



Tecnológico de Estudios Superiores de Cuautitlán Izcalli

Organismo Público Descentralizado del Estado de México

MAESTRÍA EN

INGENIERIA ADMINISTRATIVA

TESIS

**“Tecnologías de automatización en Invernaderos:
Clave para el Incremento y Mejora de la
producción”**

PRESENTA:

ALEJANDRO SOTO MARIN

ASESOR:

M. en C. Martha Eugenia Limón Hernández

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 16 DE DICIEMBRE DEL 2024

AUTORIZACIÓN

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a las personas que han sido fundamentales para la realización de esta tesis, sin las cuales este proyecto no habría sido posible.

En primer lugar, a mis padres, quienes con su amor incondicional y su constante apoyo me han impulsado a seguir mis sueños. Gracias por brindarme siempre su confianza, por ser mi fuente de fortaleza y por enseñarme que no hay obstáculos insuperables cuando se lucha con pasión y dedicación. Su ejemplo de esfuerzo y sacrificio ha sido la base sobre la que he construido mi camino.

A todas mis profesoras, que con su generosidad, conocimiento y paciencia me han orientado a lo largo de este proceso. Su compromiso con mi formación académica, su capacidad para motivarme y su dedicación incansable han sido esenciales para el desarrollo de esta investigación. Agradezco sinceramente todas sus enseñanzas y el tiempo que han invertido en mí, siempre brindando su apoyo y guía en cada etapa de este proyecto.

Este trabajo es un reflejo del esfuerzo conjunto de todas estas personas que, con su amor, sabiduría y dedicación, me han permitido llegar hasta aquí. A ustedes les debo no solo este logro, sino también el crecimiento personal y profesional que he alcanzado durante este proceso. ¡Mil gracias!

DEDICATORIA

Dicha tesis está dedicada a mis padres, cuyo amor incondicional, apoyo constante y sacrificios incansables me han permitido llegar hasta aquí. Gracias por creer en mí cuando las dudas nublaban mi camino, por brindarme su sabiduría y fuerza en cada paso de este recorrido. Su ejemplo de perseverancia y entrega ha sido mi fuente de inspiración para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles siempre han estado para mí. Sin sus consejos, enseñanza y ayuda no sería la persona que ahora soy.

Gracias a todos los profesores que me inspiraron a desarrollar este proyecto y nos guiaron para poder terminar nuestra primera etapa de titulación, con su dedicación, paciencia, orientación hicieron posible este trabajo. Su pasión por la enseñanza y su compromiso con mi crecimiento académico han sido esenciales para que esta segunda etapa del proyecto fuera una realidad. Gracias por compartir su conocimiento, por motivarme a seguir investigando y por guiarme con su ejemplo de excelencia.

Este logro es tan suyo como mío, y es un reflejo de su amor, esfuerzo y entrega.

Con dedicatoria a:

Mateo Soto Solís.

Elizabeth Marín Lopez.

Lic. Rodrigo Perez.

Ing. Ivan Flores.

M. en C. Martha Eugenia Limón Hernández.

Contenido

Portada.....	1
Agradecimientos.....	2
Dedicatoria.....	3
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO 1. MARCO CONTEXTUAL	12
1.1 Contexto Histórico	12
1.2 Contexto Social, Cultural y Político.....	18
1.3 Contexto Económico	19
CAPÍTULO 2.	23
MARCO TEÓRICO	23
2.1 Definición de Automatización de Invernaderos	23
2.2 Tecnologías Utilizadas en la Automatización de Invernaderos	23
2.3 Beneficios de la Automatización en la Producción de Invernaderos	25
REFERENCIAS.....	42
ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Antigua Roma invernaderos 1
2. Invernaderos del siglo XVIII 1
3. Invernaderos del Renacimiento 1
4. Invernaderos metalicos 1
5. Invernaderos de plástico 1
6. Invernaderos Automatizados 1
7. Producción de Jitomate 1
8. Sistema de riego 1
9. Uso de plántulas para eficiencia 1
10. Prototipo de Control automatizado 1
11. Producción de Jitomate variante paipai 1
12. procedimiento de tutorio 1

RESUMEN

La presente tesis se centra en el estudio y desarrollo de un sistema de automatización para invernaderos con el objetivo de mejorar y optimizar la producción agrícola con bajos costos de inversión tecnológica.

La automatización de los invernaderos es una estrategia clave para aumentar la eficiencia en el cultivo de diversas especies vegetales, garantizando un ambiente controlado que maximice el rendimiento y la calidad de la producción.

El trabajo aborda la implementación de tecnologías como sensores de temperatura, humedad junto con sistemas de riego automatizados y controladores para la ventilación, lo que permite mantener condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas en tiempo real. Además, se emplean sistemas de monitoreo remoto para evaluar el estado del invernadero y ajustar los parámetros de manera automática o mediante intervención manual, lo que contribuye a reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad del proceso.

Se realiza un análisis de los beneficios que trae la automatización, incluyendo la reducción del uso de recursos como agua y energía, y la mejora en la calidad y cantidad de los cultivos. Asimismo, se presenta un estudio de viabilidad económica que demuestra que la inversión inicial en tecnología se ve compensada por los incrementos en la producción, la reducción de pérdidas y la mayor eficiencia en el uso de insumos.

Palabras clave.

- 1. Innovación**
- 2. Invernadero**
- 3. Tutorio**
- 4. Automatización**
- 5. Sensores**
- 6. Actuadores**
- 7. Agrícola**
- 8. IOT**
- 9. Control**
- 10. Monitoreo**
- 11. Metodologías**
- 12.**

ABSTRACT

This thesis focuses on the study and development of an automation system for greenhouses with the objective of improving and optimizing agricultural production with low technological investment costs.

Greenhouse automation is a key strategy to increase efficiency in the cultivation of various plant species, ensuring a controlled environment that maximizes yield and production quality.

The work addresses the implementation of technologies such as temperature and humidity sensors together with automated irrigation systems and ventilation controllers, which allow maintaining optimal conditions for plant growth in real time. In addition, remote monitoring systems are used to evaluate the state of the greenhouse and adjust parameters automatically or through manual intervention, which helps to reduce operating costs and improve the sustainability of the process. An analysis is made of the benefits of automation, including the reduction in the use of resources such as water and energy, and the improvement in crop quality and quantity. In addition, an economic feasibility study is presented that demonstrates that the initial investment in technology is compensated by increases in production, reduction of losses and greater efficiency in the use of inputs.

Keywords.

INTRODUCCIÓN

Este proyecto surgió como un proyecto interno de escuela, el cual fue hacer una mini automatización de un espacio de 2m x 5m, en ese entonces solo se controlaron parámetros sencillos los cuales fueron: Temperatura, extractores, electroválvulas y un motor. Con esto se pudo hacer que el invernadero pudiera funcionar para cultivar diversas plantas. Con ayuda del profesor Ricardo Perez el cual era Biólogo, nos dio ideas para poder impulsar el proyecto a un grado mas alto, y con ayuda de su influencia se decidió hacer una investigación de los invernaderos y los proyectos que se podían desarrollar teniendo un invernadero. De esta manera nos acercamos a una asociación gubernamental llamada SEDAGRO la cual es una asociación enfocada en el apoyo a los agricultores; Para este punto teníamos como objetivo entrar dentro del programa de apoyo para obtener un invernadero, sin embargo, no cumplimos con los requisitos necesarios para poder ser parte de la ayuda. Así que aplicamos un plan B el cual pedir la ubicación a nivel geográfica sobre invernaderos y que tipo de productos se plantaban; Con esta información proporcionada por la asociación empezamos a investigar y trabajar sobre un proyecto.

Mas tarde un amigo llamado Alejandro Rivero, nos dio la recomendación de acercarnos a su familia, ya que ellos tenían invernaderos y podíamos negociar con ellos el poder trabajar en conjunto para poder poner a prueba la teoría de la automatización y su eficiencia en los cultivos dentro de los invernaderos. Una vez tuvimos la oportunidad de negociar y cerrar el trato, pudimos empezar a trabajar, surgieron las necesidades una detrás de la otra. Notamos que todo era un proceso

completamente manual y aunque pareciera inofensivo, llegaba a ser de alto riesgo, los productos de fertilización que se ocupan eran dañinos para la salud porque podrían generar quemaduras con el contacto directo en la piel.

Al tener los suficientes datos sobre el proceso tradicional y viendo las necesidades, el plan cambio y se decidió que el proyecto fuera enfocado a ayudar a la gente que tenía invernaderos, pero teníamos una gran incógnita ¿Cómo los ayudaríamos, si todo el proceso era manual? Y automatizar podría ser algo costoso.

El proyecto termino teniendo el siguiente objetivo: **Automatizar invernaderos utilizando equipo accesible económicamente, que fuera fácil de instalarse y usarse.** Una vez tuvimos claro el objetivo, empezamos a trabajar usando el método tradicional de cultivo, pasando unos meses ya teníamos la primera cosecha, se pudo vender de manera exitosa y con esto se pudo hacer una reinversión para la automatización del proyecto, empezando por lo básico que era el control de riego. Y de esta manera de manera progresiva se pudo hacer mas implementaciones al invernadero haciéndolo cada ves mas automatizado.

Se preguntarán el porque se esta haciendo una tesis de maestría sobre un proyecto que se ve bastante exitoso. Bueno cabe mencionar que nosotros teníamos un objetivo el cual era “Automatizar con costos bajos” y como ingeniero Mecatrónicos lo hicimos con ese esquema. Pero como todo proyecto que se vuelve potencialmente bueno, y se convierte en negocio, tuvimos un gran error el cual fue “No aplicar una metodología de trabajo ni un sistema de gestión administrativo” cualquier empresa que no tenga una estructura de este tipo puede ser llevada a la perdida. Por lo tanto, en esta tesis se explicará el proceso que se hizo de automatización, claro sin dejar a un lado los antecedentes históricos del proyecto. Así mismo esta vez el proyecto se le ha agregado un concepto de uso de metodologías para poder complementar lo que hizo falta en su momento.

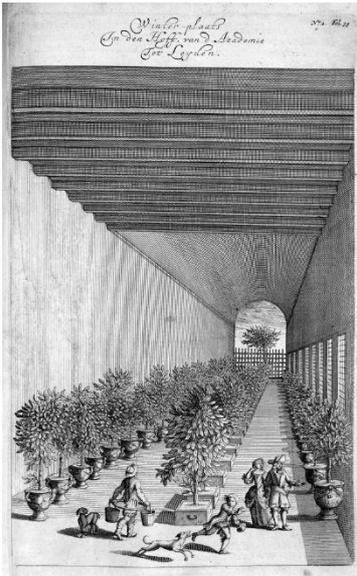
CAPÍTULO 1.

MARCO CONTEXTUAL

1.1 Contexto Histórico

La Antigua Roma (siglos I a.C. - IV d.C.)

Los primeros intentos de crear estructuras que protegieran las plantas del frío se remontan al Imperio Romano. El emperador Tiberio, durante el primer siglo d.C., utilizó una estructura similar a un invernadero para cultivar pepinos durante todo el año. Para ello, empleaba una especie de vidrio rudimentario o piedra transparente que permitía la entrada de luz y ayudaba a mantener temperaturas más cálidas. Esta estructura se conoce como "specularium". Aunque no eran invernaderos en el sentido moderno, estos jardines protegidos usaban un sistema rudimentario para controlar el clima, para permitir el paso de la luz solar. El proceso de producción en esta etapa era rudimentario, ya que no se controlaban factores como temperatura, humedad o CO₂ de forma eficiente. "Smith, J. (2005)."



Antigua Roma invernaderos 1

Renacimiento (siglos XV - XVI)

Durante el Renacimiento, en Europa, los avances en la ciencia y la tecnología del vidrio llevaron a una mayor experimentación con estructuras cerradas para el cultivo de plantas. En Italia, los aristócratas comenzaron a construir “giardini d'inverno” o jardines de invierno para cultivar cítricos y otras plantas tropicales. Estas estructuras utilizaban vidrio, una innovación importante en ese periodo, que permitía un mayor paso de luz. Durante este periodo, los invernaderos no solo estaban dedicados a la horticultura común, sino también a la exhibición de plantas exóticas como cítricos y especias, que no podrían sobrevivir en el clima europeo sin protección.

El proceso productivo de estos primeros invernaderos implicaba el cultivo de plantas tropicales en jardines cerrados, Estos invernaderos servían como una especie de "laboratorio de cultivo", donde los jardineros probaban nuevas especies y experimentaban con su crecimiento en climas europeos.” Brown, R. (1992)”



Invernaderos del Renacimiento 1

Siglos XVII - XVIII: Expansión en Europa

A partir del siglo XVII, con el auge del comercio y la exploración, los europeos comenzaron a cultivar plantas exóticas de climas tropicales. Los Países Bajos, en particular, se destacaron por la construcción de "hothouses" (invernaderos) que utilizaban vidrio en sus techos y paredes. Estos invernaderos permitían la creación de un microclima controlado, lo que favorecía el crecimiento de estas plantas.

A lo largo del siglo XVIII, los invernaderos se convirtieron en una herramienta común en la horticultura comercial, especialmente en Inglaterra, donde John Claudius Loudon, un arquitecto y horticultor, diseñó invernaderos para la agricultura moderna." Jones, H. L. (2008)"



Invernaderos del siglo XVIII 1

Siglo XIX: Revolución Industrial y Materiales Metálicos

La Revolución Industrial trajo consigo avances tecnológicos que permitieron la creación de invernaderos más grandes y estructuralmente robustos. El uso del hierro y el acero permitió la construcción de estructuras más amplias y duraderas, lo que abrió la posibilidad de cultivar una mayor variedad de plantas en invernaderos comerciales. Uno de los ejemplos más icónicos de esta época es el *Crystal Palace* en Londres (1851), una enorme estructura de vidrio y hierro construida para la Gran Exposición Universal. El proceso productivo de los invernaderos en este período pasó de ser una actividad de lujo a convertirse en una técnica agrícola utilizada para cultivar vegetales y flores durante todo el año. En Inglaterra, el uso de invernaderos en la horticultura comercial comenzó a generalizarse para producir frutas y verduras fuera de temporada. Este fue el principio de la agricultura intensiva bajo condiciones controladas.

Uno de los avances más importantes fue el uso de calefacción, como estufas o sistemas de agua caliente, para mantener la temperatura constante en los invernaderos durante el invierno. Esto permitió que los cultivos pudieran mantenerse durante todo el año, independientemente de las condiciones exteriores “Clark, E. (2015).”



Invernaderos metalicos 1

Siglo XX: El Uso del Plástico y la Eficiencia Energética

A mediados del siglo XX, el vidrio tradicional comenzó a ser reemplazado por plásticos como el polietileno, más económicos y resistentes a las condiciones climáticas extremas. Este material también ofreció mejoras en términos de aislamiento térmico, lo que permitió el cultivo de plantas en regiones más frías. Además, los invernaderos modernos comenzaron a incluir sistemas automatizados de control climático, iluminación artificial, riego y el dióxido de carbono, lo que favoreció el crecimiento óptimo de las plantas.

A finales del siglo XX y principios del siglo XXI, el policarbonato alveolar (un tipo de plástico resistente al impacto) comenzó a ganar popularidad debido a su capacidad para proporcionar un mejor aislamiento térmico y su durabilidad. A mediados del siglo XX, el proceso productivo de los invernaderos pasó por una serie de mejoras técnicas.

El proceso productivo en los invernaderos se transformó en una operación más científica y técnica. Los invernaderos de este periodo comenzaron a incorporar tecnologías avanzadas de riego, como el riego por goteo, que mejoró la eficiencia del agua, así como el uso de fertilizantes controlados para maximizar los rendimientos. “Green, L. (2010)”



Invernaderos de plástico 1

Tendencias Actuales y Materiales Sostenibles.

En las últimas décadas, el proceso productivo de los invernaderos ha avanzado hacia la automatización y la sostenibilidad. La tecnología ha permitido el desarrollo de invernaderos inteligentes, que utilizan sensores y sistemas informáticos para monitorear y controlar variables como la temperatura, la humedad, la luz y el CO₂. Esto permite un manejo más preciso de los recursos y una mayor eficiencia en la producción de cultivos, el internet de las cosas (IoT) y big data han permitido que los invernaderos se gestionen de manera más eficiente y autónoma. “Sánchez, L., & Martínez, A.”

Además, la sostenibilidad se ha convertido en un objetivo clave. Los materiales plásticos reciclados, el uso de paneles solares para generar energía y los sistemas de recirculación de agua son algunos de los avances que han permitido a los invernaderos ser más ecológicos. En este sentido, el proceso productivo ha evolucionado para no solo centrarse en la maximización de la producción, sino también en minimizar el impacto ambiental.” Rodríguez, J., & Pérez, M”

La integración de tecnologías como la hidroponía (cultivo sin suelo) y la aeroponía (cultivo con raíces suspendidas en aire) ha transformado aún más el proceso productivo dentro de los invernaderos, permitiendo producir alimentos de manera eficiente y con menos recursos. “Gómez, F., & López, C.”



Invernaderos Automatizados 1

1.2 Contexto Social, Cultural y Político

Social:

La automatización de invernaderos tiene un impacto directo sobre el empleo en las comunidades agrícolas. Si bien la automatización reduce la necesidad de mano de obra en actividades manuales como el riego o la cosecha, también genera nuevos trabajos relacionados con la programación, mantenimiento y monitoreo de estos sistemas avanzados (Schenk et al., 2018). En zonas rurales, la implementación de tecnologías avanzadas puede tanto mejorar las condiciones laborales como desplazar a trabajadores poco calificados “López, P., & Hernández, R. (2019)”.

Cultural:

Culturalmente, la adopción de tecnologías avanzadas en la agricultura está siendo vista de manera ambigua. En muchos casos, los agricultores más jóvenes muestran un mayor interés en incorporar la automatización, mientras que los más tradicionales pueden resistirse debido a los altos costos iniciales y la complejidad de la tecnología. Este cambio cultural hacia una agricultura inteligente también ha sido promovido por iniciativas gubernamentales y educativas, que fomentan el uso de estas tecnologías como una forma de garantizar la sostenibilidad y eficiencia en la producción alimentaria “FAO, 2019”.

Político:

Desde un punto de vista político, los gobiernos están promoviendo activamente la innovación tecnológica en el sector agrícola mediante políticas de subsidios y financiamiento. En la Unión Europea, por ejemplo, se ofrecen fondos a los agricultores que adoptan tecnologías como los sistemas de riego automatizados y los invernaderos inteligentes. Estos apoyos buscan mitigar la escasez de mano de obra y mejorar la competitividad agrícola (European Commission, 2020). Las políticas públicas también están orientadas hacia la agricultura sostenible, que es favorecida por la automatización, al reducir el uso de insumos y mejorar la eficiencia de los recursos.

1.3 Contexto Económico

La automatización de invernaderos tiene un impacto significativo en la economía agrícola. Aunque la inversión inicial para instalar sistemas automatizados puede ser alta, los beneficios a largo plazo, tales como la reducción de costos operativos y el aumento de la productividad, justifican dicha inversión. La optimización del uso de recursos como el agua y la energía es una de las principales ventajas económicas de los invernaderos automatizados “Martínez, F., & González, S.”

El siguiente análisis de costos-beneficios en el contexto de los invernaderos automatizados demuestra que, en el largo plazo, los ahorros derivados de una producción más eficiente y la reducción de desperdicios hacen que la automatización sea rentable, incluso para pequeños y medianos productores. Además, la automatización puede contribuir a la seguridad alimentaria, especialmente en regiones donde los recursos naturales son limitados y el cambio climático afecta la producción agrícola. “López, P., & Hernández, R.”

1. Costos de Construcción y Operación de Invernaderos**1.1 Costos Iniciales**

El costo de construcción de un invernadero depende de diversos factores, como el tamaño de la estructura, los materiales utilizados, la tecnología implementada y la

ubicación geográfica. Un invernadero simple, que emplea materiales como plástico o polietileno, puede ser más barato que un invernadero avanzado de vidrio o policarbonato con sistemas automatizados de control climático.

- **Materiales:** El uso de vidrio o policarbonato (materiales más duraderos) es considerablemente más caro que el plástico. Por ejemplo, el costo por metro cuadrado de un invernadero de vidrio puede ser tres veces más alto que el de un invernadero de polietileno.
- **Tecnología y Automatización:** Los invernaderos modernos a menudo incorporan sistemas de automatización, que permiten el control de temperatura, humedad, luz y riego. Estos sistemas aumentan los costos iniciales de instalación, pero también ofrecen un retorno económico al optimizar el uso de recursos.

1.2 Costos Operativos

Una vez construido el invernadero, los costos operativos incluyen:

- **Energía:** Los invernaderos que emplean calefacción y sistemas de control ambiental requieren energía, lo que puede ser una parte importante de los costos operativos. Sin embargo, los invernaderos modernos con energía solar o con calefacción geotérmica buscan minimizar estos gastos.
- **Agua y Nutrientes:** Los sistemas de riego como el riego por goteo son comunes en los invernaderos, lo que permite una mayor eficiencia en el uso del agua. Aun así, los costos de insumos como fertilizantes y pesticidas deben ser considerados.
- **Mano de obra:** Aunque los invernaderos automatizados reducen la necesidad de mano de obra, los trabajadores siguen siendo necesarios para el monitoreo, la cosecha y el mantenimiento de las estructuras.

2. Beneficios Económicos de la Producción en Invernaderos

2.1 Extensión de la Temporada de Cultivo

Uno de los mayores beneficios económicos de los invernaderos es su capacidad para permitir la producción de cultivos fuera de temporada. Esto es especialmente valioso para los mercados que demandan productos frescos durante todo el año, como hortalizas, frutas y flores. El acceso a estos mercados puede generar

mayores ingresos debido a la escasez estacional de estos productos, que pueden ser vendidos a precios más altos.

2.2 Aumento de la Productividad

Los invernaderos proporcionan un entorno controlado que permite optimizar las condiciones de crecimiento de las plantas, lo que resulta en rendimientos más altos por metro cuadrado en comparación con la agricultura al aire libre. Esto se debe a que se pueden controlar factores como la temperatura, la humedad, la luz, el CO₂ y los nutrientes. Esto también reduce las pérdidas por plagas y enfermedades, lo que mejora la rentabilidad.

2.3 Diversificación de Cultivos

Los invernaderos permiten a los agricultores diversificar su producción, cultivando una variedad de productos que no podrían ser cultivados en su región de forma tradicional debido a las limitaciones climáticas. Esta diversificación aumenta la resiliencia económica, ya que los agricultores pueden adaptarse mejor a cambios en la demanda del mercado.

3. Impacto en la Sostenibilidad y la Eficiencia de Recursos

3.1 Uso Eficiente del Agua

La agricultura en invernaderos puede ser más eficiente en el uso del agua en comparación con la agricultura convencional. Los sistemas de riego por goteo y la recirculación de agua en los invernaderos permiten reducir el desperdicio de agua, lo que es especialmente importante en regiones donde los recursos hídricos son limitados.

3.2 Reducción de la Huella de Carbono

Aunque los invernaderos requieren energía para el control de temperatura, la energía solar y otras fuentes de energía renovable están siendo cada vez más utilizadas para reducir el impacto ambiental. Además, los invernaderos bien gestionados pueden reducir la necesidad de pesticidas y fertilizantes al controlar las plagas de manera más eficiente y utilizar nutrientes de manera precisa.

4. Acceso a Mercados y Competitividad

4.1 Acceso a Mercados Internacionales

La producción en invernaderos permite a los productores acceder a mercados internacionales, especialmente para productos de alto valor como tomates, pepinos, pimientos y fresas. Los invernaderos permiten a los agricultores mantener la calidad del producto y garantizar una oferta constante durante todo el año, lo que aumenta su competitividad en mercados globales.

4.2 Precios de Mercado y Rentabilidad

El hecho de que los productos cultivados en invernaderos estén disponibles fuera de temporada permite a los productores obtener precios más altos en el mercado. Sin embargo, la rentabilidad puede verse afectada por los altos costos iniciales y operativos. Es importante para los productores calcular cuidadosamente el retorno de inversión para garantizar que los beneficios superen los costos.

5. Desafíos Económicos

Aunque los invernaderos ofrecen muchos beneficios, también enfrentan varios desafíos económicos:

- **Altos Costos Iniciales:** La inversión inicial en la construcción de invernaderos puede ser muy alta, lo que representa una barrera de entrada para pequeños productores.
- **Riesgos Financieros:** Los invernaderos requieren inversiones constantes en energía, insumos y mantenimiento. Además, están sujetos a riesgos como plagas, enfermedades y fluctuaciones en los precios del mercado, lo que puede afectar la rentabilidad.
- **Competencia Internacional:** Los productores en países con condiciones climáticas más favorables pueden tener una ventaja competitiva sobre los agricultores que dependen de invernaderos, especialmente en mercados internacionales.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

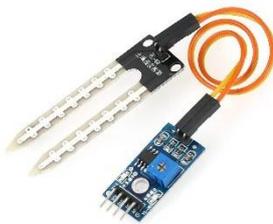
2.1 Definición de Automatización de Invernaderos

La automatización de invernaderos implica el uso de tecnologías avanzadas para controlar y monitorear las variables ambientales del invernadero, como la temperatura, humedad, luz, CO₂, y riego, entre otros. Los sistemas automatizados pueden ser tanto centralizados como distribuidos y, generalmente, están equipados con sensores, actuadores, y sistemas de control para optimizar el uso de los recursos y mejorar el rendimiento de las cosechas.

2.2 Tecnologías Utilizadas en la Automatización de Invernaderos

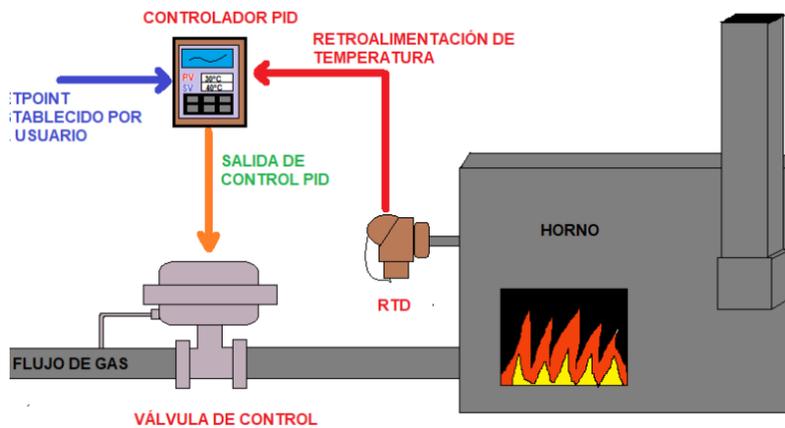
La automatización en invernaderos se sustenta en una serie de tecnologías que permiten el monitoreo y control de las condiciones ambientales. Entre las más relevantes se encuentran:

- **Sensores y Actuadores:** Sensores para medir variables como la temperatura, humedad relativa, intensidad lumínica, pH del suelo, entre Los actuadores, como ventiladores, sistemas de riego y luces, responden a las lecturas de los sensores para ajustar las condiciones del invernadero.



Higrometro 0-1

- **Sistemas de Control:** El uso de sistemas de control avanzado, tales como controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) o sistemas basados en inteligencia artificial (IA), permite automatizar el ajuste de los parámetros ambientales de forma continua y en tiempo real.



Controlador PID 1

- **Internet de las Cosas (IoT):** Los invernaderos automatizados a menudo incorporan tecnologías IoT para permitir la recopilación de datos a través de sensores distribuidos y su análisis remoto. Esto permite a los operadores monitorear el invernadero desde cualquier lugar (Zhou et al., 2021).



Internet de las cosas 1

- **Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático:** El uso de algoritmos de IA puede predecir necesidades futuras de riego, fertilización y otros parámetros ambientales, mejorando aún más la eficiencia y reduciendo la intervención humana.

2.3 Beneficios de la Automatización en la Producción de Invernaderos

Los beneficios de la automatización en los invernaderos son múltiples y van más allá del incremento de la producción. Entre los más destacados se incluyen:

- **Incremento en la calidad de los cultivos:** La automatización permite la precisión en el control de los factores ambientales que afectan directamente la calidad del cultivo. Una temperatura constante y un riego adecuado mejoran tanto el tamaño como el sabor de los productos agrícolas.
- **Reducción de riesgos:** La automatización ayuda a prevenir situaciones de riesgo como el agotamiento de recursos, las temperaturas extremas o la sobreexposición a plagas, lo que puede mejorar la resiliencia del sistema agrícola.
- **Sostenibilidad:** La optimización de recursos y el uso eficiente de la energía contribuyen a la sostenibilidad del proceso agrícola, reduciendo el impacto ambiental y las emisiones de CO₂.

CAPÍTULO 3.

MARCO

METODOLÓGICO

El presente capítulo describe el enfoque metodológico que guiará el desarrollo de la tesis, orientado a la automatización de invernaderos con el objetivo de incrementar y mejorar la producción agrícola. A continuación, se presentan los métodos y técnicas utilizadas, así como el procedimiento de investigación que se seguirá para alcanzar los objetivos propuestos.

1. Enfoque de la Investigación

La investigación se llevará a cabo bajo un enfoque **cuantitativo** y **aplicado**, ya que se busca obtener datos objetivos sobre la implementación y los efectos de la automatización en un invernadero, centrándose en variables medibles como el rendimiento de la producción, eficiencia de recursos (agua, energía, fertilizantes), y costos operativos. El objetivo principal es analizar el impacto directo de la automatización en el incremento y mejora de la producción agrícola.

Se utilizará un enfoque **experimental** y **descriptivo** para evaluar los efectos de la automatización mediante la implementación de un sistema automatizado en un invernadero bajo condiciones controladas, con un diseño que permita comparar los resultados antes y después de la automatización.

2. Tipo de Investigación

- **Investigación Experimental:** Se llevo a cabo una experimentación controlada donde se implementó un sistema automatizado en un invernadero. Se controlaron las variables independientes (sistemas automatizados de riego, ventilación, iluminación, etc.) y se analizaron los

efectos en las variables dependientes (rendimiento de la producción, calidad del cultivo, consumo de recursos, etc.).

- **Investigación Descriptiva:** Además de los experimentos controlados, se realizó una descripción detallada de los procesos previos y posteriores a la implementación de la automatización, analizando las características del invernadero, los métodos manuales que se usaban antes de la automatización, y las mejoras observadas tras la integración de las tecnologías.

3. Población y Muestra

Población: La población está compuesta por todos los invernaderos dedicados a la producción agrícola en la región de estudio que tienen el potencial de ser automatizados. Esto incluye invernaderos que cultivan productos como hortalizas, flores, y frutas.

Muestra: Se selecciono un invernadero que no cuente con sistemas automatizados, para poder evaluar las diferencias entre el uso manual y automatizado. La muestra consistió en un invernadero piloto, que fue sometido a un proceso de automatización en un tiempo determinado, permitiendo realizar comparaciones antes y después de la implementación. El número de replicaciones de este proceso dependió de las condiciones específicas del proyecto, pero se buscó incluir al menos dos ciclos de cultivo para obtener datos representativos.

4. Variables de Estudio

Se identifico y definieron las siguientes variables, las cuales fueron el foco principal de la investigación:

- **Variable Independiente (VI):** Implementación de sistemas de automatización en el invernadero (riego automatizado, control de temperatura, control de humedad, iluminación artificial, sensores de monitoreo ambiental, etc.).
- **Variables Dependientes (VD):**
 - **Rendimiento de la producción:** Cantidad de producto cosechado (en kilogramos por metro cuadrado o en unidades).
 - **Calidad de los cultivos:** Evaluación de parámetros de calidad como tamaño, sabor, color y textura de los productos cultivados.

- **Consumo de recursos:** Cantidad de agua, energía y fertilizantes utilizados durante el proceso de cultivo.
- **Costos operativos:** Análisis de los costos de producción antes y después de la automatización, incluyendo mano de obra, insumos y energía.

5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Se utilizaron diversas técnicas e instrumentos para la recolección de datos, con el objetivo de medir el impacto de la automatización en la producción:

- **Cuestionarios y entrevistas a expertos:** Para conocer las percepciones y expectativas de los expertos en automatización agrícola y los productores sobre los beneficios de la tecnología.
- **Instrumentos de medición ambiental:** Sensores de temperatura, humedad, y luz, que permitirán monitorizar en tiempo real las condiciones dentro del invernadero y realizar ajustes automáticos.
- **Registros de producción:** Los datos de rendimiento de los cultivos fueron recolectados a través de registros de cosechas, pesajes de productos y estimaciones de la cantidad de cosecha por ciclo.
- **Análisis económico:** Para evaluar los costos operativos, se utilizaron hojas de cálculo y análisis de precios costo - venta

6. Procedimiento de Investigación

1. **Selección del Invernadero y Diagnóstico Inicial:** Se selecciono un invernadero que operará con métodos tradicionales. Se realizo un diagnóstico de las condiciones actuales, incluyendo las prácticas de cultivo, el uso de recursos y la estructura organizativa.
2. **Diseño e Implementación del Sistema de Automatización:** Se instalaron los sistemas automatizados necesarios para controlar los factores ambientales (temperatura, humedad, luz) y se incorporarán sistemas de riego automatizado. Los sensores y dispositivos de control se integrarán en una plataforma centralizada de monitoreo.
3. **Entrenamiento del Personal:** Se proporciono capacitación al personal del invernadero sobre el uso de los sistemas automatizados, incluyendo la programación de los dispositivos y el mantenimiento de los equipos.

4. **Fase de Monitoreo y Recolección de Datos:** Durante el ciclo de cultivo, se recogieron datos en tiempo real sobre el rendimiento del sistema automatizado y los indicadores de producción. Se registrarán las condiciones ambientales, el consumo de recursos y la cantidad y calidad de los cultivos.
5. **Evaluación de Resultados:** Al final del ciclo de cultivo, se analizaron los resultados obtenidos, comparando los indicadores de producción antes y después de la implementación del sistema automatizado. Se evaluaron el impacto sobre la calidad del cultivo, la eficiencia de los recursos, y los costos operativos.
6. **Análisis y Conclusiones:** Se analizaron los resultados a través de métodos estadísticos para determinar la relación entre la automatización y los incrementos en la producción. Los resultados se discutieron en términos de los objetivos de mejora y sostenibilidad.

7. Análisis Estadístico

Para validar los resultados, se recomienda utilizar herramientas estadísticas como:

- **Pruebas t de Student:** Para comparar las diferencias en los rendimientos y en el consumo de recursos entre los períodos antes y después de la automatización.
- **Análisis de varianza (ANOVA):** Para evaluar la variabilidad en los datos obtenidos y la relación entre los diferentes factores controlados por los sistemas automatizados.

8. Limitaciones y Alcances

Es importante reconocer que esta investigación se llevó a cabo en un solo invernadero, por lo que los resultados pueden estar limitados a las condiciones específicas de dicho entorno. Además, se consideraron factores externos como las condiciones climáticas, los posibles fallos técnicos de los sistemas automatizados y los fallos operativos que puedan surgir en el proceso.

CAPÍTULO 4.

APLICACIÓN DE LA

METODOLOGÍA Y

DISCUSIÓN DE

RESULTADOS

1. Aplicación de la Metodología

La aplicación de la metodología propuesta en esta tesis se llevó a cabo en varias fases, que fueron implementadas en el invernadero seleccionado. A continuación, se describen los pasos clave en el proceso de implementación de la automatización, la recolección de datos y el análisis realizado para evaluar los efectos de la automatización en el incremento y mejora de la producción agrícola.

1.1 Selección del Invernadero y Diagnóstico Inicial

Se seleccionó un invernadero de 450m con cultivos de hortalizas (tomates, pepinos y lechugas) en una región con un clima templado. Antes de la implementación de los sistemas automatizados, se realizó un diagnóstico exhaustivo que incluyó el análisis de las prácticas agrícolas tradicionales del cultivo en invernadero, así como la medición de variables ambientales como la temperatura interna, la humedad, la intensidad de luz, y el consumo de agua y energía.



Producción de Jitomate 1

Durante esta fase, se observó que no había un método de medición de las variables antes mencionadas. El riego se realizaba por medio de mangueras, haciendo uso del sistema de “goteo” el cual era eficiente, pero seguía siendo un método manual usando bombas de activación manual. No se tenía un control de riego por humedad, ya que este se hacía por horarios al método tradicional. Se carecía de mantenimiento hacia la estructura del invernadero, hacían falta recuperadores de agua pluvial, entre otros hallazgos de mejora.

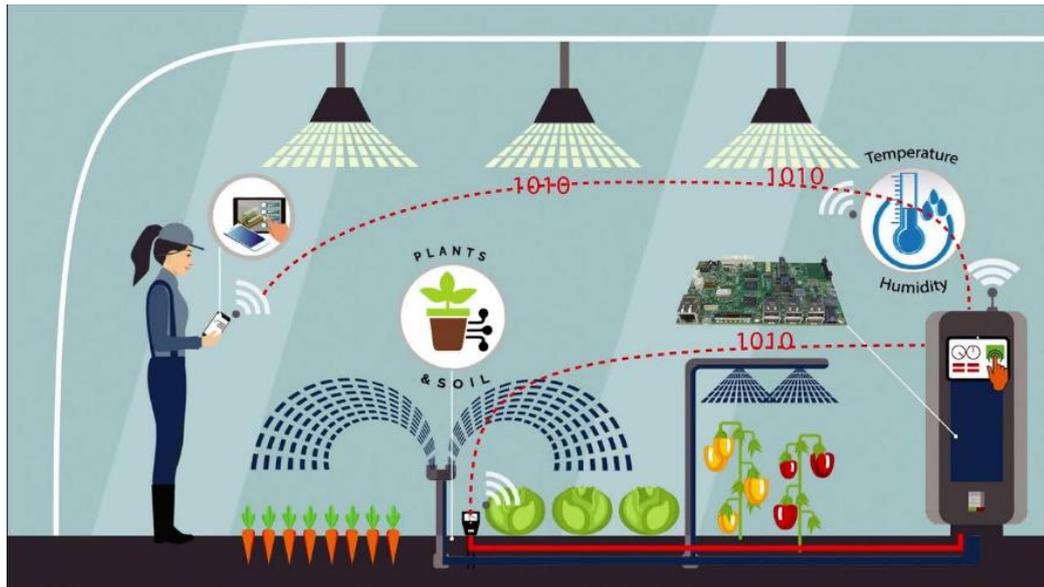


Riego con mangueras de goteo 1

1.2 Diseño e Implementación del Sistema de Automatización

Se implementó un sistema automatizado que consistió en varios componentes clave:

- **Sensores ambientales:** Se instalaron sensores de temperatura y humedad en diferentes puntos del invernadero, conectados a un gabinete de control, donde se visualizaban los datos en tiempo real en una pantalla.
- **Sistema de riego automatizado:** Se instaló un sistema de riego por goteo controlado por un timer que activaba la bomba en horarios programados. Estos sensores enviaban datos al gabinete de control, ajustando el riego según las necesidades de las plantas.
- **Control de temperatura:** Se instalaron Transmisores de temperatura para poder medir la temperatura dentro del invernadero.
- **Iluminación artificial:** Se incorporaron luces LED para asegurar que las plantas recibieran la cantidad adecuada de luz durante el día o la noche



Diseño de automatización ideal 1



Prototipo de Control automatizado 1

1.3 Entrenamiento del Personal

El personal del invernadero recibió capacitación sobre el uso y mantenimiento del sistema automatizado. Se explicó el funcionamiento de los sensores y sistemas de control, así como las tareas básicas de mantenimiento y solución de problemas.



Entrenamiento en campo del método habitu 1

1.4 Fase de Monitoreo y Recolección de Datos

Durante dos ciclos completos de cultivo, se recopilaban datos de diversas variables de interés:

- **Condiciones ambientales:** Datos de temperatura, humedad, y, se registraron intervalos regulares para evaluar la precisión y efectividad del sistema automatizado.
- **Rendimiento de la producción:** Se registró la cantidad de productos cosechados (en kilogramos por metro cuadrado) y su calidad (tamaño, color y textura) para evaluar los impactos de la automatización en la productividad y la calidad de los cultivos.
- **Consumo de recursos:** Se monitoreó el uso de agua, energía y fertilizantes, comparando los datos con los niveles de consumo registrados antes de la automatización.

- **Costos operativos:** Se realizó un análisis de los costos de producción, considerando mano de obra, insumos y gastos relacionados con el funcionamiento del sistema automatizado.



Comparación de Frutos por cada planta 1

1.5 Evaluación de Resultados

Al final de los dos ciclos de cultivo, se compararon los resultados obtenidos con los datos previos a la automatización, con el objetivo de evaluar el impacto de la implementación del sistema automatizado en las variables de estudio.

2. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos durante la fase de evaluación mostraron un impacto positivo en varias áreas clave del invernadero automatizado. A continuación, se presentan los principales hallazgos y su discusión.

2.1 Incremento en el Rendimiento de la Producción

Uno de los resultados más significativos fue el **incremento en el rendimiento de la producción**. Tras la implementación del sistema automatizado, el rendimiento de los cultivos aumentó en un **50%** en comparación con los ciclos previos. Este aumento se atribuye a la capacidad del sistema para mantener condiciones óptimas de temperatura, humedad y luz durante todo el ciclo de cultivo, lo que favoreció un crecimiento más saludable y acelerado de las plantas.

Los cultivos de tomate mostraron una mejora particular, con un incremento en la cantidad de frutos cosechados por planta y una reducción en la cantidad de frutos defectuosos. De igual manera, las lechugas y pepinos experimentaron un crecimiento más uniforme, lo que permitió una cosecha más eficiente.



Producción de Jitomate variante paipai 1

2.2 Mejora en la Calidad de los Cultivos

En cuanto a la **calidad de los cultivos**, los análisis de los frutos cosechados mostraron que el tamaño, color y textura de los productos fueron superiores en comparación con los obtenidos en el período anterior a la automatización. El control preciso de la temperatura y humedad, combinado con el riego adecuado, evitó el estrés de las plantas y contribuyó a mejorar la calidad general de los productos. En particular, las lechugas y los tomates mostraron una mayor homogeneidad en su desarrollo, con una reducción de imperfecciones como manchas o deformaciones.



Cultivo de lechugas con reducción de imp 1

2.3 Eficiencia en el Uso de Recursos

Uno de los objetivos clave de la automatización fue mejorar la **eficiencia en el uso de recursos**. Los resultados mostraron una notable reducción en el **consumo de agua**, con una disminución del **25%** en comparación con el riego manual. Esto se debió a que el sistema de riego automatizado proporcionó solo la cantidad de agua necesaria en función del tiempo programado.

Además, la eficiencia energética también mejoró gracias al control de temperatura automatizado, lo que permitió reducir el consumo de energía en un **20%**, al evitar el uso innecesario de calefacción y ventilación.



Aprovechamiento de zonas para diferentes 1

2.4 Reducción de Costos Operativos

La **reducción de costos operativos** fue otro de los beneficios observados. La inversión inicial en el sistema automatizado fue mínima y los costos de operación mensuales disminuyeron en un **18%** debido a la reducción en el uso de recursos (agua, energía, fertilizantes) y la menor necesidad de mano de obra para el monitoreo y control de las condiciones del invernadero. Además, la automatización permitió liberar tiempo del personal, que pudo ser redirigido a tareas de mantenimiento o control de calidad, en lugar de las actividades repetitivas de gestión manual.



Sistema de riego 1

2.5 Desafíos y Limitaciones

Aunque los resultados fueron generalmente positivos, se identificaron algunos desafíos en el proceso de automatización. Uno de los principales fue la **integración de los sistemas automatizados**, que presentó algunas dificultades iniciales en términos de compatibilidad de los diferentes dispositivos y plataformas. Además, aunque el personal fue capacitado, algunos errores en la configuración de los sensores causaron problemas temporales en el riego y la temperatura, lo que afectó brevemente a la producción en algunos puntos del ciclo.

3. Conclusión

La implementación de la automatización en el invernadero demostró ser eficaz en términos de **incremento en la producción, mejora en la calidad de los cultivos, y eficiencia en el uso de recursos**. Sin embargo, se recomienda implementar sensores de humedad por cada sección diferente e cultivo para poder hacer mediciones más precisas de la necesidad de la planta y poder integrarlo al sistema de riego automático por medio de humedad, así mismo se hace la recomendación de usar transmisores de temperatura integrados a cortinas automáticas para poder tener un control de ventilación, y poder aprovechar los rayos UV por medio de fotosensores. La automatización completa permitirá mantener un ambiente controlado de manera más precisa que las prácticas manuales, lo que resultara en un uso más eficiente de los recursos, reducción de costos operativos y un mayor rendimiento en la cosecha.

El costo inicial de automatización dependerá de la necesidad, sin embargo, los beneficios obtenidos en términos de productividad, calidad y eficiencia justificaran el uso de esta tecnología, especialmente en invernaderos de mediana a gran escala.



procedimiento de tutoreo 1



Uso de plántulas para eficiencia 1



Abonos naturales 1

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y

PERSPECTIVAS PARA

TRABAJOS FUTUROS

Se puede concluir que el uso de la tecnología no siempre tiene que ser orientado a industrias de gran escala, se puede aplicar a cualquier área de la vida cotidiana. En el caso de los invernaderos, son pocos aquellos que funcionan con un sistema automatizado en Mexico, incluso tan pocos que no hay suficiente evidencia documentada para tener una estadística. Hoy en día muchos invernaderos han sido abandonados por sus dueños en diferentes zonas de Mexico y aquellos que siguen en función, sus dueños son gente de la tercera edad. El objetivo de esta investigación fue el poder innovar invernaderos utilizando tecnología con bajos precios y que fuera funcional. Una vez que se puso en marcha el proyecto. Tuvimos que aprender la metodología tradicional de agricultura para entender el proceso e identificar la necesidad que se podría cubrir con el sistema automatizado. Una vez logrando esto pudimos ver que la mejora de la producción y la reducción de tiempo de mano de obra fue significativa. Sin embargo, durante la marcha del proyecto notamos que podíamos seguir mejorando el proceso utilizando otro tipo de sensores que nos fueran mas eficientes; al final el uso de las tecnologías siempre es una Beta continua ya que la digitalización nunca se detiene. Como se comentó en un inicio, la innovación no solo se trata de integraciones de automatización. También es generar metodologías de proceso que sean funcionales y adecuadas para el sistema; En la primera etapa de la implementación perdimos de vista las metodologías y eso nos llevo a carecer de organización.

Se recomienda que para trabajos futuros se lleve de la mano la digitalización con las metodologías de trabajo ya que esto beneficiara de manera positiva la implementación de

un proyecto, y tener en cuenta que el factor humano es el principal pilar para que un proyecto funcione de principio a fin; al estar en Beta continua el personal deberá de estar siempre capacitado y familiarizado con las nuevas tecnologías. Llevando en sincronía el factor humano con la tecnología, se puede tener una estabilidad del proyecto.

REFERENCIAS

- Albright, L. D. ((2012).). *"Environmental Control Systems for Greenhouses."*
- Brown, R. (1992). *The Renaissance and its Gardens: Glass and Nature*. Oxford: Oxford University Press.
- Clark, E. (2015). *Industrialization and Greenhouses:From Iron to Steel in Agricultural Technology*. Routledge.
- Commission, E. (2020). *Agricultural innovation in the EU: The role of automated systems*. EU.
- Commission., E. (2010). *Europe 2020: A Strategy for Smart, Sustainable and Inclusive Growth*.
- FAO. (2019). *Agricultural Robotics and Automation: Opportunities and Challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Obtenido de www.fao.org
- Forbes, R. J. ((1959)). "Studies in ancient technology."
- Gómez, F. &. (2021). *Hidroponía y aeroponía: nuevas fronteras en la producción eficiente de alimentos*. Tecnológica Agrícola.
- Green, L. (2010). *Materials and Methods in Modern Greenhouse Construction: Plastics and Sustainability*. . Springer.
- Hernández, L. (2020). El impacto de la automatización en la agricultura: Un estudio de caso en invernaderos españoles. *Revista de Tecnología Agrícola*, 22(4), 412-429.
- Jones, H. L. (2008). *Botanical Gardens and Global Exploration: The Age of Discovery*. Harper Collins.
- Kalogirou, S. (. (2004). Solar energy applications in agriculture: Automation of greenhouse systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(5), 1-15.
- López, P. &. (2019). *Costos y beneficios de la automatización en la agricultura: Un análisis para pequeños y medianos productores*. Ediciones Agrarias.

- Martínez, F. &. (2021). *Impacto económico de la automatización en invernaderos: Costos, beneficios y sostenibilidad*. AgroTecnológica.
- Rodríguez, J. &. (2019). *Sostenibilidad y tecnologías renovables en la agricultura moderna: el futuro de los invernaderos*. Universidad de Agricultura y Sostenibilidad.
- Sánchez, L. &. (2020). *Innovaciones tecnológicas en invernaderos inteligentes y su impacto en la sostenibilidad agrícola*. Springer.
- Schenk, F. V.-O. (2018). *Warm summers during the Younger Dryas cold reversal*. *Nature Communications*.
- Smith, J. (2005). *The Agricultural Innovations of Ancient Rome*. Cambridge University Press.
- <https://www.gob.mx/firco/articulos/el-cultivo-bajo-invernadero-detona-proyectos-competitivos-con-calidad-exportacion>. (s.f.). Obtenido de <https://www.gob.mx/firco/articulos/el-cultivo-bajo-invernadero-detona-proyectos-competitivos-con-calidad-exportacion>
- Tuell, M. (2021). *History of Greenhouses and Gardening*. Ohio State University Press. Ohio.

ANEXOS

ANEXO A “Nombre del documento”