. Obtenido de <https://hidroponia.mx/nasa-cultivos-hidroponicos-en-el-espacio/>
- Purasol, S. S. (2024). *Sistema fotovoltaico*. San José.
- Quispe Gamboa, C. N. (2016). *Análisis de la energía incorporada y emisiones de CO2 aplicadas a viviendas unifamiliares de eficiencia energética*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Ramos Gonzalías, Y., & Ramírez Lasso, E. (2016). Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores - Vertical Farming (VF). *Informador Técnico (Colombia)*, 120.
- Redondo Quintero, D. (2023). *Desarrollo de un sistema de cultivo hidropónico*. Valladolid España: Universidad de Valladolid Escuela de Ingenierías Industriales.
- Rodríguez Soto, A. (2023). *Eficiencia hídrica y productiva de tres sistemas de producción vertical con distintos grados de tecnificación, y su influencia en el crecimiento y rendimiento de lechuga (Lactuca sativa)*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Rojas Montero, S. J. (2023). *Efecto de variables productivas en un sistema hidropónico orbital computarizado sobre características comerciales de lechuga (Lactuca Sativa L)*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
- Sábada, S., Del Castillo, J., Astiz, M., Sanz De Galdeano, J., Uribarri, A., & Aguado, G. (2008). *Cultivo Hidropónico de lechuga*. Navarra: ULMA Agrícola.
- Santini, G. (2023). *La agricultura urbana y periurbana*. Organigrama de la FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/urban-peri-urban-agriculture/es>
- Sela, G. (10 de julio de 2023). *Cropaia*. Obtenido de <https://croipaia.com/es/blog/sistemas-hidroponicos/>
- Signify Holding. (2019). *Soluciones LED para Horticultura*. Signify Holding.
- Sistemas Hortícolas Almería S.L. (31 de marzo de 2022). *Riego hidropónico: ¿Qué es, cómo funciona y cuáles son sus ventajas?* Obtenido de <https://www.sistemashorticolasalmeria.com/blog/riego-hidroponico/#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20el%20riego%20hidrop%C3%B3nico,el%20desarrollo%20de%20los%20cultivos.>

- SMEAP. (22 de abril de 2022). *Tipos de Sistemas Hidropónicos (Cultivos en agua y aire)*. (S. C. Aplicada, Editor) Obtenido de <https://smeapmexico.org/tipos-de-sistemas-hidroponicos-cultivos-en-agua-y-aire/>
- Soler & Palau Ventilation Group. (2024). *La climatización de invernaderos*. Obtenido de <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-la-climatizacion-de-invernaderos/>
- Sostenible o Sustentable. (18 de Mayo de 2023). *Sostenible o Sustentable*. Obtenido de [https://sostenibleosustentable.com/es/economia-verde/externalidades-negativas-positivas/#:~:text=Teorema%20de%20Coase\)-,Externalidades%20Positivas,acciones%20a%20veces%20son%20poderosas.](https://sostenibleosustentable.com/es/economia-verde/externalidades-negativas-positivas/#:~:text=Teorema%20de%20Coase)-,Externalidades%20Positivas,acciones%20a%20veces%20son%20poderosas.)
- The Oil Crash. (14 de Febrero de 2013). *Energía y agricultura*. Obtenido de <https://crashoil.blogspot.com/2013/02/energia-y-agricultura.html>
- Tierra, P. (octubre de 2023). *Agricultura urbana como una solución sostenible*. Obtenido de <https://www.plataformatierra.es/innovacion/agricultura-urbana-como-solucion-sostenible/>
- Tintoré , E. (17 de mayo de 2021). *La agricultura industrial daña el clima y destruye la biodiversidad*. Obtenido de <https://www.lavanguardia.com/natural/20210517/7459631/agricultura-industrial-dana-clima-destruye-biodiversidad.html>
- Tradecorp. (25 de mayo de 2023). *Tipos de agricultura tradicional*. Obtenido de <https://tradecorp.es/tipos-de-agricultura-tradicional/>
- Valverde Araya, F. J. (2021). *DISEÑO DE SISTEMA IDÓNEO PARA EL SECADO DE GRANOS DE CAFÉ EN COSTA RICA, CUYO FUNCIONAMIENTO PARTA DE LA UTILIZACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES*. San José, Costa Rica: UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS.
- Vega Charpentier, O. (2015). *Uso eficiente de la energía en las cadenas agrícolas de alimentos*. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Wallace-Springer, N. (7 de setiembre de 2023). *¿Qué debes de saber acerca de la agricultura vertical?* (PRO-MIX, Editor) Obtenido de <https://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/qu%C3%A9-debes-de-saber-acerca-de-la-agricultura-vertical/>
- Weather Atlas. (2024). *Clima y previsión meteorológica mensual San José, Costa Rica*. Obtenido de <https://www.weather-atlas.com/es/costa-rica/san-jose-clima>
- Yuyi Tecnología . (2024). *Yuyi Tecnología* . Obtenido de <https://www.growtraysupplier.com/>
- Zárate Aquino, M. A. (2014). Manual de hidroponía. En M. d. hidroponía, *Margarita Araceli Zárate Aquino* (pág. 42). Mexico: Instituto de Biología [www.ibiología.unam.mx](http://www.ibiología.unam.mx).


## ANEXOS

## Anexo A: Exoneraciones fiscales y tarifas reducidas en Costa Rica

	 <b>MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERÍA</b>	<b>GOBIERNO DE COSTA RICA</b>
<b>DESPACHO MINISTRO</b>		
26 de febrero 2024 DM-MAG-257-2024		
Señor Esteban Vargas Arguedas		
Estimado señor:		
<p>Luego de saludarlo, me refiero a la consulta remitida por su persona, vía correo electrónico dirigido al señor Presidente de la República, el pasado 16 de febrero del 2024, misma que fue remitida a este despacho con el oficio PR-DP-GD-0407-2024.</p>		
<p>Sobre el particular le manifiesto que, la legislación costarricense contempla en general exoneraciones fiscales y aplicación de tarifa reducida del 1% del IVA, para el fomento a la actividad agropecuaria. Esto lo puede encontrar regulado en la Ley 7293 art 5 denominada, Ley Reguladora de todas las Exoneraciones Vigentes, Derogatorias y Decreto Ejecutivo N°41015-MAG-MEIC-H y Ley 9635 denominada Ley de Fortalecimiento de las Finanzas Públicas, Decreto Ejecutivo N°41824-H-MAG.</p>		
<p>En dicha legislación se establece el procedimiento, así como las listas taxativas de maquinaria, equipo e insumos que se ajustan a la modalidad de producción bajo ambientes protegidos, misma que se aproxima al modelo de producción de bajo impacto ambiental y adaptable a las condiciones de la urbanidad, indicada por usted.</p>		
<p>Es importante tener en consideración, que, para acceder a la exoneración mencionada, el interesado debe estar debidamente registrado ante el MAG como productor agropecuario, y ante Dirección General de Tributación del Ministerio de Hacienda.</p>		
Atentamente,		
 Victor Julio Carvajal Porras <b>MINISTRO</b>		
KMS/mab		
C.: Sres. Gestión Documental, Presidencia de la República Sra. Karla Mena Soto, Directora Nacional de Extensión Agropecuaria		

**Fuente:** Ministerio de Agricultura y Ganadería (2024)

**Anexo B:** Obligaciones tributarias directamente relacionadas al tema en estudio



**MINISTERIO DE HACIENDA**

**GOBIERNO DE COSTA RICA**

**DIRECCIÓN GENERAL DE HACIENDA**

San José, 21 de febrero del 2024  
MH-DGH-OF-064-2024

Señor  
Esteban Vargas Arguedas  
servie.vargas@gmail.com

**Asunto: Consulta sobre exoneración**

Estimado señor:

En atención a su correo electrónico del 16 de febrero del 2024 dirigido al Despacho del señor Presidente de la República, y en ocasión al oficio PR-DP-GD-0407-2024 del 19 de febrero de 2024 emitido por la Coordinadora de Gestión Documental de Presidencia de la República, procedo a dar respuesta a su consulta relativa a si en Costa Rica existe o no algún tipo de exoneración o incentivo para proyectos que buscan favorecer al ambiente.

Considerando que las exoneraciones son establecidas por la Asamblea Legislativa, después de revisar el conjunto de normativa vigente, podemos concluir que no existe ninguna disposición de carácter legal que dispense de las obligaciones tributarias directamente a proyectos conocidos como granjas urbanas.

Existen otro tipo de incentivos como por ejemplo la exención para la promoción y fomento de la actividad agropecuaria orgánica (artículo 26 de la Ley N° 8591), tarifas reducidas para insumos de canasta básica (Artículo 11 de la Ley N° 6826 vigente), o incluso exención para la adquisición de materias primas para la elaboración de los insumos para la actividad agropecuaria (Artículo 5 de la Ley N° 7293). No obstante lo anterior, no existe ninguna exoneración para proyectos destinados a la creación de cuartos con ambientes controlados donde se puedan cultivar alimentos dentro de la ciudad, haciendo un uso racional de los recursos naturales y sin utilizar agroquímicos.

Cualquier consulta adicional en materia de exoneraciones, puede dirigir su consulta al correo electrónico [exoneraciones@hacienda.go.cr](mailto:exoneraciones@hacienda.go.cr) y con todo gusto podremos evacuarle cualquier otra inquietud al respecto.

Sin otro particular

**RUDOLF LUCKE**  
**BOLAÑOS**  
**(FIRMA)**

Firmado digitalmente por RUDOLF LUCKE BOLAÑOS (FIRMA)  
Fecha: 2024.02.21 14:52:47 -06'00'

Rudolf Lucke Bolaños  
Director General de Hacienda

<p>LUIS JAVIER RIVERA MONTAÑA (FIRMA)</p>	<p><b>JUAN CARLOS BRENES BRENES (FIRMA)</b></p> <p style="font-size: x-small;">Firmado digitalmente por JUAN CARLOS BRENES BRENES (FIRMA) Fecha: 2024.02.21 12:02:11 -06'00'</p>
<p>Elaborado por Luis Javier Rivera Montaña, Jefe Departamento de Gestión de Exenciones</p>	<p>Revisado por Juan Carlos Brenes Brenes Subdirector de Incentivos Fiscales</p>

c.c: Victor Carvajal Parras, Ministro Ministerio de Agricultura y Ganadería  
Alexa Benavides Ayala, Coordinadora Gestión Documental de Presidencia de la República  
[gestion.documental@presidencia.go.cr](mailto:gestion.documental@presidencia.go.cr)  
archivo consecutivo

**Fuente:** Ministerio de Hacienda (2024)

### Anexo C: Crédito Ciudad Verde para MiPyMes

**CRÉDITO CIUDAD VERDE**

**OBJETIVO**  
 Brindar oportunidades de financiamiento a MiPyMes que representen iniciativas de transformación urbana que promuevan la agricultura urbana, arquitectura verde, ecodiseño, encadenamientos productivos, turismo sostenible y las sub áreas de estas.

**CONDICIONES DE FINANCIAMIENTO**

**MONTO**  
 30.000.000 CRC  
 500.000 CRC

**PLAZO**  
 Hasta por 120 meses

**TASA DE INTERÉS**  
 TBD+4% TBD+8.75%

**GARANTÍA**  
 Hipotecaria, Mobiliaria, Drendaria, Fiduciaria, Aval FIDEIMAS

**MEJORAS A FINANCIAR:**  
 Compra de insumos, equipo y/o maquinaria  
 Capital de trabajo para el desarrollo de la actividad  
 Mejoras en infraestructura  
 Mejora de procesos o productos finales

**PERIODO DE PAGO**  
 Diferenciados, A la medida

**PERIODO DE GRACIA**  
 Total, Parcial

Condiciones van a depender de su actividad productiva. Periodo máximo de gracia es de hasta 12 meses.

Info@fundecooperacion.org | +506 8615-2112 | www.fundecooperacion.org | +506 2225-4507 | @Fundecooperacion | fundecooperacion

Logos: MINAE, SINAC, Corredores Biológicos, Fundecooperación, giz, República de Guatemala.

Fuente: Fundecooperación para el Desarrollo Sostenible (2024)

### Anexo D: Tarifas eléctricas especiales para proyectos sostenibles

David Chacón Huamán <chaconhd@aresep.go.cr> 5 de octubre de 2023, 11:08  
 Cc: "servie.vargas@gmail.com" <servie.vargas@gmail.com>, Jorge Espinoza Gutiérrez <espinozagj@aresep.go.cr>, Juan Edy Urbina Ugarte <urbinauj@aresep.go.cr>, Melany Sánchez Villalobos <sanchezvm@aresep.go.cr>

Buenos días estimado Esteban,

A manera de contexto es importante que tenga presente, que la ARESEP por medio de la Intendencia de Energía establece los precios, tarifas o márgenes del sector de energía (electricidad e Hidrocarburos), donde algunas de las tarifas que actualmente se encuentran vigentes responden a políticas públicas impulsadas por el Ejecutivo a través de los diferentes planes sectoriales, decretos o leyes.

Como ejemplo de lo anterior, se han logrado establecer una tarifa a clientes conectados en media tensión, cuyo uso de energía es para impulsar la actividad del hidrógeno verde de conformidad con el Decreto N. 43366- MINAE. Al igual que esa tarifa, la cual, responde a una política pública en concreto, también tenemos otros ejemplos, tarifa T-MTb, tarifa prepaga, centros de recarga (T-VE), entre otras. Sin embargo, actualmente, no se cuenta con una tarifa específica para la actividad que estas comentando,

Sin otro en particular.

**aresep** AUTORIDAD REGULADORA DE LOS SERVICIOS PÚBLICOS

**David Chacón Huamán**  
 Intendencia de Energía

T (506) 2506-3200 ext. 1456

Fuente: ARESEP (2023)

## Anexo E: Descripción de luminaria LED GreenPower

**PHILIPS**

Soluciones LED para Horticultura

GreenPower LED production module 3.0

**LED**

Control total y flexibilidad para optimizar cultivos multicapa.

Ya sea que utilice un sistema de múltiples capas para cultivar la lechuga más crujiente, la albahaca más sabrosa u otras verduras o frutas, GreenPower LED production module 3.0 le permite optimizar su iluminación para cada cultivo y alcanzar sus objetivos comerciales. Obtenga una ventaja en su mercado al adecuar nuestras recetas de luz indicadas para adaptar diferentes etapas de crecimiento, tratamientos previos a la cosecha y nuevos cultivos. Gracias a la óptica de haz de luz ancho y su alta intensidad de luz, este robusto módulo versátil demostrará ser una inversión muy económica.

Nuestro GreenPower LED production module 3.0 ha sido desarrollado para cultivadores que buscan formas más flexibles y rentables de utilizar luces de cultivo LED, para mejorar los resultados del cultivo y la eficiencia operativa en instalaciones de cultivo cerradas y con clima controlado. Este módulo es ideal para que crezcan sistemas multicapa de:

- Lechuga y otras verduras de hoja verde.
- Hierbas
- Frutas suaves.
- Plantas jóvenes

**La mejor luz para cada cultivo**

Con nuestra solución, puede adaptar fácilmente el espectro de color y los niveles de luz de varias recetas de luz indicadas para satisfacer las necesidades de diferentes cultivos y fases de crecimiento.


Al optimizar estos parámetros, puede mejorar la calidad, la consistencia y el rendimiento de sus productos frescos. También puede dirigir características específicas de la planta, tales como la compactidad, la intensidad del color y el sabor para adaptarse a las necesidades del cliente y del mercado local. Esto se puede administrar fácilmente a través del sistema de control Philips GrowWise desde su PC, tableta o teléfono inteligente.

**Beneficios**

- Ajuste del color y el nivel de luz para optimizar el ciclo de crecimiento
- Menos módulos necesarios debido a la óptica de haz de luz ancho
- Proporciona una alta emisión de luz para maximizar el crecimiento de los cultivos

Fuente: (Signify Holding, 2019)

**Anexo F:** Cotización de luminarias LED requeridas para el proyecto

		<b>Ball Horticultural Company</b>	<b>Quote</b>
622 Town Road West Chicago, IL 60185-2698 Tel: 888-333-0066  <a href="http://www.Ballhort.com">www.Ballhort.com</a>		Ship Date: <b>06/16/24</b> Customer: <b>Esteban Vargas A.</b> Business Name: <b>SIE - SERVE</b> Incoterms: <b>CIF Costa Rica</b> Quote Date: <b>April 1, 2024</b>	
BillTo: Esteban Vargas Arguedas <b>Servicios De Ingenieria Electromecanica Serve</b> Szaragoza, Palmares Alajuela, Costa Rica		Ship To: Esteban Vargas <b>Servicios De Ingenieria Electromecanica Serve</b> Szaragoza, Palmares Alajuela, Costa Rica	
Phone:		Phone:	
Customer PO:		Fax:	
CUSTOMER NO.	SALES REP:	TERMS	
Incoterm:	CIF Costa Rica		
SHIP POINT	SHIP VIA	INSTRUCTIONS	
Ball Horticultural Co.			

VARITY/DESCRIPTION	QTY	QTY U/M	UNIT PRICE	PRICE U/M	AMOUNT
GPL PM 210 DRW_LB L150 3.1 NA (929002100559)	110	each	\$223.93	each	\$24,632.30
GPL A PM Bracket End Hook (929002100096)	220	each	\$2.16	each	\$475.20
GPL A U Conn F RST16i2 Black (929002100099)	110	each	\$9.03	each	\$993.30
			<b>Total</b>		<b>\$26,100.80</b>
			<b>IVA</b>		<b>TBD</b>
<b>Entregado CIF Costa Rica</b>			<b>G / Total</b>		<b>\$26,100.80</b>
<b>50% Anticipo y 50% contra entrega</b>					

**Fuente:** (Ball Seed Company, 2024)

## Anexo G: Ficha técnica para luminaria LED modelo GLP PM 210 DRW LB L150

Especificaciones de producto																											
Espectro		DR/B				DR/B/FR						DR/W				DR/W/FR						DR/B/W/FR					
Longitud (cm   pies)		120 4		150 5		120 4		150 5		240 8 <sup>1</sup>		120 4		150 5		240 8 <sup>1</sup>		120 4		150 5		240 8 <sup>1</sup>		120 4		150 5	
Nivel azul		LB	HB	LB	HB	-	-	LB	LB	LB	-	-	-	LB	LB	-	-	LB	LB	LB	-	-	-	-	-	-	
Tipo		Estático				Control de color 2 canales		Estático				Control de color 3 canales		Estático		Control de color 2 canales		Estático				Control de color 3 canales		Control de color 4 canales			
Flujo de fotones Tip.	μmol/s	168	168	210	210	0-168	0-210	168	210	210	0-168	0-210	0-210	168	210	0-168	0-210	168	210	210	0-168	0-210	0-210	0-168	0-210	0-168	0-210
Potencia nominal	W	56	59	70	74	0-77	0-97	56	70	70	0-77	0-97	0-97	63	79	0-77	0-97	63	79	79	0-77	0-97	0-97	0-77	0-97	0-77	0-97
Eficacia	μmol/J	3.0	2.8	3.0	2.8	≤3.0	≤3.0	3.0	3.0	3.0	≤3.0	≤3.0	≤3.0	2.7	2.7	≤2.7	≤3.0	2.7	2.7	2.7	≤2.7	≤2.7	≤2.7	≤3.0	≤3.0	≤3.0	≤3.0

		120	150	240
Longitud	cm   pies	120 4	150 5	240 8
Peso (driver incluido)	kg   libras	1.25   2.76	1.45   3.20	2.05   4.52
Flujo típico de fotones	μmol/s	168	210	210
Potencia (nominal   máx.)	W	56-63   77	70-79   97	70-79   97
Eficacia	μmol/J	Up to 3.0		
Ancho de haz		140°		
Potencia de entrada <sup>3</sup>	VAC	120-277		
Factor de potencia		≥ 0.9		
Vida promedio nominal**	horas	L90, 36,000 hrs		
Clasificación de protección		IP66   UL adecuado para lugares húmedos		
Enfriamiento		Refrigerado por aire pasivamente		
Marcas de aprobación		CE, UL, CSA, RCM, PSE		
Garantía		3 años		
Accesorios		Amplia gama de accesorios disponibles para una instalación fácil y rápida		

**Leyenda**  
**DR** = Rojo profundo  
**B** = Azul  
**FR** = Rojo lejano  
**W** = Blanco  
**LB** = Azul bajo  
**HB** = Azul intenso

<sup>1</sup> No para Japón.  
<sup>2</sup> Solo Japón.  
<sup>3</sup> 50-60 Hz.  
<sup>4</sup> Los valores de vida útil y mantenimiento se dan a una temperatura ambiente de 25 °C / 77 °F. Todos los tiempos de vida medidos son resultado estándar de la industria que indican la duración promedio de la operación y no una declaración de rendimiento específico de ningún producto individual.

Fuente: (Signify Holding, 2019)

**Anexo H:** Formulario para datos asociados a un determinado recinto según el método CLTD

92

5) Obtener el valor de U en  $W/m^2\cdot K$ , con la fórmula

$$U = \frac{1}{R}$$

6) Obtener el área de techo A en  $m^2$

7) Calcular la carga térmica en watts

**Paredes**

1) Obtener el Code # de la tabla 11 del capítulo 28

- a. Obtener de la lista el código de pared, buscando el tipo de construcción más parecido al utilizado en la realidad. Tomar en cuenta el material y espesor de pared para aproximar.
- b. Obtener el valor de R de la pared según el método utilizado en el paso anterior. Comparar este valor calculado con el valor de la tabla.
- c. Si los valores de R difieren mucho, buscar una alternativa con valores más cercanos para el código de pared.

2) Con el código de pared, ir a la tabla 33 del capítulo 28

- a. Con el código de pared, y el material secundario (por ejemplo, recubrimiento), buscar un wall type.
- b. Puede darse el caso que el código de pared elegido en el paso anterior no esté disponible en la tabla 33. Si esto sucede, buscar un código de pared similar.
- c. La tabla 33 está dividida en tres secciones:

- i. Tabla 33A: masa localizada entre aislamiento
  - ii. Tabla 33B: Masa distribuida uniformemente
  - iii. Tabla 33C: Masa fuera del aislamiento
- 3) Con el wall type obtenido en el paso anterior, ir a la tabla 32
    - a. Buscar según el wall type, la orientación de la pared, y la hora a la que se desee hacer el cálculo de carga térmica, el valor de CLTD
    - b. Obtener el valor de CLTD<sub>corr</sub>, igual al cálculo para techos
  - 4) Obtener los valores de U, área A para cada pared
  - 5) Calcular la carga térmica en watts

#### **Ventanas – conducción**

- 1) Según la hora del día a la que se realice el cálculo de carga, obtener de la tabla 34 del capítulo 28 el valor de CLTD
- 2) Obtener el CLTD<sub>corr</sub>
- 3) De cada ventana, determinar:
  - a. Orientación
  - b. Cantidad de ventanas: generalmente, hay varias ventanas iguales en cada pared del edificio
  - c. Factor U: de la tabla 4 del capítulo 30, obtener el valor U en  $W/m^2 \cdot K$ . La tabla hace distinción entre espesor del vidrio, vidrio sencillo o múltiple, recubrimiento (glazing), si es operable o fija, y el tipo de construcción del marco. Determinar el valor más adecuado según las características de la ventana

d. Área de la ventana en  $m^2$

4) Obtener la carga en watts

#### **Ventanas – radiación solar**

- 1) Obtener el *zone type* según el tipo de construcción, de la tabla 35B del capítulo 28. Se requiere determinar
  - a. Número de paredes a las que les da el sol que entra por la ventana (*No. Walls*)
  - b. Tipo de piso (alfombra o vinílico) (*floor covering*)
  - c. Tipo de paredes a las que les da el sol (*partition type*)
  - d. Si existe o no cortinas o dispositivos similares (*inside shade*)
- 2) Con estos parámetros definidos, se obtiene de la columna *Zone Type*, el valor correspondiente en la columna *Glass Solar* (A, B, C o D).
- 3) El valor SC es el "shade coeficient", el cual generalmente el fabricante de ventanas da. En caso de desconocerse, se debe poner un valor de 1.
- 4) El valor SCL se obtiene de la tabla 38, capítulo 28, según la orientación de la ventana, la hora del día, y el parámetro *Glass Solar* obtenido anteriormente (A, B, C o D)

#### **Particiones, cielos, pisos**

- 1) Obtener el valor de U, según el procedimiento visto para techos.
- 2) Obtener el valor del área para la partición

3) Las temperaturas  $t_1$  y  $t_2$  corresponden a:

$t_1$ : temperatura dentro del recinto que se quiere acondicionar

$t_2$ : temperatura en el espacio adyacente con el que el recinto a acondicionar comparte la partición

**NOTA:** se considera una partición a un espacio adyacente a la zona acondicionada, el cual tiene una temperatura diferente (generalmente mayor). Por ejemplo, puede ser un baño o una bodega sin acondicionamiento de aire.

Además, si se va a acondicionar un piso de un edificio, y los pisos inferior o superior no son acondicionados, estos se consideran particiones.

#### Personas

- 1) Determinar la cantidad de personas presentes en el recinto. Si esto se desconoce, utilizar las recomendaciones de ASHRAE presentes en el Estándar 62.1 (ASHRAE, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, 2012), tabla 6.1, para determinar una cantidad promedio de personas según el área y tipo de ocupación.
- 2) Del capítulo 28, tabla 3, determinar el calor sensible y latente generado por persona, según la actividad que esté realizando
- 3) Determinar el valor CLF:
  - a. Si el aire acondicionado se apaga en algún momento, por ejemplo de noche, el valor de CLF será 1.
  - b. Si no, entonces hay que:
    - i. Utilizar el "zone type" obtenido en el apartado "**ventanas – radiación solar**" (A, B, C o D)

98

- ii. Determinar cuanto tiempo permanecerán las personas dentro del recinto
- iii. Obtener el valor para el SCL, según el tiempo que ha transcurrido desde que la persona entró al recinto, hasta la hora del día que se calcula la carga térmica

**NOTA:** este cálculo debe hacerse por separado para las cargas sensibles y latentes, y anotarlas en la casilla correspondiente.

#### Luces

- 1) Determinar la potencia total de luces dentro del recinto. Un valor normal para oficina es de 2 W/m<sup>2</sup>.
- 2) Los valores FUL, FSA y SCL son dependientes del uso, y se asumen con valor 1.0 a menos de que se tengan datos.

#### Motores

- 1) Obtener la potencia nominal del motor, en HP
- 2) Determinar la cantidad de motores dentro del recinto
- 3) Del capítulo 28, tabla 4, obtener la cantidad de calor en watts que genera un motor según los siguientes parámetros:
  - a. Potencia de placa nominal en HP
  - b. Si el motor y el equipo que éste mueve se encuentran fuera o dentro del recinto (columnas A, B o C)

97

#### Artefactos

- 1) Determinar el tipo de artefactos (electrodomésticos, equipos de audio y video, computadoras, etc) presentes dentro del recinto
- 2) Obtener datos del calor generado según el tipo de artefacto. Esto se puede obtener de las tablas 8 y 9 del capítulo 28, del artículo "Heat Gain From Office Equipment", o de los manuales de los equipos.
- 3) El valor CLF se obtiene de forma similar a la anterior, y generalmente es de 1.0.

**NOTA:** ciertos equipos como cafeteras y hornos pueden generar carga latente. Se debe considerar esta carga y anotarla en el espacio correspondiente.

**Fuente:** (Flores Quirós, 2017)

### Anexo I: Transmisión térmica en aislamientos comerciales para paredes

AISLAMIENTO TÉRMICO Y PESO		
ESPESOR MEDIO (MM)	TRANSMISIÓN TÉRMICA (COEFICIENTE K EN W/M <sup>2</sup> K)	PESO (KG/M <sup>2</sup> )
60	0,31	11,32
80	0,24	12,12
100	0,19	12,92
120	0,16	13,72
140	0,14	14,52
160	0,12	15,32
180	0,11	16,12
200	0,09	16,92

Fuente: (PANEL SANDWICH GROUP, 2024)

### Anexo J: Oferta de equipo de aire acondicionado

	Sucursal San José: Guachipelín 800 mts NE de la rotonda de Multiplaza Escazú. Sucursal Liberia: Locales 15 y 16 en Plaza Futura, 3 kms. oeste de la entrada al aeropuerto internacional Daniel Oduber Quirós. Teléfono: 22151814 Cédula: N° 3-102504460 E-mail: info@copperandtools.com		<b>Cotización</b> <b>No. 53976</b>	
	Cliente: CL05198 - Capitanía de Puntarenas		Fecha emisión 23-Apr-2024 Fecha de vencimiento 23-May-2024	
Código Artículo	Descripción	Cant	Precio Unit.	Total Línea
AMAX-T-1220W-I	EVAP MINI 12KBTU 220/1/60 R410A INVERTER SEER 20 GOLD FIN WIFI ADINA	2.00	170.60	341.20
AMAX-T-1220W-E	CONDENSADOR MINI 12KBTU 220/1/60 R410A INVERTER SEER 20 GOLD FIN WIFI ADINA	2.00	316.84	633.68
----- Ultima Línea -----				
Nombre del vendedor: -Ningún empleado del departamento de ventas-				
Términos de pago: Contado				
Carlos Gutiérrez				
*El inventario esta sujeto a ventas diarias.			Sub Total	USD 974.88
*No se garantiza Stock con la cotización.			IVA 13%	USD 126.73
*Se incluye el transporte dentro del GAM (No Incluye Cartago). *Validez de la cotización 1 día hábil.			Total oferta	USD 1,101.61


Fuente: (Copper Group , 2024)

**Anexo K:** Ficha técnica de sistemas de aire acondicionado inverter

Model No.		12K-20 SEER	18K-20 SEER	24K-20 SEER	
		AMAX-T-1220-W-E AMAX-T-1220-W-I	AMAX-T-1820-W-E AMAX-T-1820-W-I	AMAX-T-2420-W-E AMAX-T-2420-W-I	
Type		Cooling only	Cooling only	Cooling only	
Control type		Remote	Remote	Remote	
Rated cooling capacity	Btu/h 标称	12000(2047~12625)	18000(4095-21155)	24000(4606~24900)	
	W 标称	3517(600~3700)	5275(1200~6200)	7030(1350~7300)	
Rated heating capacity	Btu/h	N/A	N/A	N.A	
	W	N/A	N/A	N.A	
EER for cooling	W/W	11.80; 3.45	11.45; 3.35	11.45; 3.35	
COP for heating	W/W	N/A	N/A	N.A	
SEER	Btu/W.h	20,00	20,00	20,00	
HSPF Rating (Region IV)	Btu/W.h	N/A	N/A	N/A	
Moisture removal	Liters/h	1,3	1,8	2,2	
Pressure	High(DP)	MPa	4,5	4,5	
	Low(SP)	MPa	1,9	1,9	
Indoor noise level at cooling	High	dB(A)	39	48	
	Med.	dB(A)	35	42	
	Low	dB(A)	30	37	
Outdoor noise level	dB(A)	52	53	54	
<b>Electrical Data</b>					
Power supply			208-230V~/60Hz	208-230V~/60Hz	208-230V/60Hz/1P
Voltage Range	V		165~265	165~265	165~265
Rated current	Cooling	A	4.8(1.0~7.0)	7.5(1.6~11)	10.0(1.7~14)
	Heating	A	4,8	N/A	N.A
Rated input	Cooling	W	1020(220~1500)	1575(200~2500)	2100(230~2700)
	Heating	W	N/A	N/A	N.A
Max Current	Cooling	A	7,0	11,0	14,0
	Heating	A	N/A	N/A	N.A
Max Power input	Cooling	W	1540	2500	2700
	Heating	W	N/A	N/A	N.A

**Fuente:** (Copper Group , 2024)

## Anexo L: Ficha técnica termohigrómetro PCE-G1A con salida analógica

 <b>PROFESSIONAL. CALIBRATED. EQUIPMENT.</b>		<a href="http://www.pce-instruments.com">www.pce-instruments.com</a>
<b>Características técnicas</b>		<b>Contenido del envío</b>
Rangos de medición	10 - 95 % H.r.	1 x Indicador de temperatura PCE-G1A
Humedad relativa	0 - +60 °C	1 x Sensores con cable de conexión de 1 m
Temperatura		1 x Cable para salida analógica
Resolución	1 % H.r.	1 x Adaptador de red
Humedad relativa	1 °C	1 x Instrucciones de uso
Temperatura		
Precisión	±2 % H.r.	
Humedad relativa	±1 °C	
Temperatura		
Alcance visual	Lectura hasta aprox. 50 m	
Tipo de sensor	HC1000	
Humedad relativa	P11000	
Temperatura		
Tiempo de respuesta T90	Aprox. 4 s	
Longitud de cable (entre el sensor y la pantalla)	1 m	
Pantalla	LED de 100 mm de altura (indicación alterna)	
Salida analógica	Dos canales 4-20 mA	
Alimentación	230 V / 50 ... 60 Hz	
Dimensiones	Sensor 50 x 70 x 20 mm Pantalla 175 x 250 x 75 mm	
Protección	IP 54	
Peso	1,3 kg (sensor y cable incluidos)	

**Más información**

**Fuente:** (PCE-Instruments, 2024)

### Anexo M: Ficha técnica de sensor de CO<sub>2</sub> con señal DC de 0-4 mA

■ Specifications		
Model	AVC-320SAX-M	AVC-320S4X-M
Sensing element	Gold-plated infrared (NDIR) wave-guide technology with Automatic Baseline Correction (ABC) and passive gas diffusion (no moving parts)	
Response time	< 10 sec. @ 30 cc/min. flow rate < 3 min. diffusion time	
Accuracy (at 25°C)	0~2000ppm (± 30ppm ±3% of reading), 2001~9999ppm (± 70ppm ±3% of reading) <sup>(1)(2)</sup>	
Repeatability	± 20ppm + (± reading * 1%)	
Zero Drift	< ± 10ppm/yr. with Automatic Baseline Correction (ABC)	
Measurement range	0 ~ 9999 ppm	
Signal output	DC 4 ~ 20mA	RS485 (Modbus RTU)
Pressure dependence	1.6% reading per kPa	
Loading resistance	Current output: RL<500Ω at 24V DC	
Environmental	Temperature: -10 ~ +60°C; Humidity: 0 ~ 99%RH (without condensation)	
Storage temperature	-20 ~ +70°C	
Warm-up time	≤ 1 min. (at full specs ≤ 15 minutes)	
Power supply	20 ~ 36V DC	12 ~ 36V DC
Power consumption	1.7W (Max.)	1.4W (Max.)
Installation	Wall-mount	
Material	Main unit: Stainless steel; Fixed support: PE	
IP rating	IP54	
<p><b>Note :</b></p> <p>(1) ABC correction will ensure the accuracy with continuous detection of three weeks. However, for some special application, maintenance and calibration would be necessary.</p> <p>(2) The accuracy is applied for indoor temperature 25°C and normal air pressure 101.3kPa. The specification is based on certified calibrated gas. The variation of mixture gas (as ±1%) will be consider as its accuracy as absolute measurement.</p>		

**Fuente:** (Aecl Group, 2024)

### Anexo N: Temporizador analógico Sinowell, código 305101




**Fuente:** (HORTITEC, 2024)

## Anexo O: Solución nutritiva menor y mayor de Ever Green para hidroponía

	<b>SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD</b> <b>FICHA TÉCNICA DEL PRODUCTO</b> BIORGANIC S.A.		<b>RE-PR-12-07</b>  Válido: 22/03/2018																														
	<b>SOLUCIÓN HIDROPÓNICA MENOR</b>																																
<b>INFORMACIÓN GENERAL</b> <p>EVER GREEN SOLUCIÓN HIDROPÓNICA MENOR es una solución nutritiva, concentrada que aporta nutrientes menores en forma balanceada.</p> <p>Es ideal para ser utilizada en toda clase de cultivos hidropónicos y en sistemas de riegos. También es especial para el cuidado de sus Orquídeas y para revitalizar el suelo de sus plantas ornamentales.</p> <p>Debe ser utilizada junto con la SOLUCIÓN HIDROPÓNICA MAYOR EVER GREEN.</p> <p>En cultivos con altas producciones se requiere aplicar refuerzos de Potasio, Quelato de Calcio y Quelato de Hierro, en especial en época de producción.</p> <p>Producto contenido en envase Biodegradable, en búsqueda de una mejor armonía con la naturaleza.</p>		<b>IMAGEN</b> 																															
<b>INDICACIONES Y FRECUENCIA DE USO</b> 1. Diluir en agua la dosis indicada del producto. 2. Agregar la dosis indicada de Solución Hidropónica Mayor. 3. Agitar bien antes de usar. 4. En plantas expuestas al sol aplicar antes de las 8 a.m. o después de las 5 p.m. 5. No atomizar las flores. 6. Verter sobre el sustrato o la bandeja para hidroponía. En caso de que se trate de Orquídeas, atomizar el follaje y los tallos.		<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b> 2,80 % Magnesio (MgO) 2,00 % Azufre (S) 0,04 % Boro (B) 0,01 % Cobre (Cu) 1,60 % Hierro (Fe) 0,04 % Manganeseo (Mn) 0,00024 % Molibdeno (Mo) 0,04 % Zinc (Zn) 0,02 % Sodio (Na) 93,45 % Inertes 100,00 % Total																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">CULTIVO</th> <th colspan="2">DOSIS POR LITRO</th> <th rowspan="2">FRECUENCIA</th> </tr> <tr> <th>MAYOR</th> <th>MINOR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Hidroponía semilleros</td> <td>2,5 cc</td> <td>1,25 cc</td> <td>Semillero con bandeja de reserva: cada 3 días Semillero sin bandeja de reserva: 2 veces al día</td> </tr> <tr> <td>Trasplante (hidroponía en agua)</td> <td>5 cc</td> <td>2,5 cc</td> <td>Cada 10 días (cambio total de la solución)</td> </tr> <tr> <td>Trasplante (en medio sólido)</td> <td>5 cc</td> <td>2,5 cc</td> <td>Dos veces al día, hasta humedecer</td> </tr> <tr> <td>Sistemas de riego</td> <td>5 cc</td> <td>2,5 cc</td> <td>3 veces al día</td> </tr> <tr> <td>Plantas Ornamentales</td> <td>5 cc</td> <td>2,5 cc</td> <td>Regar cada 15 días</td> </tr> <tr> <td>Orquídeas</td> <td>5 cc</td> <td>2,5 cc</td> <td>Atomizar cada 15 días</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>MAYOR:</b> Solución Hidropónica Mayor. <b>MINOR:</b> Solución Hidropónica Menor</p>		CULTIVO	DOSIS POR LITRO		FRECUENCIA	MAYOR	MINOR	Hidroponía semilleros	2,5 cc	1,25 cc	Semillero con bandeja de reserva: cada 3 días Semillero sin bandeja de reserva: 2 veces al día	Trasplante (hidroponía en agua)	5 cc	2,5 cc	Cada 10 días (cambio total de la solución)	Trasplante (en medio sólido)	5 cc	2,5 cc	Dos veces al día, hasta humedecer	Sistemas de riego	5 cc	2,5 cc	3 veces al día	Plantas Ornamentales	5 cc	2,5 cc	Regar cada 15 días	Orquídeas	5 cc	2,5 cc	Atomizar cada 15 días	<b>PRESENTACIONES</b> Litro (Cód. 032) Galón (Cód. 036) Pichinga (17 litros) (Cód. 121)	
CULTIVO	DOSIS POR LITRO		FRECUENCIA																														
	MAYOR	MINOR																															
Hidroponía semilleros	2,5 cc	1,25 cc	Semillero con bandeja de reserva: cada 3 días Semillero sin bandeja de reserva: 2 veces al día																														
Trasplante (hidroponía en agua)	5 cc	2,5 cc	Cada 10 días (cambio total de la solución)																														
Trasplante (en medio sólido)	5 cc	2,5 cc	Dos veces al día, hasta humedecer																														
Sistemas de riego	5 cc	2,5 cc	3 veces al día																														
Plantas Ornamentales	5 cc	2,5 cc	Regar cada 15 días																														
Orquídeas	5 cc	2,5 cc	Atomizar cada 15 días																														
		<b>ROMBO DE SEGURIDAD NFPA 740</b> 																															
<b>USO RECOMENDADO</b>																																	
<b>HIDROPONÍA</b> 		<b>ORQUÍDEAS</b> 																															
<b>FRUTALES</b> 		<b>FLORALES</b> 																															

Fuente: (Ever Green, 2024)

## Anexo P: Tarifa eléctrica Comercios y Servicios T-CO



<b>Tarifa Comercios y Servicios T-CO</b>	
<b>Bloques de consumo</b>	
Consumo menor o igual a 3.000 kWh cada kWh	<b>€118,75</b>
<b>Por consumo de energía</b>	
Bloque de 0 a 3.000 kWh Cargo fijo	<b>€214 440,00</b>
Bloque mayor a 3.000 kWh cada kWh	<b>€71,48</b>
<b>Cargo por potencia</b>	
Bloque de 0 a 8 kW Cargo fijo	<b>€95 323,84</b>
Bloque mayor a 8 kW cada kW	<b>€11 915,48</b>

**5**

Fuente: (CNFL, 2024)



**Anexo R:** Precios de referencia en el mercado local para la Lechuga Romana

Hortaliza	Clasificación	Fecha	Fuente	Costo por unidad
Lechuga Romana	Orgánica	18/8/2024	Auto Mercado	\$1,50
Lechuga Romana	Orgánica	18/8/2024	Villa Natura	\$1,33
Lechuga Romana	Producción tradicional	18/8/2024	La Feria CR	\$0,91

**Fuente:** Elaboración propia (2024)