



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGÍA

**AUTOMATIZACIÓN EN INVERNADERO
CON ARDUINO PARA PROPICIAR LA
FOTOMORFOGÉNESIS EN ESQUEJES DE
CRISANTEMO VARIEDAD SNOW
ELEONORA**

SAMANTHA AURORA DÍAZ LUNA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

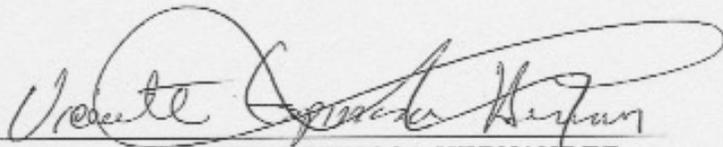
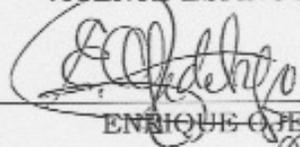
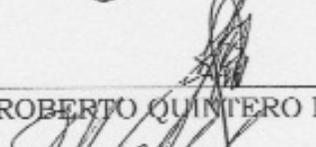
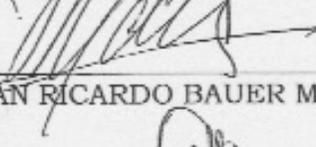
MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2017

La presente tesis titulada: “ **Automatización en invernadero con arduino para propiciar la fotomorfogénesis en esquejes de crisantemo variedad Snow Eleonora**”, realizada por el (la) alumno (a): **Samantha Aurora Díaz Luna** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO(A)	 VICENTE ESPINOSA HERNANDEZ
ASESOR (A)	 ENRIQUE OJEDA TREJO
ASESOR (A)	 ROBERTO QUINTERO LIZAOLA
ASESOR (A)	 JUAN RICARDO BAUER MENGELBERG
ASESOR (A)	 ALFONSO ZARCO HIDALGO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2017

Samantha Aurora Díaz Luna. Automatización en invernadero con arduino para propiciar la fotomorfogénesis en esquejes de Crisantemo Variedad Snow Eleonora.

RESUMEN

Los recientes desarrollos de iluminación con diodos emisores de luz led resultan de gran interés en la horticultura, ya que permiten manipular el espectro radiante que incide sobre las plantas. Los leds tienen una gran eficiencia en la transformación de energía eléctrica en lumínica, con una disipación de radiación en forma de calor casi nula.

En este proyecto de investigación se presenta la aplicación de iluminación con Leds para mejorar la calidad espectral sobre el dosel vegetal teniendo como consecuencia un mejor desarrollo de raíz en esquejes de Crisantemo variedad Snow Eleonora, y por consecuente, un aumento de la calidad de la planta.

Se utilizaron lámparas led de color rojo, azul y combinación de rojo-azul. Las longitudes de onda electromagnética (λ) comprenden los 300-500 nm. Las variables a medir fueron longitud del tallo y peso seco de la raíz. Para tener un control de las horas de luz que requiere el cultivo se desarrolló un software ad- hoc para activar o desactivar las lámparas led y la bomba de riego.

Se instaló un experimento en invernadero con ciclos de 11 horas de luz natural y se agregaron exposiciones de 5 horas de luz led a partir de media noche para lograr el crecimiento vegetativo de los esquejes.

La combinación de luz led roja y azul resultó ser la mejor con respecto al testigo, ya que incrementaron la longitud del tallo en un 55% y el peso seco de la raíz en un 12% respectivamente. El color azul muestra un decremento con respecto al testigo, en la longitud del tallo en un 62% y el peso seco de la raíz en un 16%. El color rojo y el testigo, no presentan diferencias significativas en el peso seco de la raíz.

Palabras clave: LEDs, intensidad luminosa, fotoperiodo, arduino.

Samantha Aurora Díaz Luna. Automation in greenhouse with arduino to propitiate the photomorphogenesis in cuttings of Chrysanthemum Variety Snow Eleonora.

ABSTRACT

Recent light developments with led light-emitting diodes are interesting for horticulture, as they allow manipulation of the radiant spectrum that affects plants. The LEDs have a great efficiency in the transformation of electrical energy in light, with a dissipation of radiation in the form of almost null heat.

This paper shows the application of lighting with LEDs to improve the spectral quality on the plant canopy resulting in a better root development in cuttings of Chrysanthemum Variety Snow Eleonora, and consequently an increase in the quality of the plant.

Red, blue and red-blue led lamps were used. The electromagnetic wavelengths (λ) comprise 300-500 nm. The variables to be measured were stem length and root dry weight. In order to control the hours of light required by the crop, software was developed ad-hoc to activate or deactivate the led lamps and the irrigation pump.

A greenhouse experiment was installed with cycles of 11 hours of natural light and exposures of 5 hours of led light were added from midnight to achieve the vegetative growth of the cuttings.

The combination of red and blue led light was the best with respect to the control, since they increased stem length by 55% and root dry weight by 12% respectively. The blue color shows a decrease with respect to the control, in the length of the stem in 62% and the dry weight of the root in 16%. The red color and the control, did not present significant differences in the dry weight of the root.

Key words: LEDs, luminous intensity, photoperiod, arduino

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología(CONACYT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios doctorales.

Al Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo y en especial al programa de Edafología por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios doctorales.

A mi consejo particular por aceptar la responsabilidad de orientarme, por su apoyo y comprensión.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE	vi
ÍNDICE DE CUADROS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2.OBJETIVOS E HIPÓTESIS	5
2.1 OBJETIVOS.....	5
2.1.1. OBJETIVO GENERAL	5
2.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	5
2.2 HIPÓTESIS	6
2.2.1. HIPOTESIS ALTERNATIVA.....	6
3.JUSTIFICACIÓN	8
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
4.1 ORIGEN DEL CRISANTEMO	9
4.1.1 CLASIFICACIÓN BOTANICA.....	9
4.1.2 GENERALIDADES DEL CULTIVO CRISANTEMO.....	9
4.1.3 REQUISITOS DE SUELO, VENTILACIÓN HUMEDAD Y LUZ.....	11
4.2 PROCESO DE ENRAIZAMIENTO DE ESQUEJE DE CRISANTEMO	14
4.2.1 ESQUEJE.....	14
4.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA FORMACIÓN DE RAÍCES EN LAS ESTACAS	15
4.2.3 CARACTERISTICAS DEL MATERIAL DE PROPAGACIÓN, SELECCIÓN Y ESTADO	15
4.2.4 TRATAMIENTOS APLICADOS A LOS ESQUEJES	15
4.3 FOTOSÍNTESIS.....	16

4.3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FOTOSÍNTESIS	20
4.3.2 CLOROPLASTOS	21
4.3.3 TILACOIDES.....	23
4.4 FOTOMORFOGÉNESIS.....	24
4.5 LA LUZ Y LAS PLANTAS.....	26
4.5.1 IMPORTANCIA DE LA LUZ EN EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS Y CULTIVOS: PAR, MAR.....	27
4.6 APLICACIONES DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL EN LA PRODUCCIÓN AGRICOLA.....	29
4.7 PLATAFORMAS DE HARDWARE LIBRE	40
4.7.1 CLASIFICACIÓN DE HARDWARE LIBRE.....	41
4.7.2 PLATAFORMAS COMERCIALES DE HARDWARE LIBRE	42
4.8 SENSORES Y ACTUADORES	45
4.9 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN	46
4.9.1 PARADIGMAS DE PROGRAMACIÓN	46
4.9.2 ALGORITMOS.....	48
4.10 AUTOMATIZACIÓN	49
4.10.1 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO	50
4.10.2 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO	51
4.11 METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PRODUCTOS	52
4.11.1 TOP DOWN.....	52
5. MATERIALES Y MÉTODOS	56
5.1 EXPERIMENTO.....	56
5.2 EXPERIMENTO EN INVERNADERO	57
5.2.1 SUSTRATO	58
5.2.2 MATERIAL VEGETATIVO	59
5.2.3 LUZ ARTIFICIAL	60
5.3 MONITOREO AMBIENTAL Y AUTOMATIZACIÓN.....	60
5.3.1 HARDWARE	61
5.3.2 SOFTWARE	62

5.4 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	64
5.5 MUESTREO	65
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	74
6.1.1 MONITOREO AMBIENTAL Y CONTROL.....	76
6.1.2 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.....	77
6.1.3 SENSOR DE LUZ.....	78
6.2 EXPERIMENTO EN CAMPO	80
6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	93
6.4 SOFTWARE DE CONTROL.....	95
6.5 AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO	98
6.6 EXPERIMENTOS PREVIOS Y SUS DIFICULTADES.....	100
7. CONCLUSIONES.....	105
8. RECOMENDACIONES.....	106
9. LITERATURA CITADA	108

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen de Cultivos en el Estado de en México en el 2013.	2
Cuadro 2. Organización de los pigmentos en las membranas de los Tilacoides	19
Cuadro 3. Regiones del espectro electromagnético.....	27
Cuadro 4. Desglose de la influencia de la longitud de onda en la fisiología de las plantas por Coene(1995)	29
Cuadro 5. Datos aleatorios generados con Excel	65
Cuadro 6. Datos redondeados (Repetidos con rojo)	67
Cuadro 7. Datos aleatorios con la función JERARQUIA.....	69
Cuadro 8.Datos de la longitud del tallo en un periodo de 15 días	81
Cuadro 9. Datos para análisis estadístico	83
Cuadro 10. Resultados de análisis de varianza realizada con Excel	84
Cuadro 11. Resultados de análisis de varianza realizada con R	84
Cuadro 12. Resultado de la prueba de Tukey en Exel.....	86
Cuadro 13.Resultado de Tukey en R	87
Cuadro 14.Peso seco de raíz (g)	89
Cuadro 15.Resultados de Análisis de Varianza en Excel.....	90
Cuadro 16. Resultados de análisis de varianza en R.....	90
Cuadro 17.Resultado de prueba de Tukey en Excel.....	91
Cuadro 18. Resultado de prueba de Tukey en R.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crisantemo variedad Snow Eleonora.	10
Figura 2. Esquema del proceso de la fotosíntesis.....	18
Figura 3. Estructura de un cloroplasto	22
Figura 4. Onda electromagnética polarizada.....	26
Figura 5. Experimento con luz LED.....	35
Figura 6. Crecimiento, contenido de flavonoides y fenólicos, fotosíntesis neta y conductancia estomática del Crisantemo.....	37
Figura 7.. Parámetros morfológicos y de desarrollo de <i>Ocimum basilicum</i> "LL" y <i>Ocimum basilicum</i> "RR" cultivados bajo los cinco diferentes tratamientos.....	39
Figura 8. Plataforma netduino	43
Figura 9. Plataforma BeagleBone.	44
Figura 10. Plataforma Raspberry PI	44
Figura 11. Simbología elemental para la representación de un algoritmo mediante un diagrama de flujo.	48
Figura 12. Diagrama general de un sistema de control de lazo cerrado....	51
Figura 13. Diseño Bottom Up.....	55
Figura 14. Prototipo de experimento controlado: A) Diseño 3D del interior del prototipo; B) Diseño 3D del exterior; C) Interior del experimento controlado; D) Ausencia de luz.....	56
Figura 15. A) Experimento en el invernadero. B) Iluminación dirigida con luz led	57
Figura 16. Tezontle	58
Figura 17. Desinfección del sustrato	58
Figura 18. Espaciamiento del sustrato	59
Figura 19. A) Selección de esquejes; B) Colocación del esqueje en el sustrato.....	59
Figura 20. Lámparas de LEDs.....	60
Figura 21. Metodología Bottom Up.....	61

Figura 22. Entradas y Salidas de Arduino	62
Figura 23. Pantalla de Software Arduino	62
Figura 24. Flujo de procesos del Modelo PSP.....	64
Figura 25. Activación del complemento “Herramientas para análisis” de Excel®.....	65
Figura 26. Selección aleatoria del testigo.....	71
Figura 27. selección aleatoria del azul.....	72
Figura 28. Selección aleatoria del rojo.....	72
Figura 29. selección aleatoria del rojo-azul.....	73
Figura 30. Experimento en habitación cerrada.....	74
Figura 31. Tratamientos con luz LED.....	75
Figura 32. Esquejes cultivados con luz led color R-A(rojo y azul), R(rojo), A(azul); Izquierda: parte vegetativa del crisantemo; Derecha: parte radicular del crisantemo.....	75
Figura 33. Primer prototipo de monitoreo.....	76
Figura 34. Datos procesados con Excel®.....	77
Figura 35. Sensor de Temperatura y humedad relativa	78
Figura 36. A) módulo sensor de luz ;B) fotorresistencia	79
Figura 37. Lector de condiciones ambientales	79
Figura 38. Experimento en campo	80
Figura 39. Esquejes cultivados en invernadero con luz led color B(blanca), R-A(rojo-azul), A(azul), R(roja); A), Área foliar; B) parte radical.	80
Figura 40. Resultados de medias en crecimiento del tallo.....	88
Figura 41. Crecimiento de tallo	88
Figura 42. Peso seco de las raíces	92
Figura 43. Resultados de medias de peso seco	92
Figura 44. Software para procesar los datos ambientales	94
Figura 45. Gráficas generadas por el software.....	94
Figura 46. Diagrama de conexión de componentes.....	95
Figura 47. Esquema general del proyecto de Tesis.....	96
Figura 48. Circuito esquemático de un relé	96

Figura 49. Relés para accionar lámparas y bomba de riego	97
Figura 50. Pantalla principal del software de control.	97
Figura 51. Configuración de horarios.	98
Figura 52. Automatización del análisis estadístico	99
Figura 53. Experimento inicial	100
Figura 54. Experimento fase dos	101
Figura 55. Primer experimento en invernadero.....	101
Figura 56. Experimento con malla	102
Figura 57. Experimento con malla a la orilla de la cama.....	103
Figura 58. Techo de invernadero	103

1. INTRODUCCIÓN

México posee regiones con las condiciones naturales idóneas para el establecimiento de invernaderos. La agricultura protegida está en expansión ya que permite obtener productos de calidad tanto para el mercado nacional como de exportación.

En los últimos años, los cultivos hortícolas presentan tendencias hacia la obtención de producción anticipada o fuera de estación. La utilización de invernaderos o casas sombra, representa una alternativa de producción y una oportunidad de comercialización de los productos cultivados bajo estos sistemas ya que, además de ofrecer protección contra las condiciones adversas del clima a los cultivos, le dan una mejor calidad y mayores rendimientos a la producción. La agricultura protegida, por tanto, es una de las actividades que, dentro del sector primario, tiene un auge muy importante, llegando a ser detonante en la economía de los países y en la economía de aquellos que están inmersos en esta actividad.

Algunas de las ventajas que se tienen al producir bajo esquemas controlados dentro de un invernadero son:

- 1.- La obtención de un mayor rendimiento por hectáreas.
- 2.- Disminución de los costos en fertilizantes.
- 3.- Mejor control de plagas y enfermedades.
- 4.- Disminución del riesgo de pérdida por lluvias, heladas y plagas.
- 5.- Reducción de los costos operativos y de mano de obra.
- 6.- Potencial de producir cultivos con mayor valor de mercado.
- 7.- Producción de cultivos fuera de temporada.

Trabajar mediante esquemas de producción intensiva, como lo es la agricultura protegida, representa de manera significativa algunas

desventajas técnicas. Por ejemplo, se le tienen que proporcionar al cultivo sus necesidades óptimas de temperatura, humedad relativa, humedad del suelo, ventilación, luz, radiación solar, oxígeno y fertirriego para así obtener el mayor rendimiento y calidad de los cultivos. Los diferentes sistemas de producción que se llevan a cabo en la agricultura protegida son: en suelo, en acolchado, en sustrato, a raíz desnuda, NFT (nutrient film technique), técnica de película nutritiva, y NGC (new system) sistema nuevo de cultivo, entre otros (ICAMEX–SEDAGRO, 2015).

Los ornamentos tienen gran importancia en el sector agrícola mexicano, por su gran variedad de flores de corte, follaje, plantas y árboles que son comercializados a nivel nacional e internacional.

El Estado de México es el principal productor de crisantemo con 2,310 hectáreas de superficies sembradas y cosechadas alcanzando un volumen de producción de 8, 544,894 toneladas, cifra dada por Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación en el 2013, ver cuadro 1.

Cuadro 1. Resumen de Cultivos en el Estado de México en el 2013.

SECRETARIA DE AGRICULTURA, GANADERIA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN			
SERVICIO DE INFORMACIÓN AGROALIMENTARIA Y PESQUERA			
Riego – Año Agrícola 2013			
Cultivo	Superficie Sembrada (Ha.)	Superficie Cosechada (Ha.)	Volumen de Producción (Ton.)
Agapando (gruesa)	6.00	6.00	3,140.00
Alcatraz (gruesa)	1.00	1.00	520.00
Begonia(planta)	5.30	5.30	1,521,312.00
Crisantemo(gruesa)	2,310.00	2,310.00	8,544,894.00
Crisantemo(planta)	1.80	1.80	583,200.00

Geranio(planta)	16.40	16.40	5,431,680.00
Girasol Flor(gruesa)	173.50	173.50	80,580.00
Gladiola(gruesa)	730.00	730.00	779,547.00
Hortensia(planta)	2.70	2.70	903,960.00
Lilium(gruesa)	186.00	186.00	600,800.00
Margarita(manojo)	21.00	21.00	59,850.00
Noche Buena(planta)	12.00	12.00	763,800.00
Nube(manojo)	10.00	10.00	16,000.00
Rosa(planta)	10.20	10.20	2,203,200.00
Zempoalxochitl(manojo)	4.00	4.00	16,000.00
Zempoalxochitl(planta)	2.50	2.50	810,000.00

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA 2013

El poder manipular las respuestas de los cultivos para así optimizar los beneficios esperados ha sido el sueño de todo productor. El desarrollo de herramientas para hacerlo, como es la utilización de luces que permiten un mejor control de esas respuestas, sin duda contribuye a acercar ese sueño a la realidad. Las lámparas LEDs son de reciente ingreso en tecnología ambientes controlados para favorecer la agricultura. Este tipo de luz tiene un gran potencial para mejorar sustancialmente la calidad productiva, reduciendo los costos totales de la iluminación (Bourget, 2008). La tecnología LED se caracteriza por presentar una gran eficiencia en la transformación de energía eléctrica en lumínica, siendo casi nula la disipación de radiación en forma de calor (Jao y Fang, 2004).

De igual forma, los LEDs posibilitan la emisión de longitudes de onda monocromáticas, lo cual permite beneficiar a cultivos en particular. Por ejemplo, las plántulas de papa requieren de luz ajustada (monocromática) para aumentar la calidad y mejorar el tiempo de producción (Jao, y Fang,2004).

La idea de este proyecto surge por la inquietud de saber que efectos ocasiona la luz LED de diferentes longitudes de onda en los esquejes de Crisantemo Variedad Snow Eleonora. En una primera etapa se construyó un prototipo para ver si había algún efecto en los esquejes con este tipo de iluminación. Tras la construcción de este prototipo surge la necesidad de monitorear las variables ambientales de una forma rápida y cómoda. Es así como nace la idea de recurrir al hardware que me permita controlar y monitorizar en tiempo real las variables, además de ofrecer la posibilidad de modificar rangos de trabajo de actuadores, visualizar variables, incluso poder trazar gráficas de las variables climáticas que intervienen en el crecimiento de los esquejes.

Es aquí donde la tecnología de última generación hace posible desarrollar estas herramientas gracias a plataformas como Arduino, la cual permite obtener datos de entrada, como son: sensores de humedad y temperatura ambiental, y realizar acciones de encendido y apagado de luces y bombas de riego.

La necesidad del ser humano de controlar su entorno y modificarlo en base a sus necesidades y la búsqueda de simplificar y hacer el trabajo de investigación más fácil y práctico desde su implementación en invernadero hasta el análisis estadístico de los datos obtenidos, son los pilares que me empujan a la realización de este proyecto de tesis.

2.OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 OBJETIVOS

2.1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la luz led de alta intensidad de distinta longitud de onda (rojo, azul, combinación de azul-rojo) teniendo como testigo un foco incandescente, en un tiempo de exposición de 5 horas, en el enraizamiento de esqueje de crisantemo Variedad Snow Eleonora, evaluando las variables de longitud de tallo y peso seco raíz.

2.1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- **Diseñar y construir un prototipo** representativo y semejante a un invernadero, que integre los sensores y actuadores necesarios para llevar a cabo las tareas de control y monitorización, en un ambiente controlado y libre de iluminación solar.

Se llevará a cabo el control de dos variables: temperatura y humedad del ambiente; y se actuará sobre una salida: sistema de encendido de luces. Se colocarán tres tratamiento de luz LED con diferentes longitudes de onda(rojo, azul, combinación rojo-azul).

- **Integrar sensores y actuadores en el invernadero** para automatizar las acciones de encendido y apagado de luces LED y riego, que regiran el experimento.

Se llevará el control de dos variables: temperatura, humedad; y se actuará sobre dos periféricos de salida: luz y bomba. Se tendrán tres tratamientos de luz LED de diferente longitud de onda(rojo, azul,

combinación rojo-azul) contra el testigo que constará de un foco incandescente. Se evaluará el enraizamiento del esqueje del Crisantemo variedad Snow Eleonora, en un periodo de 15 días.

- **Desarrollar un software** para el monitoreo de las variables climáticas y su posterior graficación.
- **Desarrollar interfaz gráfica** que permita tener el control del tiempo y la duración de los actuadores que activarán o desactivarán luces y bomba.
- **Desarrollar un software para la placa Arduino** que controlará los componentes en el invernadero, y gestionara el almacenamiento de los datos que provengan de los sensores de humedad y temperatura ambiental.

2.2 HIPÓTESIS

La luz LED con diferentes longitudes de onda (rojo, azul, combinación rojo-azul), y el foco incandescente, favorecen al incremento en la enlongación de tallo y desarrollo de raíz en la etapa de enraizamiento del crisantemo variedad Snow Eleonora.

2.2.1. HIPÓTESIS ALTERNATIVA

1. Al menos el uso de un tipo de longitud de onda (rojo, azul, rojo-azul) frente al foco incandescente favorecerá el desarrollo de raíz y elongación del tallo.

2. El uso de luz LED de color rojo usada como iluminación artificial favorece el incremento en la elongación del tallo y desarrollo de raíz.

3. La combinación de Luz LED rojo-azul favorece directamente la fotomorfogénesis, en su variables de desarrollo de raíz y crecimiento del esqueje de crisantemo variedad Snow Eleonora.

3.JUSTIFICACIÓN

El incremento de producción de plantas ornamentales en invernadero ha ido en incremento en los últimos años. En la etapa de crecimiento de la planta, la mayoría de las plantas requieren de periodos largos de luz. Aunque los sistemas de invernaderos se caracterizan por optimizar el crecimiento de las plantas, la mayoría de los invernaderos utilizan luminarias que se basan en focos incandescentes para simular la iluminación solar, esto trae como consecuencia un costo energético alto.

El crisantemo variedad Snow Eleonora en sus etapas de enraizamiento y crecimiento vegetativo requiere de largos periodos de luz, la mayoría de los productores en el Estado de México, usan como sistema de iluminación complementaria focos incandescentes.

El uso de lámparas LED en la agricultura protegida, trae consigo grandes beneficios como son: menor costo y consumo energético; mayor y mejor calidad de luz; no generan calor, además que no se emiten rayos ultravioletas ni rayos infrarrojos, lo cual evita riesgos tanto en la salud humana como en la flora y fauna.

Con esta investigación se beneficia a los productores de flor de Crisantemo al disminuir costos en el consumo de luz artificial para la planta mediante tecnología LED; así como también la generación de herramientas de automatización a bajo costo utilizando herramientas libres de software y hardware.

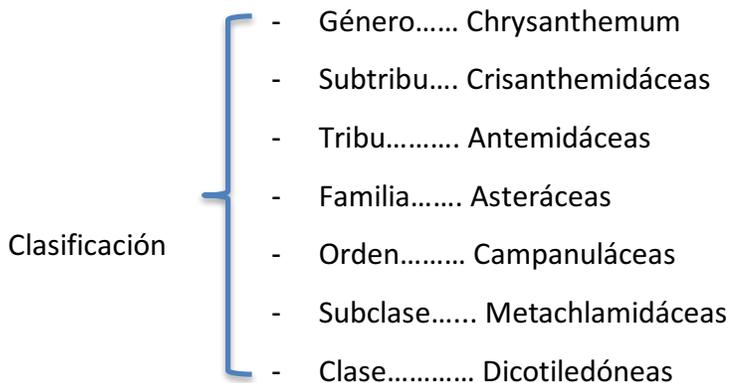
4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 ORIGEN DEL CRISANTEMO

Existen unas 150 especies naturales de *Chrysanthemum*, originarias todas ellas del viejo mundo (India, China, Japón, Marruecos y en general de Asia y África). El nombre de *Chrysanthemum* procede de dos palabras griegas: *Kryos* y *Anthemon*, y que adquieren el significado conjunto de “la flor de oro”.

4.1.1 CLASIFICACIÓN BOTANICA

El género *Chrysanthemum* pertenece a la recientemente creada familia de las asteráceas, formadas a partir de la desaparición de la familia de las compuestas, y comprende numerosas especies con floración de diferentes épocas del año.



4.1.2 GENERALIDADES DEL CULTIVO CRISANTEMO

El cultivo del crisantemo cubre cerca del 21% de la superficie florícola estatal bajo invernadero. Ocupa un lugar importante en la floricultura porque es durable y tiene una diversidad de formas colores y tamaños. Requiere de algunas condiciones básicas de clima y suelo para lograr una buena producción. La temperatura óptima para su desarrollo es de 15 a 25 grados durante el día y 15 grados durante la noche.

El crisantemo es una planta originaria del oriente asiático de alto valor ornamental, gracias a sus flores de gran número de formas y colores (Kofranek, 1980).

El crisantemo de los floricultores es una inflorescencia compuesta que tiene flores en un receptáculo o cabezuela. Las inflorescencias sencillas (como margaritas) tienen flores radiales (hilera exterior) que son pistiladas y flores concéntricas (las centrales) que son bisexuales y fértiles. El receptáculo es plano o convexo y está rodeado de una envoltura de brácteas, figura 1.



Figura 1. Crisantemo variedad Snow Eleonora.

Según Arbos(1992), la inflorescencia del crisantemo se encuentra formada por dos tipo de flor pequeñas, por ello se les llama flores compuestas; en cada inflorescencia existen dos tipos: las flores del disco, que se encuentran en el centro y son tubulares y perfectas (con parte masculina y femenina fértiles y con pétalos poco desarrollados), y las flores radiales o ligaduras, que son imperfectas, y las flores fértiles se localizan en los márgenes, tienen pétalos largos y bien desarrollados.

Según Kofranek (1980), las formas de las inflorescencias se clasifican en: sencillas, tipo margarita, compuesta de una o dos hileras de flores pistiladas exteriores (radiales) y flores planas bisexuales (concéntricas) en el centro.

Anémonas, similares a las de forma sencilla excepto que las flores concéntricas pueden ser del mismo color o de uno diferente al de las flores radiales.

1. Pompones, con una cabeza globular formada de flores radiales cortas y uniformes, no hay flores concéntricas.
2. Decorativas, similares a los pompones, ya que se componen en su centro principalmente de flores radiales, pero las hileras exteriores son más largas que las centrales, dando a la inflorescencia una forma plana e irregular.
3. Flores grandes mayores de 10 cm. Clasificadas de diferentes formas: incurvadas dobles, doble reflejo, flores radiales tubulares y misceláneas.

4.1.3 REQUISITOS DE SUELO, VENTILACIÓN HUMEDAD Y LUZ

4.1.3.1 Suelo

El crisantemo requiere suelos con buena estructura, que estén compuestos 50% de sustrato o tierra, 30% de agua y 20% de aire.

Adiciones periódicas de materia orgánica favorecen lograrlo. Se pueden utilizar como fuentes de materia orgánica, la cascarilla de arroz o cacahuate, bagazo de caña o desecho de medio de cultivo del champiñón.

El pH (nivel de acidez) adecuado para el desarrollo del cultivo es de 6.2 a 7.0 para aumentarlo se puede utilizar caliza molida, calcita o cal hidratada, cualquiera de ellas en cantidad de 2 toneladas por hectárea.

4.1.3.2 Ventilación

Es benéfica ya que permite que las hojas transpiren o liberen humedad, ayudando a conservar la planta fresca bajo temperaturas elevadas. Una ventilación adecuada también permite prevenir enfermedades fungosas,

pues altas densidades de plantación suelen asociarse con mayor incidencia de enfermedades.

4.1.3.3 Humedad

Durante las primeras etapas de desarrollo del cultivo se requiere la mayor humedad: posteriormente, sólo se necesita proporcionar humedad mínima, evitando el marchitamiento de la planta o que los tallos adquieran una consistencia semileñosa.

Una vez que los botones han iniciado su desarrollo, se puede iniciar la aplicación de riegos. La planta requiere una lámina de riego semanal de 25 a 33 milímetros, equivalente a 25 litros por metro cuadrado. La frecuencia de riegos dependerá de la estación del año. La humedad relativa del invernadero debe ser de 65 a 70%.

4.1.3.4 Luz

Los crisantemos deben plantarse en lugares soleados, con sombra las flores son pequeñas y los tallos delgados, descendiendo considerablemente la calidad del producto. El crisantemo se clasifica como cultivo de día corto que requiere noches largas para iniciar la floración. Esto significa que más de 14 horas de luz promueven el crecimiento vegetativo, pero también que días con menos de 12 horas de luz inducen la floración. Es necesario suministrar iluminación artificial en el área de producción para simular días largos y desarrollar el desarrollo del botón, tanto en la planta madre como de los esquejes, desde la etapa de enraizado hasta 3 semanas después. Se debe colocar una hilera de focos de 100 watts por cada 2 “tinas” o camas de cultivo, espaciándolas a 250 cm y una altura de 180 cm sobre las plantas.

4.1.3.4.1 Técnicas de fotoperiodo

Dada la reacción de muchas variedades de crisantemos a la duración del día, puede provocárseles la floración en diferentes épocas del año, ya sea aplicando luz artificial, o bien, reduciendo la duración del día tapando las plantas con plástico o tela negra. Hemos de tener en cuenta que la temperatura tiene un papel muy importante en el momento de aplicar este tipo de técnicas, puesto que la baja temperatura nocturna retarda o inhibe la iniciación y el desarrollo del botón floral, de igual forma que la temperatura demasiado elevada, aunque se aplique luz en invierno u oscuridad en verano.

En el cultivo de crisantemo el día largo debe hacerse cortando la noche, de forma que la planta “no duerma” más de 7 horas seguidas. Hace unos 50 años se demostró, que el efecto de alargar el día a más de 14 horas y media no es tan práctico como el de cortar la noche. En este sentido el crisantemo es una planta de noche larga y de día corto.

Por ello, en agosto se acostumbra a dar 1 hora de luz artificial, alrededor de las 12 horas de la noche, en septiembre se aplican 2 horas, que pueden llegar a ser 4 en diciembre. El tiempo durante el cual debe aplicarse esta técnica dependerá de la altura que alcance la planta, o de si queremos adelantar o retrasar la floración. En la práctica es la experiencia la que decide el momento, puesto que las variedades se diferencian en cuanto a su velocidad de crecimiento, influyendo así mismo la época del año en que se realiza el cultivo. A pesar de ello, como norma general se aplica luz hasta que las plantas alcanzan una altura media de 25 a 30 cm, para que al final del cultivo florezcan con un tallo de 70 a 90 cm.

Si se dispone de un luxómetro, una intensidad de luz demasiado alta producirá un retraso en la floración, el consecuente alargamiento de los

cuellos de las flores y por tanto una disminución en la calidad del producto.

Otro método es la utilización de la fórmula cíclica, saltando la luz de un lugar a otro. Una forma simple es un cuarto de hora de luz, un cuarto de hora de obscuridad, y otra vez un cuarto de hora de luz.

4.1.3.5 Temperatura

En el cultivo de crisantemos para flor cortada puede haber 11°C de mínima, o menos, según variedades, siempre que durante el día se dé una temperatura máxima de 16°C o más. Muchas variedades necesitan un periodo de frío para inducirlas a la floración, este periodo de frío se sitúa entre los 5 y los 10°C mientras que otras en cultivo con temperaturas mínimas inferiores a los 11°C tienden a formar el botón floral pronto, aunque se les aplique el día largo.

4.2 PROCESO DE ENRAIZAMIENTO DE ESQUEJE DE CRISANTEMO

4.2.1 ESQUEJE

Se entiende por esqueje como cualquier porción vegetativa que es extraída de una planta, o bien, como cualquier porción de una planta como la raíz, tallo u hoja, para ser inducida a que forme raíces (Wells, 1979).

En la propagación vegetativa a través de esquejes, se coloca la plántula en condiciones ambientales favorables y se induce a que forme raíces y tallos, obteniéndose con ello una planta nueva, independiente, que en la mayoría de los casos es idéntica a la planta madre (Hartmann y Kester, 1988). Este método de propagación presenta múltiples ventajas como la perduración de clones a través del tiempo.

4.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA FORMACIÓN DE RAÍCES EN LAS ESTACAS

Al momento de hacer enraizar un esqueje, son varios los factores que inciden en este proceso. Para un mejor análisis y comprensión, se dividirán en tres grandes grupos: el primero de ellos corresponde a las características relacionadas con el material vegetal a propagar; en segundo lugar, están los tratamientos aplicados a los esquejes y, por último, se encuentran las condiciones ambientales a que son sometidas las estacas durante el enraizamiento (Hermosilla, 1996).

4.2.3 CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DE PROPAGACIÓN, SELECCIÓN Y ESTADO

Las estacas son obtenidas de plantas jóvenes o de sectores más juveniles tienen mayor capacidad para formar raíces (Dirr y Heuser, 1987; Botti, 1999). Cualquier tratamiento previo que logre rejuvenecer a la planta o mantener la fase juvenil será efectivo para favorecer el enraizamiento de las estacas.

Sección de la planta madre de la cual se obtienen los esquejes. Este efecto es de suma importancia. La diferencia de enraizado puede deberse a una distribución desigual de hormonas vegetales y de reservas nutritivas en las diferentes partes de la planta (Vastey, 1962; citado por Santelices, 1998).

4.2.4 TRATAMIENTOS APLICADOS A LOS ESQUEJES

Aplicación de reguladores de crecimiento (Hormonas sintéticas). Las hormonas vegetales llamadas auxinas, fabricadas por las plantas, intervienen en la formación de las raíces de las estaquillas. A través del tiempo se ha logrado sintetizar compuestos capaces de estimular (inducir) o de acelerar esta formación (Wells, 1979; MacDonald, 1986; Hartmann y Kester, 1980).

Para uso general en el enraizamiento de estacas de tallo de la mayoría de las especies de plantas, es recomendado el ácido indolbutírico y en otras ocasiones el ácido naftalenacético. Para determinar cuál regulador tiene mejores resultados y en que concentración óptima influye en el enraizamiento de una especie, es necesario realizar pruebas empíricas (Hartmann y Kester, 1988; Botti, 1999).

Fungicidas. Las iniciaciones de raíces adventicias seguida por la supervivencia de las estacas enraizadas constituyen dos fases diferentes. Con frecuencia las estacas forman raíces, pero no sobreviven mucho tiempo. Durante el enraizamiento y el periodo siguiente, las estacas están expuestas a ataques de diversos microorganismos. Los tratamientos con fungicidas prestan cierta protección y conducen tanto a una mayor supervivencia como a una mejor calidad de raíces (Hartmann y Kester, 1988).

Normalmente el material utilizado para la propagación de plantas presenta algún grado de contaminación, especialmente con hongos. Por ello es indispensable desinfectar las estacas antes del tratamiento con reguladores de crecimiento (Botti, 1999). Pueden usarse de manera independiente o mezclada.

4.3 FOTOSÍNTESIS

La fotosíntesis es la absorción de energía lumínica y conversión en potencial químico estable por la síntesis de compuestos orgánicos (Bidwell, 1979).

Puede considerarse como un proceso en tres fases:

1. La absorción de la luz y retención de energía lumínica.
2. La conversión de energía lumínica en potencial químico.

3. La estabilización y almacenaje del potencial químico.

La fotosíntesis es importante por muchas razones. Desde el punto de vista del hombre, su mayor importancia es su papel en la producción de alimento y oxígeno; por lo tanto, se estudia a menudo en función de sus productos finales. Sin embargo, éstos son secundarios en el proceso integral.

Salisbury y Ross (1994) señalan que la fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas aprovechan la energía solar para transformar el CO₂ de la atmósfera en los compuestos orgánicos. De acuerdo a Faust (2003), la fotosíntesis ocurre cuando las plantas toman agua del suelo, CO₂ del aire, y energía contenida solar para crear azúcares que pueden ser movilizados dentro de la planta para proporcionar el combustible necesario para su desarrollo.

Mansfield y Jones(1976) mencionaron que la eficiencia de la fotosíntesis depende de los factores internos como: la estructura de la hoja, el contenido de clorofila, la habilidad de acumulación de productos de la fotosíntesis en los cloroplastos, la contribución de las enzimas y la presencia de nutrimentos minerales y de los factores externos como: la calidad, la duración e intensidad de la luz, la concentración de dióxido de carbono y del oxígeno, la temperatura, la disponibilidad del agua y de los nutrimentos en el suelo y la velocidad del viento.

La fotosíntesis es la transformación química por el cual los vegetales verdes, ciertas algas y algunas bacterias captan la energía luminosa que procede del sol y la convierten en energía química. La clorofila que se encuentra en los cloroplastos tiene la capacidad de absorber la energía de la luz solar y cederla para la elaboración (síntesis) de glucosa, a partir de dos compuestos disponibles en el medio ambiente: agua y dióxido de

carbono (ver figura 2), entonces el rendimiento y la actividad fotosintética se ve influenciado por la intensidad luminosa, el color de la luz, la temperatura y la concentración de CO₂ y O₂. Durante el proceso de adaptación de las plantas a los cambios ambientales se lleva a cabo en estos ajustes moleculares, fisiológicos y morfológicos que se presentan como respuesta a las modificaciones de la radiación, la calidad espectral, el fotoperiodo, y la temperatura (Thompson y White, 1991; Chamovitz y Deng, 1996).

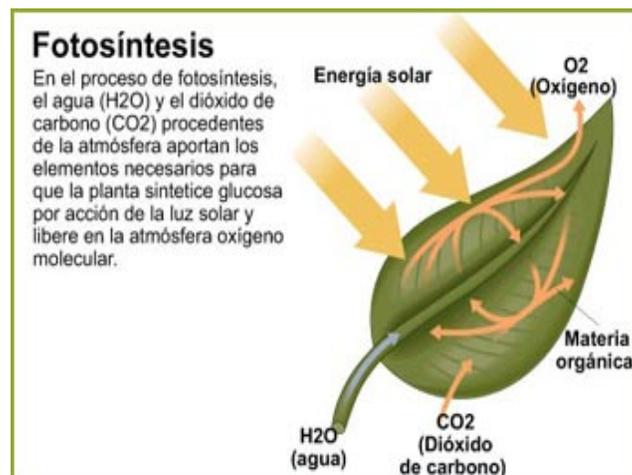


Figura 2. Esquema del proceso de la fotosíntesis

La ecuación general que resume el proceso se define como:



La fotosíntesis es posible gracias a la existencia de unas moléculas especiales, denominadas *pigmentos fotosintéticos*, capaces de captar la energía luminosa. La capacidad de una molécula para absorber la luz depende del ordenamiento de los electrones alrededor de los núcleos atómicos en su estructura. Cuando uno de estos electrones absorbe la energía de un fotón (hv) el electrón se eleva a un nivel energético superior, se dice que la molécula que ha absorbido el fotón se encuentra en estado excitado que en general es inestable.

Los electrones elevados a orbitales de energía superior tienden a volver a sus orbitales normales de menor energía; la molécula excitada regresa a su estado basal, liberando la energía en forma de luz, calor o ser utilizada en realizar trabajo químico.

Los pigmentos fotosintéticos se localizan en las membranas de los *tilacoides*, asociados a proteínas y lípidos, en agrupamientos denominados fotosistemas. Los pigmentos más importantes de estos fotosistemas son las clorofilas (clorofilas a y b), además de éstos contienen pigmentos secundarios, los carotenoides como β -caroteno de color rojo, xantofilas de color amarillo, etc. Los pigmentos accesorios absorben luz de longitud de onda diferente a las clorofilas.

Todos los pigmentos de un fotosistema pueden absorber energía luminosa de diferentes longitudes de onda principalmente del espectro visible (entre 400 y 700 nm) aunque solo unos pocos son capaces de transducir la energía luminosa en energía química, éstos son los que constituyen el centro de reacción del fotosistema. Los restantes pigmentos asociados a lípidos y proteínas, constituyen las moléculas recolectoras de luz o antenas. Su función es absorber energía lumínica y transferirla por resonancia hasta el centro de reacción, formado por clorofilas especiales asociadas a proteínas.

Cuadro 2. Organización de los pigmentos en las membranas de los Tilacoides

ORGANIZACIÓN DE PIGMENTOS EN LAS MEMBRANAS DE LOS TILACOIDES			
PIGMENTOS (se agrupan en)	FOTOSISTEMAS (Agrupamientos de pigmentos y proteínas)	Antena	300 moléculas de pigmentos, Clorofila a, b, carotenos, proteínas y lípidos
		Centro de reacción	<ul style="list-style-type: none"> • Clorofila diana • Aceptor primario • Dador Primario

4.3.1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA FOTOSÍNTESIS

Se ha podido comprobar experimentalmente que en el rendimiento de la fotosíntesis influyen los siguientes factores:

a) Concentración de CO_2 . Si la intensidad luminosa es elevada y constante, el proceso fotosintético aumenta en relación directa con la concentración de CO_2 en el aire, hasta llegar a un cierto límite, en el cual se estabiliza.

b) Concentración de O_2 . Cuanto mayor es la concentración de oxígeno en el aire, menor es el rendimiento fotosintético, debido a los procesos de fotorrespiración.

c) Escasez de agua. La escasez de agua en el suelo y de vapor de agua en el aire disminuye el rendimiento fotosintético. Así, ante la falta de agua se cierran las estomas para evitar la desecación, y la entrada de CO_2 es menor.

d) Temperatura. Cada especie está adaptada a vivir dentro de un intervalo de temperaturas. Dentro de ese intervalo, a mayor temperatura, mayor eficacia de las enzimas y, por tanto, mayor rendimiento fotosintético. Si se sobrepasan los límites de temperatura, se producen alteraciones enzimáticas y el rendimiento disminuye. Si se llega a producir la desnaturalización de las proteínas, sobreviene la muerte de la planta.

e) Tiempo de iluminación. Hay especies en las que, a más horas de luz, mayor rendimiento fotosintético. Otras, en cambio, precisan de periodos nocturnos.

f) Intensidad luminosa. Cada especie está adaptada a vivir dentro de un intervalo de intensidad de luz. Hay especies de penumbra y especies

fotófilas. Dentro de cada intervalo, a mayor iluminación, mayor rendimiento, hasta superar ciertos límites, en los que se produce la fotoxidación irreversible de los pigmentos fotosintéticos.

g) Color de la luz. La clorofila a y la clorofila b absorben energía lumínica en la región azul y roja del espectro; los carotenos y xantofilas, en la azul; las ficocianinas, en la naranja; y las ficoeritrinas, en la verde. Todos estos pigmentos pasan la energía a las moléculas diana. La luz monocromática menos aprovechable en los organismos que carecen de ficocianinas y ficoeritrinas es la luz verde. En las cianofíceas, que sí las poseen, la luz roja estimula la síntesis de ficocianina, y la luz verde, la de ficoeritrina.

4.3.2 CLOROPLASTOS

Los cloroplastos son orgánulos generalmente grandes (1 a 10 micras) que están presentes en las células de las plantas. Una célula de una hoja puede tener de 20 a 100 cloroplastos. Su forma es variable, desde esférica o elíptica a mucho más compleja. Los cloroplastos forman parte de un conjunto de orgánulos denominados plastidios o plastos. Los plastidios poseen en su interior ADN, el cual ha mantenido unos 250 genes derivados de su ancestro bacteriano, los cuales codifican para ARN ribosómico, ARN de transferencia y para ARN mensajero. Este último se traducirá en proteínas para la división, y para la realización de la fotosíntesis en el caso de los cloroplastos. Hay distintos tipos de plastidios: los leucoplastos no poseen clorofila, sino que almacenan sustancias, como es el caso de los amiloplastos que almacenan almidón, los proteinoplastos que almacenan proteínas o los elaioplastos que almacenan lípido; los cromoplastos contienen ciertos pigmentos como los carotenos o las xantofilas; los cloroplastos que producen clorofila y realizan la fotosíntesis. Todos derivan de los denominados proplastidios que están presentes en las

células meristemáticas y dependiendo del tipo celular se convertirán en un tipo de plastidio u otro. Su diferenciación está gobernada por el núcleo de la célula (Megias, M., et. al. 2015).

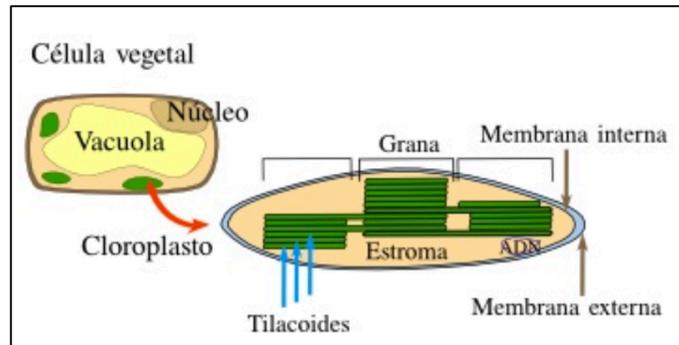


Figura 3. Estructura de un cloroplasto

Los cloroplastos están formados por varios compartimentos (ver Figura 3). El más externo es la envuelta, formada por dos membranas, una externa y otra interna, más un espacio intermembranoso entre ambas. Al contrario que en la mitocondria, la membrana interna no posee pliegues. En el interior del cloroplasto se encuentran los tilacoides, que son sacos aplanados delimitados por una membrana y amontonados formando estructuras a modo de pilas de monedas denominadas granum. Estos apilamientos están conectados entre sí mediante membranas. En las membranas de los tilacoides se sitúan las proteínas y moléculas responsables de realizar una parte de la fotosíntesis. El espacio interno del cloroplasto no ocupado por los tilacoides se denomina estroma, donde se encuentra el ADN y se llevan a cabo otros procesos de la fotosíntesis.

La función de los cloroplastos es la transformación de energía luminosa, primero en energía eléctrica y después en energía química. La energía eléctrica en los sistemas biológicos aparece, bien como agentes reductores, bien como gradientes de potencial derivados de la separación de cargas y concentración de iones a través de las membranas. La estructura más simple requerida para la producción y el mantenimiento de un gradiente

iónico es un compartimento rodeado de una membrana semipermeable capaz de bombear especies iónicas vectorialmente a través de ella.

4.3.3 TILACOIDES

Los tilacoides están constituidos por biomembranas, es decir, bicapas lipídicas. Gran parte de la función fotosintética realizada en los tilacoides sólo es posible precisamente por el hecho de que son biomembranas. Las membranas biológicas están constituidas por una doble capa de lípidos antipáticos, es decir, lípidos que tienen una cabeza polar en contacto con el medio acuoso y una cola hidrófoba que se sitúa hacia el interior de la membrana, en contacto con la cola de la capa opuesta. Por estas características químicas, las membranas son barreras semipermeables entre espacios acuosos que compartimentan el medio interno celular, o lo separan del exterior. Además, junto a los lípidos, los tilacoides contienen los complejos proteicos fotosintéticos, que están insertados transversalmente en las membranas lipídicas y son los que realizan propiamente las reacciones fotosintéticas. (De la Rivas, 2000).

Con esta inserción, los complejos quedan en contacto con dos espacios acuosos diferentes. Además, las membranas son un fluido bidimensional en el que los complejos fotosintéticos pueden moverse. Este movimiento lateral dentro de la matriz bidimensional de la membrana tilacoidal permite cambiar y regular la función de las proteínas fotosintéticas como respuesta a distintas situaciones metabólicas, pues sin el movimiento, se pueden producir variaciones en las conexiones entre los distintos elementos.

4.4 FOTOMORFOGÉNESIS

Las plantas son capaces de percibir intensidad, espectro y duración de la luz para ajustar su crecimiento y controlar procesos biológicos.

La fotomorfogénesis es un proceso por el cual las plantas captan la luz a diferentes longitudes de onda y estas señales luminosas generan cambios fisiológicos que afectan el crecimiento, desarrollo y la diferenciación vegetal. La fotomorfogénesis se define como el crecimiento y desarrollo dependientes de la luz, pero no relacionados con la fotosíntesis (Jiao et al., 2007). La fisiología de las plantas depende en gran medida del espectro de luz, por lo tanto, la calidad de la luz debe satisfacer los requisitos de la fotosíntesis y fotomorfogénesis para el crecimiento exitoso de la planta (Shahak et al., 2008; Casierra-Posada y Rojas, 2009). Para el crecimiento normal de la planta es necesario el óptimo de la proporción roja y del rojo lejano, así como una proporción particular de luz azul. La luz verde también tiene un efecto para el crecimiento de la planta, aunque su efecto es discreto en comparación con los colores rojo y azul (Folta y Maruhnich, 2007). En su estado natural, en los rayos del sol, encontramos un muy amplio espectro con varios tipos de radiaciones: Ultravioletas (0,6%), visibles fotosintéticas o luz fotosintéticamente activa PAR (37%), infrarroja corta (NIR) e infrarroja larga FR (ambas 62%). Las que realmente nos interesan son las PAR ya que el resto afectan principalmente a la temperatura. Y dentro de la radiación PAR, el rojo y el azul son los colores que mayor impacto transmiten a las plantas ya que el verde es el que menor lo tiene, por ello se ven verdes sus hojas ya que rechazan la mayoría de los rayos de luz verde. La luz roja es la que estimula la floración, pero ha de ser combinada con el azul para seguir su desarrollo molecular y proteínico.

Massa (2008) menciona que la tecnología LED tiene un gran potencial como sistema de iluminación suplementaria o de fuente única para la producción de plantas en horticultura. En la etapa vegetativa de la planta, el desarrollo de órganos vegetativos y reproductivos, la tasa de crecimiento y la biomasa, fueron afectadas por el tipo de luz, en particular, por el rojo y rojo cercano (Bradburne et al., 1989; Casal y Aphalo, 1989; Aphalo y Di Benedetto, 1991).

La luz actúa como una señal de las condiciones ambientales que rodean la planta. Estos son los fotorreceptores que funcionan como transductores de las señales lumínicas para proporcionar información que controla las respuestas fisiológicas o morfológicas. Los sistemas de pigmentos que contienen las plantas (clorofila) capturan la energía lumínica en diferentes regiones del espectro electromagnético (400-700 nm) proporcionando energía para la fotosíntesis. La planta necesita saber la cantidad, calidad y duración de la luz para poderse adaptar y aprovechar la luz. Los fotorreceptores son un conjunto de pigmentos capaces de absorber ciertas longitudes de ondas específicas. Además de los pigmentos fotosintéticos, en las plantas se han identificado tres grupos de fotorreceptores según las longitudes de onda que absorben:

- Fitocromos, receptores de luz roja (600-700 nm) y de luz roja lejana (700-800 nm).
- Criptocromos receptores de luz azul (400- 500 nm) y de luz ultravioleta a (320-400 nm)
- Fotorreceptores de luz ultravioleta B (280-320 nm) que son los más importantes en los procesos morfogenéticos son los que absorben la luz roja y la azul.

La luz actúa sobre la asimilación de carbono, la temperatura de las hojas y en el balance hídrico, y en el crecimiento de órganos y tejidos,

principalmente en el desarrollo de tallos, expansión de hojas y en la curvatura de tallos, interviene también, en la germinación de semillas y en la floración. La luz y la temperatura están directamente correlacionadas (Caldari, 2007).

La ubicación de los fotoreceptores en la planta es muy variada reportándose su acción en las semillas, plántulas, en los pecíolos, láminas foliares, yemas foliares, yemas florales, flores y frutos. La actividad, concentración e influencia de los distintos fotoreceptores es variable en cada órgano y cambia en las distintas etapas del desarrollo de la planta.

4.5 LA LUZ Y LAS PLANTAS

La imagen clásica de la luz (Fig. 4) es la de la onda compuesta de campos eléctrico (E) y magnético (B) oscilantes cuyos vectores son perpendiculares entre sí y perpendiculares a la dirección en la que viaja la onda.

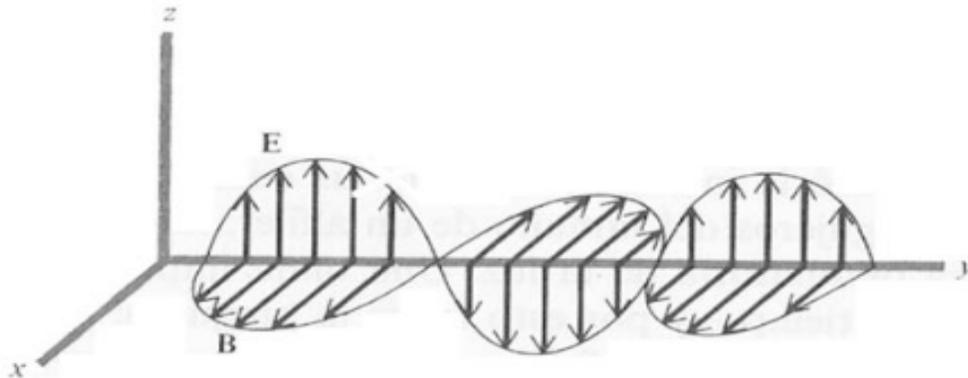


Figura 4. Onda electromagnética polarizada (Levine, 1992)

La luz emitida por átomos o moléculas calentados (como en la luz solar) es no polarizada, con los vectores de campo eléctrico apuntando en diferentes direcciones para diferentes puntos del espacio debido a que las partículas actúan independientemente unas de otras. Una onda electromagnética

puede tener cualquier frecuencia (Hz o s⁻¹) que es el número de ciclos que pasan por un punto dado en la unidad de tiempo. Un ciclo es la parte de la onda que hay entre dos crestas sucesivas. La longitud de onda λ (nm) es la distancia entre crestas sucesivas y el espectro electromagnético es el rango de frecuencia y longitudes de onda de las ondas electromagnéticas (Levine, 1992). El espectro electromagnético se divide en varias regiones (Pérez et al., 2006), cuadro 3.

Cuadro 3. Regiones del espectro electromagnético(Hernández,2002)

Color	Rango de longitud de onda(nm)	Longitud de onda representativa	Frecuencia (Ciclos/s) Hz	Energía (kJ/mol)
Ultravioleta	<380	254	11.8 x 10 ¹⁴	471
Violeta	380-436	410	7.31 x 10 ¹⁴	292
Azul	436-495	460	6.52 x 10 ¹⁴	260
Verde	495-566	520	5.77 x 10 ¹⁴	230
Amarillo	566-589	570	5.26 x 10 ¹⁴	210
Anaranjado	589-627	620	4.84 x 10 ¹⁴	193
Rojo	627-730	680	4.41 x 10 ¹⁴	176
Infrarrojo	>730	1400	2.14 x 10 ¹⁴	85

4.5.1 IMPORTANCIA DE LA LUZ EN EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS Y CULTIVOS: PAR, MAR

La fotosíntesis es un proceso que ocurre en dos fases. La primera fase depende de la luz (reacciones luminosas), requiere la energía directa de la luz que genera los transportadores que son utilizados en la segunda fase.

La fase independiente de la luz (reacciones de oscuridad) se realiza cuando los productos de las reacciones de luz son utilizados para formar enlaces covalentes carbono-carbono (C-C), de los carbohidratos (Barceló et al., 2000).

Las plantas poseen fotosensibilidad en la que sólo una parte de la luz visible interviene en la fotosíntesis (asimilación) o zona PAR, $\lambda = 400-700\text{nm}$, siendo PAR la radiación fotosintéticamente activa la cual constituye el 45-50% de la energía recibida (Castilla, 2005). La radiación PAR participa en la producción de biomasa vegetal (Plénet et al., 2000).

Paralelamente al concepto de PAR apareció la MAR o radiación morfológicamente activa. La MAR es una región discontinua del espectro relacionada con la absorción en receptores de ultravioleta, fitocromos y criptocromos. Dentro de la MAR, la región del rojo (R) (600-700 nm) (Taiz y Zeiger, 2002) y rojo lejano (FR) (700-800 nm) influyen fuertemente en la fotomorfogénesis (Pérez et al., 2006). La luz Ultravioleta es la que más afecta genéticamente al trigo, éste como mecanismo de defensa se adapta a la luz Ultravioleta en cada región (Pinto et al., 2000).

La respuesta de las plantas a la longitud de onda se expone en la Cuadro 4 (Coene, 1995). Dorais (2003) comentó que el sistema fitocromo (Phys, 350-800 nm) regula los eventos metabólicos que se traducen en respuestas de adaptación, tales como la longitud del tallo, forma de hoja y su grosor, y el reparto de carbono entre órganos de la planta. Los receptores del criptocromo (320-500 nm) y UV-B (UV-B, 280-350 nm), son otros dos tipos de fotorreceptores que participan en la apertura de las estomas, en el color de la hoja y su grosor, y en la elongación del tallo.

Cuadro 4. Desglose de la influencia de la longitud de onda en la fisiología de las plantas por Coene(1995)

Longitudes de onda(nm)	Respuesta de la planta
280-315	Los procesos morfológicos y fisiológicos de la planta se ven influenciados
315-400	La clorofila absorbe un poco esta luz, el fotoperiodo es influenciado frenando el alargamiento de las células
400-520	Gran absorción de luz por la clorofila y los carotenoides; fotosíntesis muy influenciada
520-610	Baja absorción de los pigmentos
610-720	Baja absorción en la clorofila, la fotosíntesis y el fotoperiodo están muy influenciadas
720-1000	Baja absorción en general; alargamiento de las células estimuladas; la floración y la germinación se ven influenciadas
Por encima de 1000	La energía absorbida se convierte en calor

4.6 APLICACIONES DE ILUMINACIÓN ARTIFICIAL EN LA PRODUCCIÓN AGRICOLA

Hoy en día, gran cantidad de investigaciones con luces LED (del acrónimo inglés LED, light-emitting diode: 'diodo emisor de luz'), buscan determinar los efectos con diferentes longitudes de onda en el desarrollo de plantas de interés comercial. Los estudios buscan diseñar combinaciones de luces que optimicen la respuesta de un cultivo determinado para mejorar su calidad y cantidad de producción.

Como ocurre con otras fuentes de luz, la calidad del espectro de emisión de las LED provoca efectos notables en la anatomía y morfología de las plantas, en la absorción de nutrientes y en la variación de su composición nutritiva. En diversos estudios, el efecto de luz suplementaria en diferentes

etapas del desarrollo de las plantas ha demostrado potencial para manipular el crecimiento, siendo una alternativa más amigable con el ambiente que la aplicación de productos reguladores de crecimiento. Más aún, los resultados de los estudios confirman que es posible manipular el sabor, aroma y el peso de algunos vegetales al variar solamente las longitudes de onda de la luz en el invernadero usando lámparas LED.

Por ejemplo, Paniagua, Hernández, Rico, Domínguez, Martínez y Martínez (2015) evaluaron el efecto de luz LED de alta intensidad de distinta longitud de onda (rojo, azul y verde) y un control basado en luz blanca, en germinación y crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.) evaluando las variables de velocidad de germinación, porcentaje de germinación, longitud media de hipocotileo(LHM), peso fresco y seco de las plántulas, en busca de alternativas de iluminación para la producción en ambiente controlado. Utilizaron un diseño experimental completamente al azar, con cuatro repeticiones de 30 semillas por unidad experimental. Obtuvieron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos de las variables evaluadas. Los tratamientos con luz roja presentaron los mayores valores de velocidad de germinación, donde el rojo por 12 horas fue el mejor con incrementos del 25% contra el control. La variable LMH en el tratamiento verde por 12 horas tuvo incremento del 39% respecto al control, convirtiéndose en el mejor. Por otro lado, en la variable peso fresco, el mayor peso se presentó en el tratamiento verde por 12 horas con un incremento contra el control del 16%. Finalmente, en la variable peso seco, el mayor peso se presentó en el tratamiento rojo por 12 horas con un incremento contra el control del 6%. Estos resultados mostraron que las respuestas fisiológicas producidas por la exposición a distintas longitudes de onda de luz LED de alta intensidad en semilla de brócoli variaron de acuerdo con el tiempo de exposición y tipo de longitud de onda usado, además de que este tipo de iluminación mostró ser una opción viable para mejorar la calidad fisiológica del brócoli.

Desde el año 2002, la Nippon Keiki Kagoshima Works, Ltd., una compañía fabricante de LEDs en Japón ha venido experimentando con el cultivo de crisantemos con iluminación mediante LEDs emisores color rojo. En enero de 2007 publicó que, para un pequeño invernadero, la utilización de dos LEDs rojos de 75 W (un total de 150 W) tenía el mismo efecto que 50 lámparas incandescentes de 75 W (un total de 3750 W). El resultado fue una disminución del costo de la energía eléctrica consumida en 25 veces (Martin et al.,2010).

Malagamba (2015) hace mención que, en la NASA en el Centro Espacial Kennedy, han estado experimentando en el uso de LEDs para el cultivo de plantas, con el objetivo de desarrollar prototipos utilizables en la producción de alimentos para las misiones espaciales, así como en verificar posibles variaciones causadas por el tipo de luz en el contenido de sustancias en las plantas que contrarresten los efectos de la radiación cósmica en los humanos. Una selección apropiada de la luz a utilizar tendría una importante influencia en la calidad nutritiva de los alimentos a usar para las tripulaciones de misiones espaciales.

En Wisconsin, una empresa productora de hortalizas para ensaladas verdes por hidroponía, reemplazó sus lámparas que producían luz por medio de un arco electrónico que se forma entre electrodos de tungsteno puestos en el interior de un tubo transparente de cuarzo fundido lleno de gases y sales, por lámparas LED, y aseguran que éstas usan 70% menos energía y estiman un incremento en la productividad de sus cultivos de un 40% (Malagamba, 2015).

Al-Hasithi, et. al. (2016) desarrollaron un hardware y software de un sistema de iluminación artificial para cultivos protegidos. El sistema constaba de un conjunto de lámparas, circuitos de control de potencia y un sensor de intensidad lumínica, que junto al software desarrollado en

LabView, permitían llevar a cabo el control sobre la cantidad de energía irradiada durante todo el proceso de cultivo teniendo en consideración la forma en que esta energía se distribuye en cada fotoperiodo. El sistema se basó en un conjunto de 4 lámparas halógenas y una lámpara LED. Desarrollaron una interfaz de usuario en Labview que permite seleccionar el modo de control, los parámetros, recoge en tiempo real datos de la intensidad lumínica, la cantidad de luz irradiada en el fotoperiodo y el estado de las lámparas.

Xiaoying, et al., (2012) encontraron que la luz de diodo emisor de luz (light-emitting diode, LED) de color azul aumentaba el peso seco total de la planta en tomates cherry. La fotosíntesis y el crecimiento de estas plantas de tomate bajo la influencia de la luz azul, fue superior en comparación con las plantas de control. Según los autores, este resultado podría explicarse con los hallazgos de Matsuda, et al., (2008), quienes afirman que la luz azul se convierte en un estímulo para inducir respuestas de aclimatación en las plantas, encaminadas a la distribución de energía en el fotosistema II (PSII) y, a su vez, tiene que ver con la asimilación del CO₂ en condiciones de alta irradiación.

Casierra-Posada y Peña Olmos (2015) mencionan que las longitudes de onda importantes en fotobiología son el ultravioleta, la luz visible y la infrarroja. Las longitudes de onda entre 300 y 900 nm son capaces de afectar el crecimiento y el desarrollo de los vegetales. Sin embargo, no solamente la calidad de luz puede influir en los procesos de crecimiento de las plantas, pues otras de sus propiedades, por ejemplo, su intensidad y su duración, así como los factores climáticos, también están involucradas. El desarrollo de investigaciones con una sola franja de longitud de onda es muy útil en la identificación del espectro más adecuado para la aplicación en estudio. No obstante, la detección de las influencias de los segmentos de espectro adyacentes en ciertas aplicaciones es difícil debido a que este

es continuo, sin márgenes aparentes entre los colores vecinos. El uso de coberturas de colores o filtros fotoselectivos es una técnica agrícola, que, si bien no es nueva, aún puede explorarse y estudiarse para esclarecer aspectos relacionados con su uso, como los estímulos lumínicos y la respuesta de las plantas a ellos. Realizan un análisis del alcance del uso de la exposición de plantas a la calidad de la luz en diferentes rangos del espectro. En estudios realizados en la fresa encontraron que, la mayor parte foliar la presentaron las plantas que crecieron bajo la cobertura de color rojo. Para el caso de la remolacha y brócoli los investigadores encontraron que los porcentajes de opacidad de los filtros fotoselectivos de color azul indujeron mayores valores de área foliar en comparación con los filtros de color rojo; sin embargo, la expansión del área foliar de las plantas que crecieron bajo la cobertura roja fue la más alta en comparación con las demás coberturas de colores. Concluyen que el uso de luces LED afecta de manera diferenciada el metabolismo de las plantas y puede originar cambios en la acumulación de azúcares en las hojas, lo cual sería un parámetro deseable en términos de calidad nutricional de los alimentos. A pesar de que la influencia de la calidad de luz es evidente, no existe un modelo de respuesta en la mayoría de las plantas cuando se exponen a rangos específicos de la longitud de onda, dado que, al comparar los hallazgos de investigaciones llevadas a cabo bajo condiciones similares, se observan grandes contrastes cuando diferentes especies se exponen a la misma franja de longitud de onda.

Ramos y Ramírez (2016), exponen las características más relevantes de los sistemas de iluminación LED para cultivos en interiores y se propone un prototipo de iluminación que emula el comportamiento solar, es decir que varía la intensidad de la luz en un periodo de tiempo definido (6 horas de fase lumínica y 2 de fase oscura conforman un ciclo de trabajo, que se repite 3 veces en un día) donde el modelo de funcionamiento será el de proporcionar toda la luz que la planta necesita para crecer

saludablemente, en un entorno libre de luz solar. Desarrollaron un sistema electrónico avanzado, diseñado para cultivos en interiores que integra una fuente de iluminación LED y un conjunto de sistemas de control capaces de generar condiciones apropiadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas en un ambiente libre de luz solar.

El sistema incluye:

- Un módulo de sensores dispuestos para captar las variables que intervienen en la granja.
- Un sistema de control FUZZY que aprovecha la información que aportan los sensores para ejercer acciones de control y así mantener condiciones deseables al interior de la granja o zona de cultivo.
- El programa capaz de generar la señal de control para el sistema de iluminación LED.

Diseñaron una lámpara con luz LED, ubicando por cada 2 LED rojos 1 LED azul, lo que permitiría tener un patrón de iluminación casi homogéneo. Logran corroborar el crecimiento de plantas en un espacio libre de radiación solar natural, es decir, un espacio donde las variables más importantes son controladas, pero donde la luz natural fue remplazada por el sistema de iluminación propuesto.

Gómez-Coto (2014) analizó tres diferentes tipos de luz sobre una especie ornamental de importancia económica y comercial: *Salvia splendens*, mediante la utilización de tres distintas fuentes de luz artificial (azul tipo LED, púrpura tipo LED y fluorescente) para modificar el ambiente de crecimiento de cada una de ellas. Encontró que la calidad espectral proporcionada con luz suplementaria sólo tiene efecto en los días a floración comparada con la del testigo, puesto que reduce en una semana la floración. No encontró diferencia entre los tres diferentes tratamientos con luz suplementaria. Las demás variables analizadas

(número de brotes, altura, diámetro promedio y valores SPAD) no tienen un efecto significativo por la calidad espectral utilizada.

Ouzounis, *et al.* (2014), afirman que las plantas cultivadas bajo lámparas LED tienen mayor calidad que las cultivadas con solo luz solar, dado que la composición espectral selectiva de la iluminación LED aumenta la cantidad de metabolitos secundarios protectores.

Los metabolitos secundarios son los compuestos que no están directamente involucrados en el crecimiento normal, desarrollo o reproducción de una planta. Al principio se pensaba que estos compuestos no participaban en el metabolismo de la planta, pero, funcionan como agentes de la competencia planta-planta y simbiosis planta-microbio.

Son la defensa de las plantas contra los patógenos, herbívoros y estrés abiótico, además, sirven como atrayentes (olor, color, sabor) para los polinizadores y los animales dispersadores de semillas.

Se realizó un experimento con Crisantemo, rosas y campánulas, aplicando luz LED (ver Figura 5) dentro de un invernadero que produce aproximadamente $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante 16 horas por día. La temperatura en los compartimentos de invernadero se fijó a $24 \text{ }^\circ\text{C}$ y $18 \text{ }^\circ\text{C}$ durante el día y la noche, respectivamente.



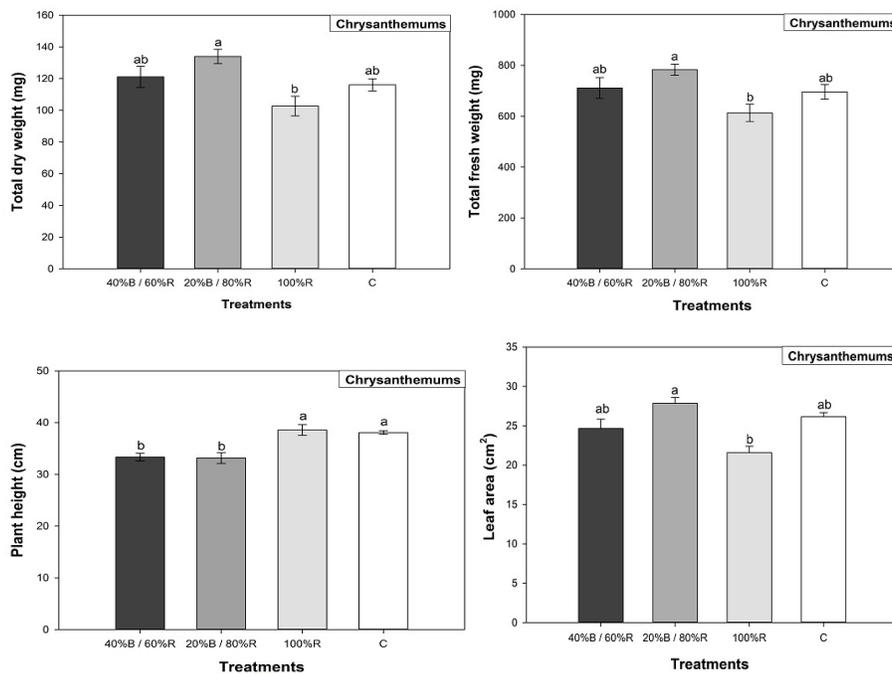
Figura 5. Experimento con luz LED.

(1) 40% Azul 60% Rojo (2) 20% Azul 80% Rojo (3) 100% Rojo (4) 100% Blanco

Como resultados, se pudo comprobar que la luz roja y azul afectan al aparato fotosintético, pero es importante resaltar que los beneficios de los LEDs varían de un cultivo a otro.

La combinación de iluminación LED roja y azul tiene un efecto positivo en el crecimiento de las plantas y el desarrollo de rosas, crisantemos y campánulas. Los parámetros fisiológicos y fotosintéticos aumentaron con el aumento de la luz azul. Por último, se pudo comprobar que los metabolitos secundarios, que son importantes para la defensa bioquímica de las plantas, también aumentan con la luz azul adicional.

A continuación, la figura 6 muestra de manera gráfica, los resultados de crecimiento, contenido de flavonoides y fenólicos, fotosíntesis neta y conductancia estomática del Crisantemo.



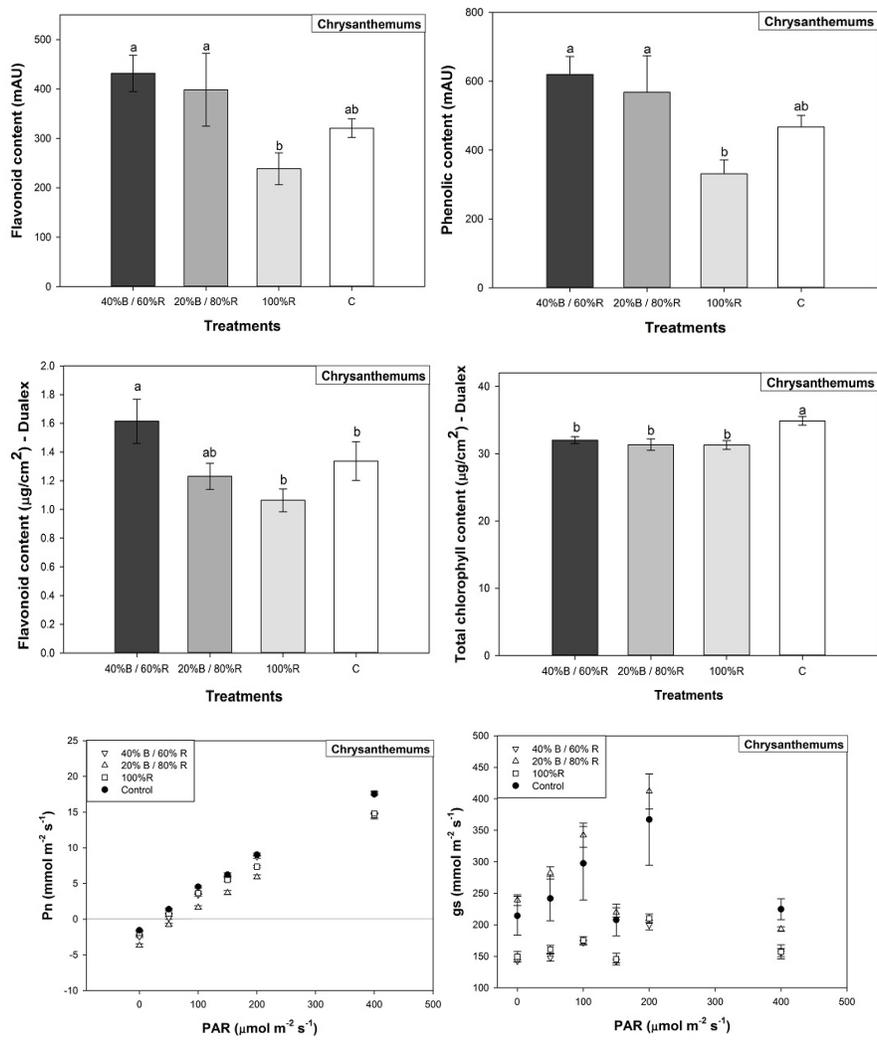


Figura 6. Crecimiento, contenido de flavonoides y fenólicos, fotosíntesis neta y conductancia estomática del Crisantemo. Fuente: Ouzounis, T., Fretté, X., Rosenqvist, E., & Ottosen, C-O. (2014). Spectral effects of supplementary lighting on the secondary metabolites in roses, chrysanthemums, and campánulas.

Bantis, Ouzounis y Radoglou (2016), investigaron las características morfológicas y fotoquímicas de dos cultivares de hoja de lechuga y híbrido Athos de Rubín rojo, bajo iluminación artificial. Aplicaron cuatro tratamientos con luz LED de los colores rojo y azul. Se hicieron diferentes mezclas entre colores junto con tubos fluorescentes.

Se utilizaron cámaras de crecimiento durante 28 días bajo radiación fotosintéticamente activa de $200 \pm 20 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para todos los tratamientos a la altura de la planta.

Las lámparas fluorescentes blancas (Osram, Fluora, Munich, Alemania) se usaron como tratamiento de control o testigo.

Las luces LED generan una amplia Espectro continuo con una mezcla de radiación ultravioleta (UV, <400 nm), azul (B, 400-500 nm), verde (G, 500-600 nm), rojo (R, 600-700 nm) y rojo lejano, 700 - 800 nm).

El riego se aplicó diariamente con rociadores automáticos de agua y los recipientes se giraban con frecuencia para asegurar condiciones de crecimiento iguales.

Los tratamientos de color rojo, testigo y la combinación de azul con rojo para la hoja de lechuga, y rojo para el híbrido Rubín Rojo tuvieron una mayor tasa de crecimiento. Las raíces de la hoja de lechuga fueron significativamente más largas bajo el color rojo en comparación con el azul, mientras que el híbrido de Rubín rojo no mostró diferencias significativas.

La biomasa total fue significativamente mayor con el color azul, rojo en comparación con el testigo, para ambos cultivares. Tanto para el híbrido de hoja de lechuga como para el híbrido de rubí rojo, la relación raíz / brote (R / S) fue favorecida con azul, mientras que el testigo tuvo el menor impacto.

A continuación, se muestra en la figura 7, los parámetros morfológicos y de desarrollo bajo los tratamientos de luz led.

Cultivars	Parameters	Light treatments				
		Control (FL)	AP673L (Far Red)	G2 (Red)	AP67 (Red-Blue)	NS1 (Blue)
<i>Ocimum basilicum</i> "LL"	Shoot height (cm)	3.22 ± 0.19 ^a	2.34 ± 0.26 ^b	3.52 ± 0.16 ^a	3.42 ± 0.33 ^a	2.43 ± 0.13 ^b
	Root length (cm)	4.03 ± 0.12 ^{ab}	5.69 ± 0.67 ^a	4.50 ± 0.26 ^{ab}	4.52 ± 0.36 ^{ab}	3.73 ± 0.34 ^b
	Root/Shoot ratio	0.09 ± 0.01 ^c	0.29 ± 0.02 ^b	0.26 ± 0.03 ^{bc}	0.35 ± 0.09 ^b	0.57 ± 0.04 ^a
	Leaf area (cm ²)	10.02 ± 0.39 ^a	6.56 ± 0.54 ^b	6.56 ± 0.38 ^b	6.91 ± 0.64 ^b	5.70 ± 0.38 ^b
<i>Ocimum basilicum</i> "RR"	Shoot height (cm)	4.09 ± 0.25 ^{bc}	3.50 ± 0.28 ^c	5.46 ± 0.22 ^a	5.08 ± 0.28 ^{ab}	3.93 ± 0.30 ^{bc}
	Root length (cm)	4.59 ± 0.44 ^a	6.23 ± 0.42 ^a	4.42 ± 0.37 ^a	4.94 ± 0.36 ^a	6.53 ± 0.78 ^a
	Root/Shoot ratio	0.16 ± 0.03 ^c	0.49 ± 0.11 ^{ab}	0.34 ± 0.03 ^{bc}	0.46 ± 0.04 ^{ab}	0.61 ± 0.04 ^a
	Leaf area (cm ²)	8.25 ± 0.80 ^a	5.59 ± 0.36 ^b	6.70 ± 0.44 ^{ab}	6.05 ± 0.29 ^b	7.05 ± 0.39 ^a ^b

Figura 7. Parámetros morfológicos y de desarrollo de *Ocimum basilicum* "LL" y *Ocimum basilicum* "RR" cultivados bajo los cinco diferentes tratamientos. Fuente: Bantis, F., Ouzounis, T., & Radoglou, K. (2016).

Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success.

El área foliar de ambos cultivares fue mayor bajo el testigo. También se evaluó la capacidad de crecimiento de las raíces. Las plántulas de Lechuga Hoja cultivada bajo el efecto del testigo y rojo, y las plántulas de híbrido Rubín rojo cultivado bajo el color rojo desarrollado nuevo sistema de raíces de manera rápida. Esto podría ofrecer la ventaja de la explotación rápida de un mayor volumen de suelo tras el trasplante.

El contenido fenólico total de la hoja de lechuga fue significativamente mayor con el color azul en comparación con el resto de los tratamientos, mientras que en el híbrido Rubín rojo, con tratamiento azul tuvo un contenido fenólico total significativamente mayor en comparación con el tratamiento testigo y el color rojo.

El estudio demuestra que los leds afectan de forma variable las características de crecimiento y aumentan el contenido fenólico total en comparación con la luz fluorescente convencional para estos dos cultivares de lechuga.

4.7 PLATAFORMAS DE HARDWARE LIBRE

Para el hardware abierto o libre (muchas veces con licencia, “Hardware de Fuentes Abiertas” OSHW, en general también es llamado “open-source” o “fuente abierta”) no hay una definición exacta (se pueden encontrar referencias a distintos artículos sobre un significado), al no existir una definición clara de hardware abierto, cada autor lo interpreta a su manera¹.

Se puede entender por hardware libre a la disponibilidad de diseños de aparatos informáticos, de manera que todas las personas puedan y tengan acceso, como mínimo, a los planos de construcción de los dispositivos. Entonces el objetivo de esto es crear diseños de aparatos informáticos de forma libre, de manera que todas las personas puedan acceder, según Torrente (2013) afirma que como mínimo para considerar una plataforma como open-source, cualquier interesado debe tener acceso a los planos esquemáticos, donde se indican los componentes lógicos y las señales que se conectan entre ellos, pero no se dice nada de cómo es físicamente la placa, aunque existe la posibilidad de encontrar el circuito impreso (PCB, Printed Circuit Board) que explícitamente indica el lugar físico en el que deben situarse los componentes, incluye, sus dimensiones, encapsulados y qué caminos siguen las pistas para unir sus pines, en algunos casos se encuentra el fichero de fabricación, este contiene toda la información necesaria para que se puedan fabricar los PCBs en la industria.

Otra manera de entenderlo es mencionada en Russell (2012), se señalan tres puntos para la definición de hardware libre:

- La interfaz con el hardware debe ser explícitamente hecha pública, por lo que el hardware se puede utilizar libremente.

- El diseño del hardware debe ser hecha pública, para que otros puedan aplicar y aprender de ella.
- Las herramientas utilizadas para crear el diseño deben ser libres, para que otros puedan desarrollar y mejorar el diseño.

Las ventajas principales del hardware libre pueden resultar evidentes para algunos, pero se deben de mencionar las desventajas. Al igual que en el software libre, la denominación de hardware libre, se refiere a la libertad de poder utilizar el dispositivo y su documentación, no a que sea necesariamente gratuito (desventaja implícita).

La desventaja más clara es que la persona que quiera utilizar el hardware, primero lo tiene que fabricar, para lo cual tendrá que comprobar la existencia de los componentes necesarios, construir el diseño y verificar que se ha hecho correctamente, por lo tanto, puede implicar un costo grande sino se realiza de forma correcta. Aunque existen diferentes empresas en todo el mundo que se dedican a construir sus propias versiones de una plataforma libre de manera masiva, lo que facilita adquirir un dispositivo totalmente funcional, que estará totalmente lista para implementarse.

4.7.1 CLASIFICACIÓN DE HARDWARE LIBRE

Existen diferentes maneras de entender la clasificación del hardware libre, sin embargo, la clasificación más común está dada por la naturaleza del hardware:

- Hardware estático.

Esta clasificación de hardware se destaca por ser físicamente único, es decir, se posee el circuito o no, en realidad este resulta ser el más común

en la actualidad, pues se caracteriza por estar limitado por su propia existencia física. No se puede copiar con facilidad ni distribuirlo, pero lo que sí se puede hacer es distribuir sus diagramas de fabricación, o bien a nivel de circuito impreso (PCB).

- Hardware reconfigurable.

El hardware reconfigurable es el que se describe mediante un lenguaje HDL (en el idioma inglés “Hardware Description Language”, de esta manera los diseños se transforman en ficheros de tipo ASCII, es decir código fuente, que describen tanto la estructura del diseño como la función de cada una de las partes integrantes), por lo tanto, su naturaleza es completamente distinta a la del hardware estático. Se desarrolla de una forma muy parecida a como se hace con el software, pues los diseños son ficheros de texto, que contienen el “código fuente”. Se les puede aplicar directamente una licencia libre, como la GPL.¹

Sea cual sea la clasificación del hardware abierto el objetivo resulta ser el mismo, crear diseños de dispositivos electrónicos/informáticos de forma abierta, en colaboración con distintos desarrolladores.

4.7.2 PLATAFORMAS COMERCIALES DE HARDWARE LIBRE

Existen muchas plataformas de desarrollo, con distintos microcontroladores y especificaciones técnicas, que permiten crear dispositivos programados que pueden tomar información del exterior por medio de distintos sensores o captadores de información. A continuación, se mencionan algunas de las plataformas sobresalientes en la actualidad.

¹ GPL es una licencia creada por la “Free Software Foundation”, orientada a proteger la libre distribución, modificación y uso de software.

- Arduino- Es una plataforma de hardware libre o abierto, basado en un microcontrolador de la empresa Atmel, entonces, posiblemente este dispositivo es el más conocido y utilizado en la actualidad por sus variadas ventajas. En este apartado no se abundara sobre esta plataforma, ya que en el capítulo II se realizara un análisis específico.
- Netduino- Lo más importante que abría de mencionarse de esta plataforma es que se programa en .NET (Microsoft Visual C#) que es un poderoso lenguaje pero no es multiplataforma y no es OpenSource ya que es propiedad de la empresa Microsoft, obsérvese Figura 8.

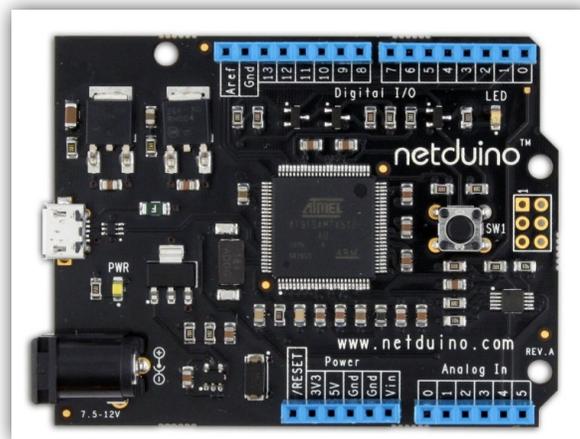


Figura 8. Plataforma netduino

- BeagleBone- Puede verse como una computadora en pequeño, ya que una de sus principales virtudes es el sistema operativo (SO) que utiliza, pues es una versión de Linux (pero con el que también se puede controlar hardware externo a través de él), en si está diseñado para funcionar a un nivel mucho más alto y tiene mucha más capacidad de proceso que la plataforma antes mencionada, obsérvese figura 9.

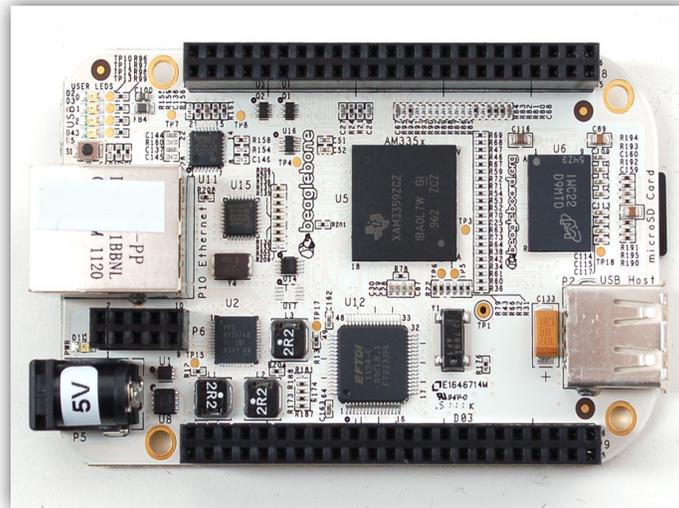


Figura 9. Plataforma BeagleBone.

- Raspberry Pi -Esta placa fue creada por la “Fundación Raspberry Pi” del Reino Unido para estimular la enseñanza de las ciencias de la computación en las escuelas, al igual que la anterior plataforma incluye la opción de ejecutar un sistema operativo Linux. Se destaca pues puede utilizar lenguajes de programación de alto nivel como Python, C++ y Java (esta plataforma al igual que arduino es una de las más populares), obsérvese figura 10.



Figura 10. Plataforma Raspberry PI

4.8 SENSORES Y ACTUADORES

Estos elementos pueden ser considerados como transductores, entonces un transductor es un dispositivo que convierte energía de tipo calórica, lumínica, acústica, presión, movimiento, entre otras, a una energía generalmente eléctrica, para poder medirla y eventualmente controlarla en forma relativamente fácil.

En específico un sensor o captador, como prefiera llamársele, no es más que un componente diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra magnitud, normalmente eléctrica, de manera que se tenga la capacidad de cuantificar y manipular tal información. Estos elementos pueden ser clasificados por diferentes criterios:

- Requerimientos de fuente de energía :Activos o Pasivos
- Naturaleza de la señal de salida :Digitales o Analógicos
- Naturaleza de la magnitud a medir :Mecánicos, Térmicos, Magnéticos, Químicos, etc.
- Variable física de medida :Resistivo, Inductivo, Capacitivo, Piezoeléctrico, etc.

Por otro lado, para que un sistema electrónico pueda accionar o controlar un proceso/producto es necesario que pueda actuar sobre el mismo. Los dispositivos que realizan esta función tienen diferentes nombres, por ejemplo: accionamientos y actuadores. Entre los accionamientos más habituales se encuentran los destinados a generar movimientos (motores y cilindros), los destinados al cambio de fluidos (bombas) y los de tipo térmico (hornos, intercambiadores, etc.). Muchas veces es necesario utilizar elementos complementarios para el control el ejemplo más claro y adecuado son los relevadores, que son interruptores cuyo control corre por cuenta de un circuito eléctrico.

4.9 LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN

Se puede decir que un lenguaje de programación es un lenguaje artificial para expresar programas de una computadora, Sala (2003) señala que para facilitar la tarea del programador se dispone de lenguajes de alto nivel que no dependen del diseño de una computadora.

Para definir un lenguaje de programación es necesario especificar:

- Conjunto de símbolos y palabras clave utilizables.
- Reglas gramaticales para construir sentencias (instrucciones, ordenes) sintácticas y semánticamente correctas.

4.9.1 PARADIGMAS DE PROGRAMACIÓN

Un paradigma de programación es una colección de patrones conceptuales que moldean la forma de razonar sobre problemas, de formular soluciones y de estructurar programas.

Los paradigmas de programación son:

- Imperativo
- Funcional
- Lógico
- Orientada a objetos (OO)

La programación OO es la utilizada en parte en el desarrollo de esta tesis aunque involucra aspectos de la programación estructurada. Entonces en general lo implementado en esta investigación se refiere principalmente a un estilo de programación imperativa mejor dicho funcional o lógico, lo que caracteriza al lenguaje orientado a objetos (LOO) es la forma de manejar información. Salas (2003) indica tres conceptos fundamentales:

- Clase - Tipo de dato con propiedades.
- Objeto – Entidad de una clase que interactúa con otros objetos.

- Herencia – Propiedad por lo cual es posible construir clases a partir de otras existentes.

Uno de los lenguajes más utilizados en las plataformas de hardware libre es Java.

Java es un lenguaje de programación de propósito general orientado a objetos desarrollado por Sun Microsystems. También se puede decir que Java es una tecnología que no sólo se reduce al lenguaje, sino que además provee de una máquina virtual Java que permite ejecutar código compilado Java, sea cual sea la plataforma que exista por debajo; plataforma tanto hardware, como software (el sistema operativo que soporte ese hardware).

Sun describe al lenguaje Java de la siguiente manera:

- Simple
- Orientado a Objetos
- Tipado estáticamente
- Distribuido
- Interpretado
- Robusto
- Seguro
- de Arquitectura Neutral
- Multihilo
- con Recolector de basura (Garbage Collector)
- Portable
- de Alto Rendimiento: sobre todo con la aparición de hardware especializado y mejor software
- Dinámico

4.9.2 ALGORITMOS

Existen distintas formas de definir lo que es un algoritmo en la programación, pero generalizando se puede decir que es un conjunto de instrucciones que especifican la secuencia ordenada de operaciones a realizar para resolver un problema, es decir funciona como método o una fórmula para la resolución de un problema. El algoritmo que se genere para una solución resulta independiente del lenguaje de programación en el que esté expresado y también es independiente de la computadora donde se pretenda ejecutar. Existen distintos métodos para expresar un algoritmo; uno de ellos es el pseudocódigo, una notación algorítmica de forma textual que puede llegar a ser muy parecida al lenguaje natural.

El diagrama de flujo es otra opción de representación de un algoritmo y es el método utilizado en esta tesis para representar la secuencia o lógica de los programas presentados. Este tipo de diagrama usa elementos gráficos (se muestran los cuatro elementos fundamentales en la Figura 11).

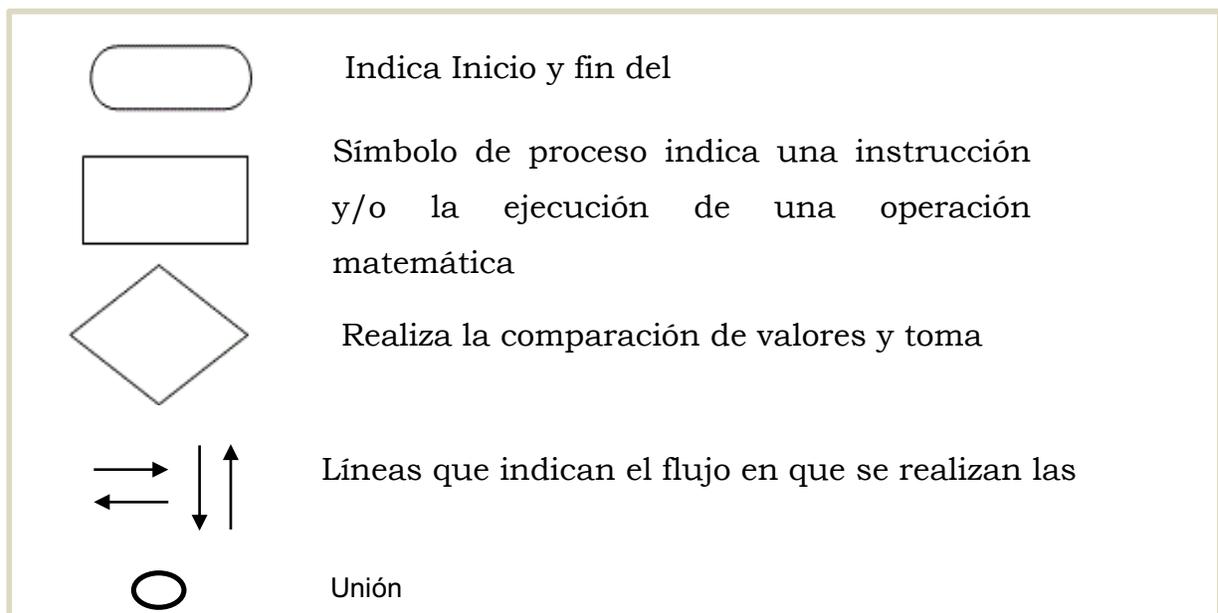


Figura 11. Simbología elemental para la representación de un algoritmo mediante un diagrama de flujo.

Esta representación tiene el inconveniente de que al aumentar el nivel de detalle del algoritmo aparece un gran número de líneas entrecruzadas que dificultan la comprensión del mismo, por lo que solo se usa en esta tesis para determinar el esquema general de un algoritmo.

4.10 AUTOMATIZACIÓN

Como tal el significado de la palabra automático, se puede definir como el grupo de métodos o bien de procedimientos para el remplazo del trabajador en tareas físicas y/o mentales previamente programadas. Entonces de la anterior definición se genera la de automatización, que se puede entender como la aplicación de lo automático al control de ciertos procesos. Los procesos industriales de hoy en día, están ampliamente ligados al campo de la ingeniería y a la creatividad humana, es decir, a la aplicación de los conocimientos científicos a la invención, diseño, perfeccionamiento y manejo de nuevos procedimientos. Por lo tanto, un proceso se entiende como la parte de un sistema en que, a partir de la entrada de ciertos materiales, energías, información (o datos sin proceso) y también de las combinaciones de estas, se genera un cambio sujeto a perturbaciones del entorno, que da a lugar a la salida de algún tipo de producto.

Los procesos industriales se pueden generalizar en tres distintos tipos, primero en los procesos continuos, segundo en procesos discretos y tercero en procesos por lotes (batch). Tal vez, el más relevante para esta tesis es el proceso continuo, pues se caracteriza por la salida del proceso en forma de flujo constante. El más claro ejemplo de esto son los métodos de generación de energía, recolección de agua pluviales o bien los métodos de purificación de agua. Actualmente en la industria existen diferentes maneras para poder llevar a cabo los procesos, primeramente mediante el

proceso manual (interacción humano máquina) que evidentemente resulta contradictorio, pues la automatización requiere de cierta independencia, segundo mediante el uso de computadoras de propósito general (o bien computadoras industriales) y tercero por medio de PLC (programmable logic controller) que esencialmente pueden ser vistas como computadoras dedicadas a procesos secuenciales, donde intervienen diferentes señales de entrada y salida.

Por lo tanto, la automatización contribuye al control automático de procesos y a relevar de cualquier tarea a los operarios, sin embargo, las industrias han optado por una semi-automatización con sistemas de control abierto, donde no se sustituya del todo la parte humana, sino que exista una cooperación entre operario y máquina.

4.10.1 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO ABIERTO

Un sistema de control puede ser entendido como el conjunto de dispositivos que actúan juntos para lograr un objetivo de control. En específico el control de lazo abierto se caracteriza porque la información o variables que controlan los procesos circulan en una sola dirección. Entonces son aquellos en los que la variable de salida (variable controlada) no tiene efecto sobre la acción de control.

Este sistema se caracteriza por lo siguiente:

- No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).
- Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.

- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

El control de lazo abierto suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en el que no hay una regulación de variables, sino que se realiza una serie de operaciones de manera determinada.

4.10.2 SISTEMAS DE CONTROL DE LAZO CERRADO

El control de lazo cerrado se identifica porque existe una realimentación a través de los sensores desde el proceso hacia el sistema de control, que permite a éste último conocer si las acciones ordenadas a los actuadores se han realizado correctamente sobre el proceso. Por lo tanto, son sistemas que mantienen una relación pre programada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, en si lo que se desea es mantener la salida constante a pesar de los cambios en las condiciones de operación, obsérvese la Figura 12. Como por ejemplo se asimila al dispositivo de captura de agua que se presenta en esta investigación, pues al tener variaciones constantes en el clima se pretende tener un flujo constante en la captura del líquido.

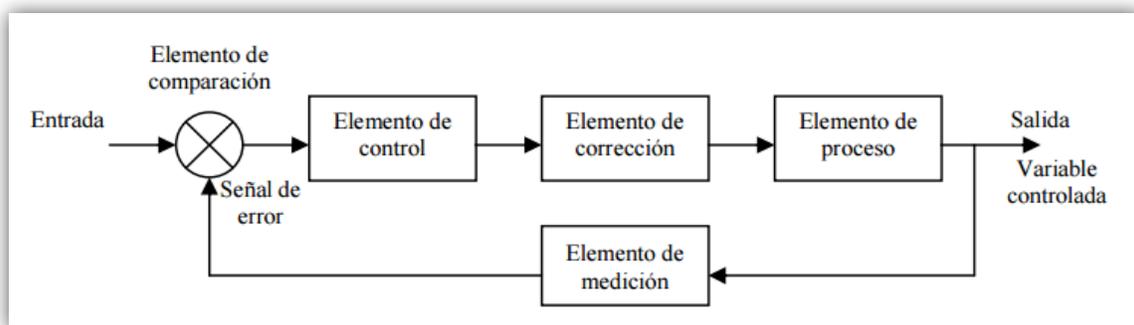


Figura 12. Diagrama general de un sistema de control de lazo cerrado

Fuente: elaboración propia del autor de tesis.

4.11 METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PRODUCTOS

Según Hernandis (1999), “La metodología del diseño ha sido una constante en la búsqueda de soluciones a través de la experiencia acumulada en el diseño de productos”. Esta es utilizada para buscar soluciones, las cuales pueden ser encontradas mediante diferentes métodos, por ejemplo: la lluvia de ideas, el análisis morfológico, analogías y el método Delfos. Todas estas metodologías permiten explorar la mente creativa del diseñador.

La teoría general de sistemas provee otra aproximación al diseño, y permite hacer frente a problemas de diferentes orígenes. Básicamente una metodología sistemática permite vincular los diferentes subsistemas mediante el uso de variables. Tradicionalmente dos alternativas de diseño, Top Down y Bottom up, han sido empleadas en el desarrollo de nuevos productos. En la metodología Top Down, el diseño comienza desde el nivel superior. Las especificaciones son definidas en términos del estado del sistema global y cada componente individual debe ser estimado con suficiente tiempo” de manera contraria funciona Bottom up.

4.11.1 TOP DOWN

Esta metodología es una estrategia para procesar información y conocimiento. Se emplea en diferentes áreas como: diseño de circuitos, desarrollo de productos, y de software. Este último es el campo que más se ha beneficiado de esta metodología, permitiendo desmenuzar los problemas en módulos que permiten que los programadores trabajen de manera más eficiente, ya que los programas al estar divididos son más fáciles de leer y así es posible identificar los errores. Además, se pueden reutilizar los módulos que sean comunes creando así programas modulares. Lo que permite ahorrar tiempo y dinero, además al

administrador del proyecto se le hace más fácil hacer seguimiento del progreso.

Una vez el programa está terminado el emplear Top Down hace más fácil el mantenimiento, ya que al presentar algún daño no se hace necesario cambiar todo el programa, por el contrario, la falla es fácilmente identificable, además de esto, solo es indispensable cambiar el módulo defectuoso. Entonces esta metodología está dirigida a varios campos, pero es ampliamente compatible con el desarrollo de software.

4.11.2 BOTTOM UP

Esta metodología, de acuerdo a Masi (2008), consiste en reunir diferentes sistemas que conformaran un todo. Los elementos individuales son especificados en gran detalle, los componentes se van uniendo unos con otros hasta conformar un sistema final, que se logra al llegar al nivel superior. Esta estrategia asemeja al modelo “semilla”, en el cual se parte de algo pequeño que va creciendo hasta llegar a un sistema terminado y complejo. Por lo tanto, esta metodología es la empleada para el desarrollo del dispositivo.

En el Bottom Up no se necesita tener una imagen clara del estado final del proyecto, sino que para empezar basta con una característica en particular. Es así como se van juntando las pequeñas piezas que luego conformaran un gran sistema, formado por sub sistemas. Esta metodología tiene sus desventajas, por ejemplo, se necesita mucha intuición para decidir la funcionalidad que se le va a dar a cada módulo. Por esto si se está trabajando con un sistema existente es más fácil desarrollar el proyecto que si se empieza desde cero.

Otros aspectos negativos que se deben de considerar son:

- La verificación a través del proceso se hace muy difícil, casi imposible una vez se está trabajando con grandes ensambles. Por lo que se debe invertir mucho tiempo en la revisión. Necesitándose tiempo adicional para encontrar el error y corregirlo.
- Al emplear un diseño Bottom Up, poca o ninguna exploración es hecha previamente, lo que hace que las mejoras posibles en el diseño sean obviadas.
- Cualquier error o problema que sea encontrado en el momento de ensamblar el sistema es más costoso de corregir, ya que involucra el rediseño de los bloques de diseño. Además los procesos deben ser desarrollados en serie, lo que genera que el tiempo para terminar el diseño sea más largo.
- El número de diseñadores que pueden ser empleados en el proceso de diseño Bottom Up, está limitado por la comunicación intensiva entre diseñadores y la naturaleza inherente de los pasos que se sigue. Además la comunicación necesaria requiere que los diseñadores estén localizados en el mismo espacio.
- No hay fluidez en esta metodología, lo que lleva a que el diseñador no esté seguro de que los bloques de diseño vayan a funcionar una vez este el diseño completo. Además esto solo se sabrá una vez se construya el prototipo, una etapa muy adelante en el proyecto.
- Sin canales de comunicación confiables los diseñadores usan especificaciones escritas o verbales que pueden estar incompletas o mal formuladas, las cuales se pueden olvidar a mitad del proyecto. La mala comunicación genera errores y la separación de bloques permite que los errores sean encontrados una vez finalizado el proyecto.

La forma de trabajar con esta metodología puede ser entendida mediante la Figura 13.



Figura 13. Diseño Bottom Up.

Este método se utiliza para el desarrollo de productos, e inicia con el diseño de cada uno de los componentes, este nivel se denomina inferior y se caracteriza porque las partes se modelan de manera independiente (a medida que se avanza en el producto, se pasa a los sub ensambles). Los errores cometidos son identificados en la última etapa del desarrollo, por esto para corregir se debe pasar por todos los niveles anteriores lo cual hace que esta actividad sea muy laboriosa.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 EXPERIMENTO

El estudio se realizó en dos fases. En la primera etapa, se realizó un prototipo con software de modelado 3D como se muestra en la Figura 14A, para propiciar el enraizamiento de los esquejes. La Figura 14C y 14D presenta el experimento colocado en una habitación cerrada con aire acondicionado para mantener condiciones estables de temperatura y humedad con la finalidad de comprobar la existencia de algún efecto visible dado que la mayoría de los experimentos reportados en la literatura, se enfocan hacia la etapa del crecimiento vegetativo y floración. Se aplicó luz led de color azul, rojo y la combinación azul-roja, por un periodo de 30 días durante las 24 horas. Se colocaron sensores de humedad en el sustrato para aplicar el riego cuando fuera necesario.

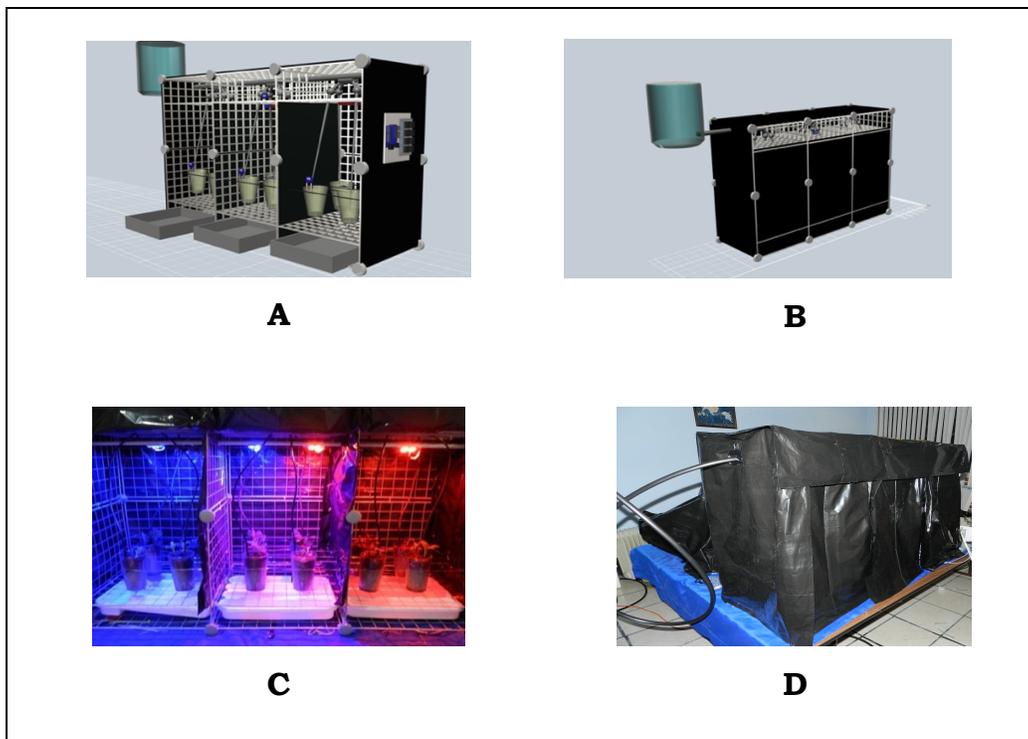


Figura 14. Prototipo de experimento controlado: A) Diseño 3D del interior del prototipo; B) Diseño 3D del exterior; C) Interior del experimento controlado; D) Ausencia de luz

El material empleado para la construcción del prototipo es el siguiente:

- Rejillas de aluminio de 30 x 30 cm. para formar la estructura principal.
- Forro de plástico negro para cubrir todo el prototipo
- Manguera, goteros (2-4 l/h), y un recipiente almacenador del agua para el riego.

5.2 EXPERIMENTO EN INVERNADERO

En la segunda fase, se instaló un experimento en un invernadero semi-tecnificado ubicado en la localidad de Tequexquinahuac, Municipio de Texcoco, en el Estado de México. Los esquejes se colocaron sobre camas de cemento como se muestra en la Figura 15A. Se colocaron lámparas led sobre los esquejes a una altura de 1 m como se muestra en la Figura 15B. El riego fue controlado por un microcontrolador Arduino®. Las condiciones de temperatura y humedad tuvieron variaciones de acuerdo a la hora del día y la estación del año, que, en este caso, fue invierno. La luz artificial se aplicó por las noches por periodos de 5 horas como complemento a las horas de luz natural.



Figura 15. A) Experimento en el invernadero. B) Iluminación dirigida con luz led

5.2.1 SUSTRATO

El enraizamiento de los esquejes se llevó a cabo en tezontle rojo, con granulometría de partículas de 2 a 10mm como se muestra en la figura 16.



Figura 16. Tezontle

La siguiente figura 17, muestra el proceso de desinfección del sustrato, que consistió en la inundación de las camas para enraizamiento por 24 horas, aplicando cloro en una proporción de medio litro por cada 10 litros de agua.



Figura 17. Desinfección del sustrato

Una vez que se desinfectó el medio de enraizamiento, se eliminó el agua de las camas para que, con ayuda de una tabla con clavos, como se muestra en la siguiente figura 18, se creara el espaciamiento de 1cm por lado para cada esqueje.



Figura 18. Espaciamiento del sustrato

5.2.2 MATERIAL VEGETATIVO

El material vegetativo consistió en esquejes enraizados de crisantemo variedad Snow Eleonora de aproximadamente 10 cm de longitud como se presenta en la Figura 19A. Los esquejes vegetativos se obtuvieron de plantas madres mantenidas bajo condiciones de día largo para inhibir la formación de botones finales. Se empleó Radix1500® para inducir la formación de raíces. Luego se introdujo cada esqueje, de 2 a 3 cm en el tezontle (Figura 19B). El riego que se aplicó cada 3 horas por un minuto. El periodo de enraizamiento consistió de 15 días.



Figura 19. A) Selección de esquejes; B) Colocación del esqueje en el sustrato

5.2.3 LUZ ARTIFICIAL

Se suministró luz artificial de un foco incandescente de 100 watts como tratamiento testigo ya que es la manera tradicional en que se cultiva la especie en la región. Se construyeron 3 lámparas con leds de colores rojo, azul, y la combinación de ambos colores. Cada lámpara consistió de 6 leds de potencia de 1 watt con las siguientes ondas: rojo: 610-640nm, azul:450-475nm y combinación de rojo-azul. Se construyeron cajas rectangulares de lámina (como se muestra en la Figura 20), para dirigir la luz proveniente de los leds hacia los esquejes. Las lámparas tienen dimensiones en su base cuadrangular de 10 cm. por lado con una altura de 30 cm.

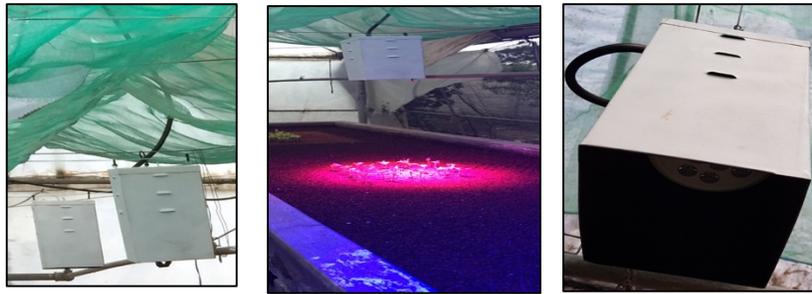


Figura 20. Lámparas de LEDs

5.3 MONITOREO AMBIENTAL Y AUTOMATIZACIÓN.

El monitoreo ambiental dentro del invernadero, representa un gran costo de inversión. Esta condición suprime las ventajas del monitoreo y control climático del invernadero, lo cual repercute en la cantidad y calidad de la producción. En el presente trabajo se presenta el desarrollo de un dispositivo tecnológico de bajo costo para el monitoreo ambiental dentro del invernadero. El dispositivo se basa en el uso de software y hardware libres, la construcción de interfaces electrónicas para capturar los valores de los sensores y el desarrollo de software para la

interpretación de los datos. Como plataformas de software y hardware libres se utilizaron Java y Arduino, respectivamente.

El monitoreo ambiental permitirá analizar los resultados del experimento a mayor detalle ya que se podrá observar si existen variaciones importantes del clima que pudieran afectar el desarrollo del cultivo.

5.3.1 HARDWARE

Para el desarrollo del hardware, se empleó el uso de la metodología Bottom UP, donde las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo. Una de las peculiaridades del trabajo con esta metodología es la cuestión del ensayo y error para la mejora del producto, lo que implica que el desarrollo a partir de una idea principal y su posterior mejora permite enfrentar el hardware y software elaborados a situaciones y problemáticas reales, por lo que es posible concluir el proyecto y reparar o solucionar los conflictos que surgen durante su desarrollo (Berón, 2006). El diagrama de la metodología se presenta en la Figura 21.

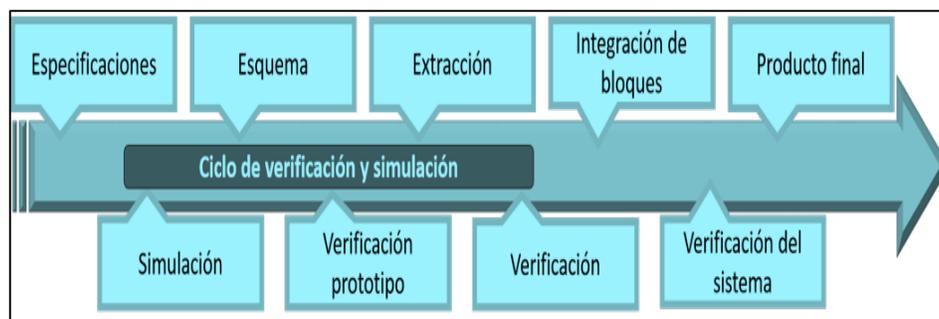


Figura 21. Metodología Bottom Up

El Hardware utilizado fue una placa de Arduino la cual como entradas tiene datos provenientes de sensores de temperatura y humedad ambiental. De salida encendido y apagado de luces y bomba (véase Figura 22).

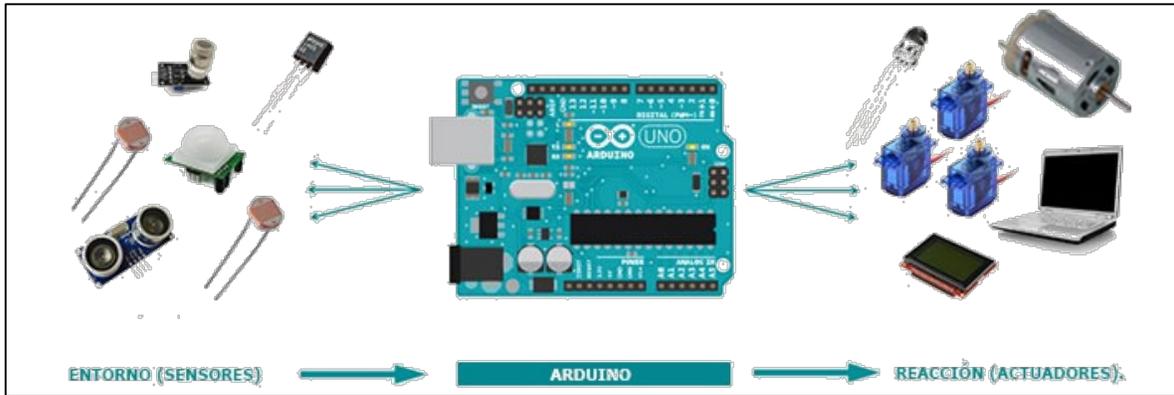


Figura 22. Entradas y Salidas de Arduino

En la Figura 23 se muestra las partes que componen la interfaz para programar Arduino, es una pantalla que tiene pocos componentes y funciones y es fácil y práctica de usar. El lenguaje de programación que utiliza es Processing el cual es muy similar a C++.

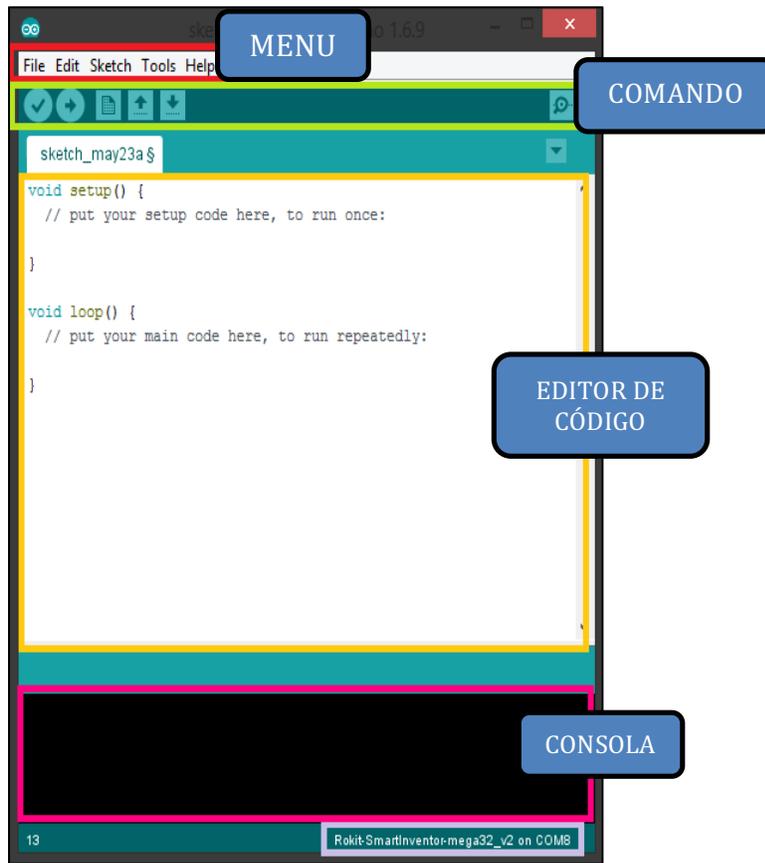


Figura 23. Pantalla de Software Arduino

5.3.2 SOFTWARE

Existen propuestas metodológicas que inciden en distintas dimensiones del proceso de desarrollo de software. Por una parte, existen propuestas tradicionales que se centran especialmente en el control del proceso, estableciendo rigurosamente las actividades involucradas, los artefactos que se deben producir, y las herramientas y notaciones que se usarán. Estas propuestas han demostrado ser efectivas y necesarias en un gran número de proyectos, pero también han presentado inconvenientes en muchos otros. Una posible mejora es incluir en los procesos de desarrollo más actividades, más artefactos y más restricciones, basándose en los puntos débiles detectados, sin embargo, el resultado final sería un proceso de desarrollo más complejo que puede incluso frenar el progreso del proyecto en lugar de agilizarlo. Otra filosofía es centrarse en otras dimensiones, como por ejemplo el factor humano o el producto software, este es el objetivo de las metodologías ágiles, las cuales dan mayor valor al individuo, a la colaboración con el cliente y al desarrollo incremental del software con iteraciones cortas. (Reingart, 2012)

Para el desarrollo de este trabajo se eligió la metodología Personal Software Process (PSP) por centrarse en la gestión del trabajo individual de los programadores (Von Kinsky, Ivins, & Robey), y es la base para la metodología Team Software Process encargada ya de coordinar un equipo de trabajo (Rodríguez Vazquez, 2013). Las etapas de la metodología, se ilustran en la Figura 24.

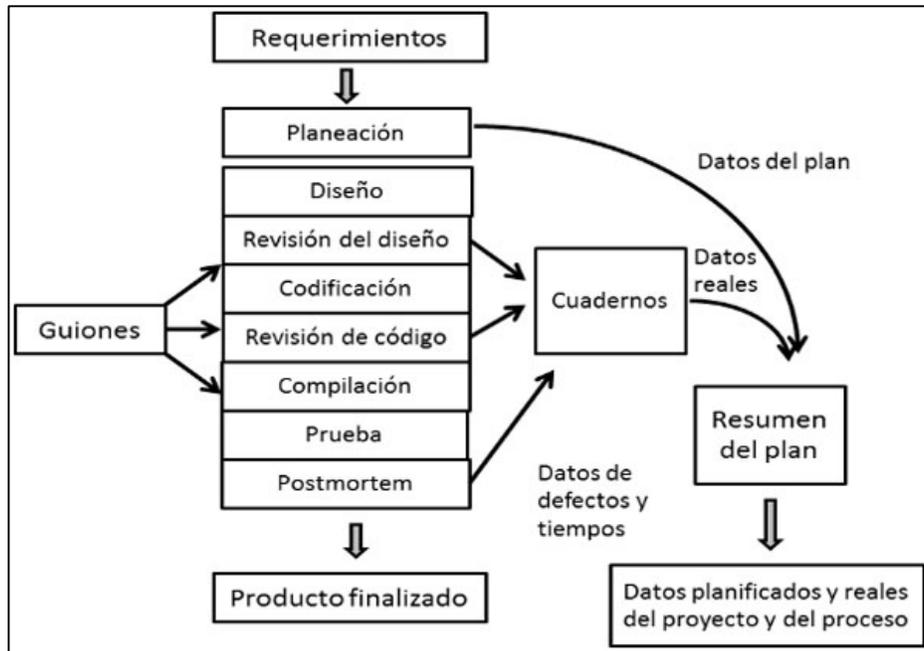


Figura 24. Flujo de procesos del Modelo PSP (Humphrey, W. S., 2005).

El software utilizado para diseñar y desarrollar las interfaces gráficas fue JAVA.

5.4 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con una muestra de 30 esquejes por tratamiento. El experimento estuvo conformado por 3 tratamientos de luz producto de tres longitudes de onda (rojo, azul, y la combinación rojo-azul) a través de lámparas leds, además de un tratamiento testigo con luz incandescente. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias mediante la prueba de Tukey para variables de altura y peso seco de raíz, con un nivel de significancia de 0.05. El software estadístico utilizado fue R®. Los datos registrados en el experimento para cada variable se determinaron en base a la diferencia de la longitud final del tallo respecto a la longitud inicial del tallo del esqueje.

5.5 MUESTREO

Para determinar la muestra aleatoria del experimento, se utilizó el complemento “Herramientas para análisis” de Excel®. La figura 25 muestra las opciones para seleccionar y activar el complemento.

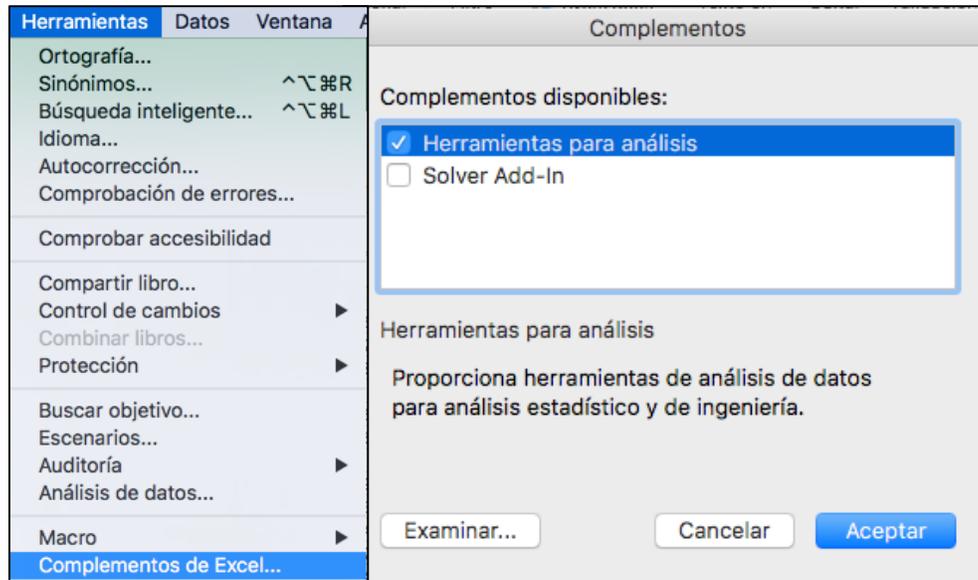


Figura 25. Activación del complemento “Herramientas para análisis” de Excel®

Se tenían 100 observaciones para cada tratamiento y se seleccionó una muestra de 30 observaciones para llevar a cabo las mediciones y el análisis estadístico. El siguiente cuadro 5, muestra los números aleatorios que se generaron con el software.

Cuadro 5. Datos aleatorios generados con Excel

Muestra	TESTIGO	AZUL	ROJO	R-A
1	11.32469886	80.2138179	94.63737732	60.40063549
2	31.48060856	62.5880976	67.15629402	20.8335153
3	9.891613648	51.35057785	90.16193375	81.62055955
4	76.74442248	95.50856455	50.44434044	6.029762552
5	89.21920588	77.1932907	16.63672942	61.51128357

6	86.14293317	52.27777106	31.49819008	61.08069884
7	76.30540989	43.02404935	33.19741883	9.018259884
8	24.89387598	41.37351371	12.64498537	94.26903823
9	7.725497621	77.4385237	79.26782925	35.40620817
10	7.140679123	49.39402717	74.41470059	44.8728754
11	20.41693101	37.35940757	65.56305886	72.33031364
12	58.58139224	46.45935504	53.38016849	46.49189455
13	6.271677014	96.0755678	76.0679462	11.97177263
14	65.58263524	5.350517296	58.14419269	24.44658942
15	47.82832423	93.64540922	20.39278736	27.57717245
16	94.53731335	61.62550914	25.93211442	67.04709542
17	66.53277639	35.37274734	38.76458163	21.32344585
18	27.1543887	17.81090805	94.93151342	53.94612499
19	54.52265181	42.2089468	94.76886687	92.34552287
20	52.20286052	59.47674929	46.72538752	69.58797086
21	3.02628501	99.77216983	32.85833569	52.04797383
22	30.29613413	54.12632687	14.17576277	82.0449511
23	81.49312076	13.88058909	71.0608004	6.872301426
24	92.77006217	59.43482664	35.13126272	39.13255335
25	67.82411839	57.95773599	58.66873174	29.37437077
26	6.049582341	26.33040928	29.18870935	53.63798158
27	23.55639833	35.38678793	76.74475883	2.161582369
28	20.7148674	94.77640531	21.04409472	84.09994246
29	68.73285094	85.02575376	85.84338602	66.78889247
30	82.91569973	64.16527808	42.82862006	15.6174077

Al redondear los números para obtener la parte entera de los aleatorios, se tiene el problema que existen repeticiones. El cuadro 6 que se muestra a continuación, presenta en color rojo, los números repetidos por cada tratamiento.

Cuadro 6. Datos redondeados (Repetidos con rojo)

N° MUESTRA	TESTIGO	AZUL	ROJO	R-A
1	11	80	95	60
2	31	63	67	21
3	10	51	90	82
4	77	96	50	6
5	89	77	17	62
6	86	52	31	61
7	76	43	33	9
8	25	41	13	94
9	8	77	79	35
10	7	49	74	45
11	20	37	66	72
12	59	46	53	46
13	6	96	76	12
14	66	5	58	24
15	48	94	20	28
16	95	62	26	67
17	67	35	39	21
18	27	18	95	54
19	55	42	95	92
20	52	59	47	70
21	3	100	33	52
22	30	54	14	82
23	81	14	71	7
24	93	59	35	39
25	68	58	59	29
26	6	26	29	54
27	24	35	77	2
28	21	95	21	84
29	69	85	86	67
30	83	64	43	16

Para obtener números aleatorios sin repetición, se utilizó la estrategia de la función de Jerarquía en Excel®. La jerarquía de un número es su tamaño en comparación con otros valores de la lista. Si se ordenara la lista, la jerarquía del número sería su posición.

La sintaxis de la función es: JERARQUIA (número, referencia, [orden])

Donde:

- Número (obligatorio): Es el número cuya jerarquía (clasificación) desea conocer.
- Referencia (obligatorio): Es una matriz de una lista de números o una referencia a una lista de números. Los valores no numéricos se pasan por alto.
- Orden (opcional): Es un número que especifica cómo clasificar el argumento número.

Si omite el argumento orden o es 0 (cero), Microsoft Excel determina la jerarquía de un número como si la lista definida por el argumento referencia se ordenara en forma descendente.

Si el argumento orden es diferente de cero, Microsoft Excel determina la jerarquía de un número como si la lista definida por el argumento referencia se ordenara en forma ascendente.

A continuación, el cuadro 7 muestra los números de muestra generados para cada tratamiento.

Cuadro 7. Datos aleatorios con la función JERARQUIA

Nº MUESTRA	TESTIGO	AZUL	ROJO	R-A
1	54	63	48	77
2	57	89	5	68
3	97	41	55	45
4	17	61	1	78
5	7	2	65	33
6	18	54	90	48
7	41	36	10	50
8	91	81	98	27
9	36	22	82	55
10	39	38	41	80
11	14	43	71	83
12	77	60	28	30
13	49	91	22	64
14	30	93	96	87
15	83	35	27	51
16	70	100	36	35
17	72	28	60	92
18	81	85	78	20
19	67	76	56	91
20	31	37	49	52
21	100	11	33	94
22	25	7	62	47
23	29	18	92	65
24	85	55	11	90
25	75	90	45	63
26	13	9	80	75
27	16	80	54	4
28	84	50	4	15
29	74	99	91	57
30	64	27	87	36

Para validar la aleatoriedad de los datos, se realizó la prueba de rachas. El contraste de rachas permite verificar la hipótesis nula de que la muestra es aleatoria, es decir, si las sucesivas observaciones son independientes. Este contraste se basa en el número de rachas que presenta una muestra.

Una racha se define como una secuencia de valores muestrales con una característica común precedida y seguida por valores que no presentan esa característica. Así, se considera una racha la secuencia de k valores consecutivos superiores o iguales a la media muestral (o a la mediana o a la moda, o a cualquier otro valor de corte) siempre que estén precedidos y seguidos por valores inferiores a la media muestral (o a la mediana o a la moda, o a cualquier otro valor de corte).

El número total de rachas en una muestra proporciona un indicio de si hay o no aleatoriedad en la muestra. Un número reducido de rachas (el caso extremo es 2) es indicio de que las observaciones no se han extraído de forma aleatoria, los elementos de la primera racha proceden de una población con una determinada característica (valores mayores o menores al punto de corte) mientras que los de la segunda proceden de otra población. De forma idéntica un número excesivo de rachas puede ser también indicio de no aleatoriedad de la muestra.

Si la muestra es suficientemente grande y la hipótesis de aleatoriedad es cierta, la distribución muestral del número de rachas, R , puede aproximarse mediante una distribución normal de parámetros:

$$\mu_R = \frac{2n_1n_2}{n} + 1 \quad \sigma_R = \sqrt{\frac{2n_1n_2(2n_1n_2 - n)}{n^2(n - 1)}}$$

donde n_1 es el número de elementos de una clase, n_2 es el número de elementos de la otra clase y n es el número total de observaciones.

$$Z = \frac{R + c - \mu_R}{\sigma_R}$$

donde $c = 0,5$ si $R < \mu_R$ y $c = -0,5$ si $R > \mu_R$.

Para llevar a cabo la prueba de rachas, se utilizó la librería “tseries” en R®. La hipótesis nula se rechazará tanto si existen muchas rachas como si hay muy pocas.

Las figuras 26, 27, 28 y 29, muestran la ejecución de la prueba para los tratamientos del testigo, azul, rojo y rojo-azul respectivamente.

```
> library("tseries")
> x<-
c(54,57,97,17,7,18,41,91,36,39,14,77,49,30,83,70,72,81,
67,31,100,25,29,85,75,13,16,84,74,64)
> x
 [1] 54 57 97 17 7 18 41 91 36 39 14 77
[13] 49 30 83 70 72 81 67 31 100 25 29 85
[25] 75 13 16 84 74 64
> runs.test(as.factor(x>median(x)))

Runs Test

data:  as.factor(x > median(x))
Standard Normal = -0.74322, p-value = 0.4573
alternative hypothesis: two.sided
```

Figura 26. Selección aleatoria del testigo

```

> library("tseries")
> x<-
c(63,89,41,61,2,54,36,81,22,38,43,60,91,93,35,100,28,85
,76,37,11,7,18,55,90,9,80,50,99,27)
> x
 [1] 63 89 41 61  2 54 36 81 22 38 43 60
[13] 91 93 35 100 28 85 76 37 11  7 18 55
[25] 90  9 80 50 99 27
> runs.test(as.factor(x>median(x)))

Runs Test

data:  as.factor(x > median(x))
Standard Normal = 1.4864, p-value = 0.1372
alternative hypothesis: two.sided

```

Figura 27. selección aleatoria del azul

```

> library("tseries")
> x<-
c(48,5,55,1,65,90,10,98,82,41,71,28,22,96,
27,36,60,78,56,49,33,62,92,11,45,80,54,4,9
1,87)
> x
 [1] 48  5 55  1 65 90 10 98 82 41 71 28
[13] 22 96 27 36 60 78 56 49 33 62 92 11
[25] 45 80 54  4 91 87
> runs.test(as.factor(x>median(x)))

Runs Test

data:  as.factor(x > median(x))
Standard Normal = 0.74322, p-value
= 0.4573
alternative hypothesis: two.sided

```

Figura 28. Selección aleatoria del rojo

```

> library("tseries")
> x<-
c(77,68,45,78,33,48,50,27,55,80,83,30,64,8
7,51,35,92,20,91,52,94,47,65,90,63,75,4,15
,57,36)
> x
 [1] 77 68 45 78 33 48 50 27 55 80 83 30
[13] 64 87 51 35 92 20 91 52 94 47 65 90
[25] 63 75  4 15 57 36
> runs.test(as.factor(x>median(x)))

Runs Test

data:  as.factor(x > median(x))
Standard Normal = 0.74322, p-value
= 0.4573
alternative hypothesis: two.sided

```

Figura 29. selección aleatoria del rojo-azul

Las salidas del procedimiento indican, puesto que $p > 0.05$, que no existen evidencias para considerar los datos no aleatorios.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 EXPERIMENTO EN HABITACIÓN

El experimento en habitación, tuvo la finalidad de observar la existencia del crecimiento en la etapa de enraizamiento de los esquejes, sin las condiciones naturales de luz solar. La Figura 30 muestra la estructura de metal donde se colocaron los esquejes. Se aplicó riego por nebulización por lapsos de 5 minutos, cada 6 horas para mantener húmedo el ambiente y favorecer el crecimiento de la planta.



Figura 30. Experimento en habitación cerrada.

Para impedir el paso de luz solar proveniente del medio ambiente, se forró la estructura por fuera con plástico de color negro. En su interior, se colocó plástico de color blanco para reflejar el color proveniente de los LEDs. La Figura 31 que se presenta a continuación, presenta un acercamiento del experimento inicial con los tratamientos de color azul (imagen de la izquierda), rojo-azul (imagen central) y color rojo (imagen de la derecha).



Figura 31. Tratamientos con luz LED.

En la Figura 32, se aprecia las diferencias en la longitud del tallo y raíz. Como resultados preliminares, la combinación de luz led rojo-azul propicio a el desarrollo de una mayor elongación del tallo, así también como en la parte radical del esqueje. Los esquejes expuestos en presencia de luz de tonalidad roja mostraron una menor longitud del tallo y de raíz en comparación a la combinación de luz rojo-azul, sin embargo, hubo mayor abundancia de raíz. Por último, la luz azul no favoreció a la altura de la planta, ni al desarrollo de raíz.

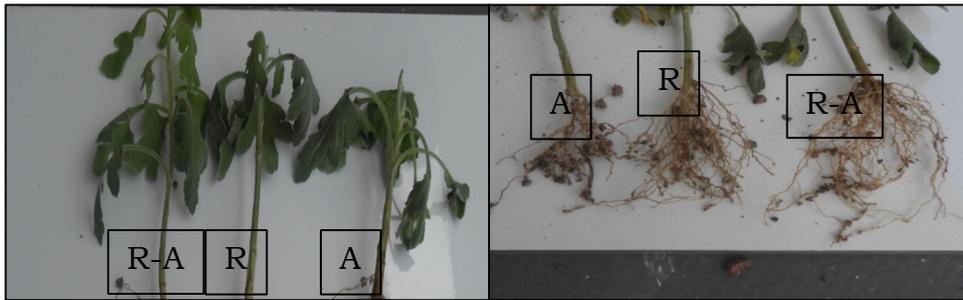


Figura 32. Esquejes cultivados con luz led color R-A(rojo y azul), R(rojo), A(azul); Izquierda: parte vegetativa del crisantemo; Derecha: parte radicular del crisantemo.

6.1.1 MONITOREO AMBIENTAL Y CONTROL

Se construyó un dispositivo electrónico para registrar los datos ambientales en tiempo real por medio de sensores. El dispositivo está basado en el microcontrolador Arduino cuya plataforma integra una placa electrónica con salidas y entradas tanto analógicas como digitales, y su propia interfaz con un lenguaje de programación semejante a C++®.

Arduino permite la integración de otras placas electrónicas conocidas como Shields, para aumentar las capacidades del microcontrolador, por ejemplo, agregar puertos digitales, tarjetas de memoria SD (Secure Digital), comunicación inalámbrica, entre otras.

El primer prototipo se muestra en la Figura 33. El microcontrolador Arduino® se colocó en un contenedor de plástico para protegerlo de la intemperie. Se agregó un Shield SD para poder almacenar los datos provenientes de los sensores de temperatura y humedad relativa del aire.

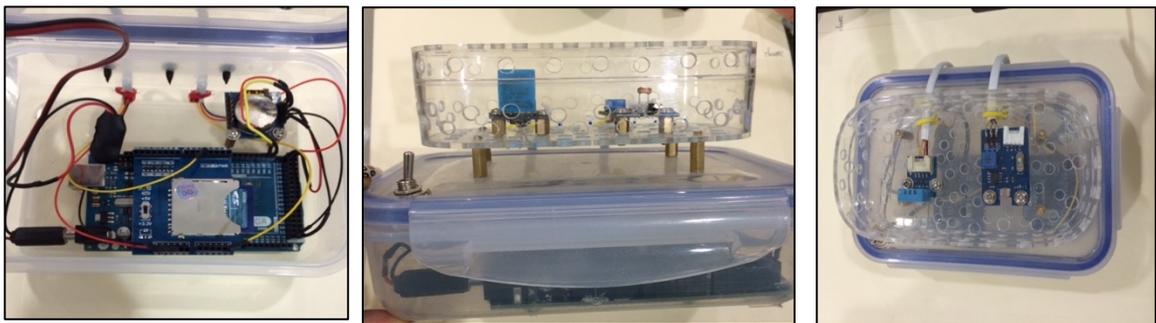


Figura 33. Primer prototipo de monitoreo

El archivo que genera Arduino se trata de un archivo de texto plano, el cual puede ser interpretado por software de hojas de cálculo y generar el análisis requerido.

La figura 34 que se muestra a continuación, presenta una gráfica ejemplo generada mediante el software de Excel® con los datos obtenidos en la habitación.

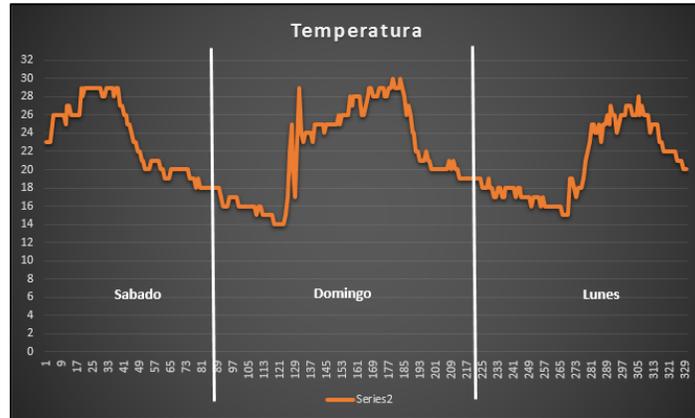


Figura 34. Datos procesados con Excel®

6.1.2 SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Se utilizó un sensor DTH11 (ver Figura 35) para capturar los valores de temperatura y humedad relativa. El sensor genera una señal analógica y, por lo tanto, los datos tienen que ser procesados de acuerdo al fabricante *DFRobot* (<http://www.dfrobot.com/index.php>) mediante las siguientes fórmulas:

$$Val = 1024 - x$$

$$R = \frac{54 * Val}{1024 - Val}$$

$$\ln R = \log (R)$$

$$\ln R^2 = \log (\ln R)$$

$$Temperatura = \frac{1}{(0.00237531) + (0.00024632 * \ln R) + (0.00000028 * \ln R^2)} - 273$$

Dónde: X es el valor obtenido por el sensor y Val representa el valor entero máximo que tiene un puerto analógico con una resolución de 10 bits, esto significa que se convertirán tensiones de voltaje entre 0 y 5

voltios a un número entero entre 0 y 1024. El valor obtenido tras aplicar la formula será en grados Celsius (símbolo °C).

El sensor DHT11 funciona también como indicador de humedad relativa hacia el microcontrolador. De igual manera, los datos arrojados por el sensor, necesitan ser procesados por Arduino con las siguiente formula.

$$Humedad = \frac{X * 5}{\frac{3.3}{10.2}}$$

Donde el valor de X representa el dato arrojado por el sensor DHT11. Las unidades que arrojará la formula serán en porcentaje, es decir de 0% a 100%.

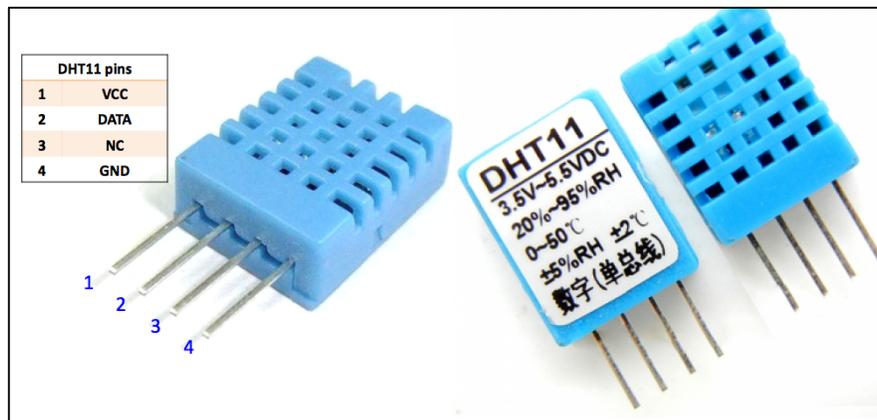
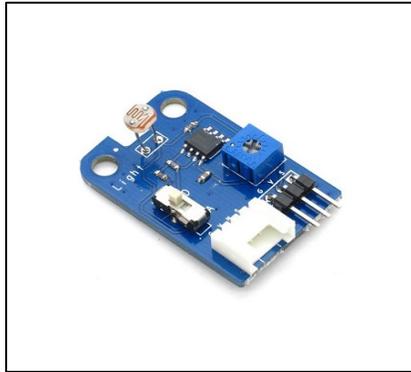


Figura 35. Sensor de Temperatura y humedad relativa

6.1.3 SENSOR DE LUZ

El módulo de sensor de luz (Figura 36A) utiliza un fotorresistor para detectar la intensidad de la luz. La resistencia del sensor disminuye cuando la intensidad de la luz aumenta.

Un LDR (Resistor Dependiente de la Luz) es un resistor que varía su valor de resistencia eléctrica dependiendo de la cantidad de luz que incide sobre él. Se le llama, también, fotorresistor o fotorresistencia (ver Figura 36B). El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (en algunos casos puede descender a tan bajo como 50 ohms) y muy alto cuando está a oscuras, llegando a ser de varios megaohms



A



B

Figura 36. A) módulo sensor de luz ;B) fotorresistencia

Una vez que se comprobó el funcionamiento correcto del prototipo, se almacenaron los componentes en un contenedor de plástico con mayor resistencia para colocarlo de manera directa en el invernadero. La Figura 37 que se muestra a continuación, muestra el dispositivo final que se colocó en el invernadero.



Figura 37. Lector de condiciones ambientales

6.2 EXPERIMENTO EN CAMPO

Al constatar la existencia del fenómeno de la fotomorfogénesis en los esquejes de Crisantemo, el experimento se colocó en invernadero para tener las condiciones climatológicas a las cuales se somete el cultivo de manera cotidiana. La figura 38 que se presenta a continuación, muestra la colocación de los esquejes sobre las camas de cemento y las lámparas de LEDs colocadas en la parte superior de las plántulas.



Figura 38. Experimento en campo

En la Figura 39A se aprecian imágenes de la parte foliar y 39B la parte radical del esqueje expuesto en los diferentes tratamientos.



Figura 39. Esquejes cultivados en invernadero con luz led color B(blanca), R-A(rojo-azul), A(azul), R(roja); A), Área foliar; B) parte radical.

Los datos obtenidos de la longitud del tallo durante el periodo de enraizamiento se muestran a continuación en la Cuadro 8.

Cuadro 8. Datos de la longitud del tallo en un periodo de 15 días

No muestra	Testigo			Rojo-Azul			Rojo			Azul		
	Long fin	Long ini	diff	Long fin	Long ini	diff	Long fin	Long ini	diff	Long fin	Long ini	diff
1	6.6	6	0.6	7.2	6	1.2	7.1	6.2	0.9	6.8	6.5	0.3
2	7	6.3	0.7	7	6	1	7	6	1	6.8	6.5	0.3
3	7.3	6.7	0.6	8	6.8	1.2	7.2	6.3	0.9	6.9	6.5	0.4
4	7.3	6.7	0.6	7	6	1	6.8	5.9	0.9	7.4	7.1	0.3
5	7.3	6.7	0.6	8	6.8	1.2	7.5	6.6	0.9	7.3	6.9	0.4
6	7.2	6.6	0.6	7.4	6.2	1.2	7.7	6.7	1	6.7	6.5	0.2
7	7.2	6.6	0.6	8.2	7.1	1.1	7.8	6.8	1	7	6.7	0.3
8	7.5	6.9	0.6	7.4	6.4	1	7.4	6.5	0.9	6.5	6.1	0.4
9	7.4	6.7	0.7	7.6	6.5	1.1	7.2	6.2	1	6.7	6.5	0.2
10	7.2	6.6	0.6	7.6	6.7	0.9	7	6	1	7.4	7	0.4
11	7.2	6.5	0.7	7.5	6.5	1	7.6	6.8	0.8	7.1	6.7	0.4
12	7.3	6.5	0.8	7.8	6.7	1.1	7.1	6.3	0.8	6.6	6.3	0.3
13	7.2	6.5	0.7	7.4	6.4	1	7.5	6.6	0.9	6.5	6.2	0.3
14	7.5	6.8	0.7	7.5	6.6	0.9	6.8	6	0.8	6.8	6.5	0.3
15	7.2	6.5	0.7	7.5	6.5	1	7.8	7	0.8	7	6.6	0.4
16	7.5	6.8	0.7	7.9	6.7	1.2	7.4	6.6	0.8	6.9	6.5	0.4
17	7	6.4	0.6	7.4	6.4	1	7.7	6.7	1	6.8	6.5	0.3
18	7.6	6.8	0.8	7.8	6.7	1.1	7.2	6.4	0.8	7.2	6.8	0.4
19	6.7	6	0.7	7.4	6.4	1	6.9	6.2	0.7	6.4	6.1	0.3
20	7.4	6.8	0.6	7	6.1	0.9	7.4	6.4	1	6.7	6.4	0.3
21	7.2	6.6	0.6	8	7	1	7.5	6.6	0.9	6.8	6.5	0.3
22	6.4	5.7	0.7	8	6.8	1.2	7.4	6.5	0.9	6.9	6.5	0.4
23	7.6	7	0.6	7.3	6.3	1	7.4	6.6	0.8	6.3	5.9	0.4
24	7.5	6.8	0.7	7	6	1	7.6	6.8	0.8	6.7	6.4	0.3
25	7.5	6.7	0.8	7.6	6.5	1.1	7	6.2	0.8	6.4	6	0.4
26	6.7	6	0.7	7.4	6.4	1	7	6	1	6.8	6.4	0.4
27	7.4	6.7	0.7	7.4	6.4	1	7.2	6.3	0.9	6.4	6.1	0.3
28	6.8	6	0.8	7.6	6.5	1.1	7.2	6.5	0.7	6.5	6.2	0.3
29	7.3	6.6	0.7	7.5	6.5	1	7.6	6.6	1	6.5	6.2	0.3
30	7.5	6.8	0.7	7.2	6.3	0.9	6.8	5.9	0.9	6.5	6.3	0.2
Media	7.22	6.54	0.67	7.52	6.47	1.05	7.29	6.41	0.89	6.78	6.45	0.33
Desviación Estándar	0.31	0.31	0.069	0.33	0.29	0.10	0.30	0.30	0.09	0.30	0.28	0.07
Varianza	0.10	0.10	0.005	0.11	0.08	0.01	0.09	0.09	0.01	0.09	0.08	0.004

El análisis de varianza es una técnica que se usa para probar hipótesis acerca de las medias de diferentes tratamientos que se ensayan (Daniel 1984). Para que esto sea posible, las medias que se determinan tienen que provenir de mediciones sobre muestras independientes, pues si las mediciones se hacen sobre la misma muestra deben utilizarse técnicas que contemplen mediciones repetidas.

Cuando el análisis de varianza se utiliza para analizar los datos de un experimento de un solo factor, la primera etapa es comprobar si hay significancia del factor (tratamientos) que se estudió. Si no hay significancia, un análisis posterior es innecesario.

De acuerdo con González (2008), procede reportar la no significancia e indicar que no hay evidencia para concluir que los tratamientos ensayados provocan diferencia en el promedio observado para la variable de interés. Cuando se tienen dos muestras y se desea comprobar si difieren significativamente (si proceden de la misma población con una única media) se utiliza la t de Student. Cuando se tiene más de dos grupos, se utiliza el análisis de varianza.

Se usará el análisis de la varianza (ANOVA) para contrastar la hipótesis nula de que las medias de distintas poblaciones coinciden. Para este caso, se tienen 4 tratamientos y el contraste a realizar sería:

H_0 : Las varianzas de todos los tratamientos son iguales

H_1 : Al menos una varianza es diferente.

Nivel de significancia: 0.05

El cuadro 9 contiene los datos que resultan de la diferencia entre la longitud final del tallo y la longitud inicial. Con estos datos se procedió a realizar la prueba de análisis de varianzas y Tukey.

Cuadro 9. Datos para análisis estadístico

N° Muestra	Blanco	Rojo-Azul	Roja	Azul
1	0.6	1.2	0.9	0.3
2	0.7	1	1	0.3
3	0.6	1.2	0.9	0.4
4	0.6	1	0.9	0.3
5	0.6	1.2	0.9	0.4
6	0.6	1.2	1	0.2
7	0.6	1.1	1	0.3
8	0.6	1	0.9	0.4
9	0.7	1.1	1	0.2
10	0.6	0.9	1	0.4
11	0.7	1	0.8	0.4
12	0.8	1.1	0.8	0.3
13	0.7	1	0.9	0.3
14	0.7	0.9	0.8	0.3
15	0.7	1	0.8	0.4
16	0.7	1.2	0.8	0.4
17	0.6	1	1	0.3
18	0.8	1.1	0.8	0.4
19	0.7	1	0.7	0.3
20	0.6	0.9	1	0.3
21	0.6	1	0.9	0.3
22	0.7	1.2	0.9	0.4
23	0.6	1	0.8	0.4
24	0.7	1	0.8	0.3
25	0.8	1.1	0.8	0.4
26	0.7	1	1	0.4
27	0.7	1	0.9	0.3
28	0.8	1.1	0.7	0.3
29	0.7	1	1	0.3
30	0.7	0.9	0.9	0.2

A continuación, en el cuadro 10 y 11 se muestran la salida de Excel y R correspondientes al Análisis de la varianza con los datos del cuadro 9.

Cuadro 10. Resultados de análisis de varianza realizada con Excel

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	30	20.2	0.673333333	0.004781609		
Columna 2	30	31.4	1.046666667	0.009471264		
Columna 3	30	26.6	0.886666667	0.008781609		
Columna 4	30	9.9	0.33	0.004241379		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8.638916667	3	2.879638889	422.298497	3.0978E-62	2.682809
Dentro de los grupos	0.791	116	0.006818966			
Total	9.429916667	119				

Cuadro 11. Resultados de análisis de varianza realizada con R

```

      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
datos$COLOR  3  8.639  2.8796  422.3 <2e-16 ***
Residuals  116  0.791  0.0068
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

El cuadro 10 es la salida básica de un Análisis de la Varianza: a través de los datos que se muestran, se conoce si realmente existe una relación de dependencia entre variables objeto de estudio o no. En los cuadros 10 y 11 se muestra el valor calculado del estadístico F y su nivel de significancia. El nivel de significancia nos va a permitir aceptar o rechazar la hipótesis

nula (independencia entre las variables) sin necesidad de tener que comparar el valor de la F con su valor real de las tablas estadísticas.

El valor que nos sirve de referencia a la hora de aceptar o rechazar la hipótesis nula es el nivel de significancia. Si el nivel de significancia es mayor que 0.05, se acepta la hipótesis nula de independencia entre las variables, esto quiere decir que no existen diferencias entre los tratamientos. Si el nivel de significancia es menor que 0.05 se rechaza la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa, es decir, concluiremos que existe una relación de dependencia entre las variables.

En este caso, dado que el valor de significancia es $2e^{-16}$ valor muy cercano a cero, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe diferencia significativa entre los tratamientos.

Los tratamientos de luz, muestran diferencias estadísticas significativas en las variables evaluadas del crisantemo variedad Snow Eleonora.

En el análisis de varianza aplicado a la variable crecimiento de longitud de tallo, se encontraron diferencias significativas entre las medias para cada tratamiento.

El test HSD (diferencia honestamente significativa) desarrollado por Tukey realiza comparaciones entre medias (de dos en dos) pero fijando la tasa de error tipo 1 en alpha.

Excel no tiene ninguna función predeterminada para hallar este valor, por lo que tendremos que recurrir a su fórmula para llevar a cabo el cálculo.

Modelo equilibrado:

$$HSD_{\text{Tukey}} = q_{\alpha, GL, K} \sqrt{MC_{\text{error}}/n}$$

Donde:

q= valor crítico de la tabla de rango studentizado con α en función de confianza; g.l. de la MC_{error} y k que es el número de grupos o niveles del análisis de varianza.

MC_{error} = media cuadrática del error

n= tamaño de cada grupo

Aproximación para modelos no equilibrados:

$$HSD_{Tukey} = q_{\alpha, GL, K} \sqrt{MC_{error} / n'}$$

Donde:

$$n' = \frac{k}{\left(\frac{1}{n_1}\right) + \left(\frac{1}{n_2}\right) + \dots + \left(\frac{1}{n_k}\right)}$$

Se rechaza H_0 -las dos medias son iguales- si la diferencia, en valor absoluto, entre las dos medias que se comparan es igual o mayor que:

$$HSD_{Tukey} | \bar{Y}_i - \bar{Y}_j | \geq HSD_{Tukey}$$

Cuadro 12. Resultado de la prueba de Tukey en Exel

	testigo	rojo-azul	rojo	azul
testigo		-0.37	-0.21	0.34
rojo-azul	0.37		0.16	0.72
rojo	0.21	-0.16		0.56
azul	-0.34	-0.72	-0.56	

Donde:

HSD= Se obtuvo del Multiplicador*(\sqrt{mse}) / n

Multiplicador= se obtuvo de tablas con el grado de libertad que se obtuvo en ANOVA= 116 y el número de tratamientos=4

HSD= 0.05563204 multiplicador*(\sqrt{mse}) / n

Multiplicador= 3.69 (tablas de valores críticos de Tukey)

Mse= 0.006818966

n= 30

Posteriormente para sacar el valor del cuadro 12 en la relación testigo con rojo-azul se hace una diferencia de medias respectivamente. Se dice que si el valor que salga es mayor en valor absoluto al HSD calculado se rechaza la hipótesis nula.

Cuadro 13.Resultado de Tukey en R

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = datos$CRECIMIENTO ~ datos$COLOR)

$`datos$COLOR`
      diff      lwr      upr p adj
BLANCO-AZUL  0.3433333 0.2877559 0.3989108  0
RA-AZUL      0.7166667 0.6610892 0.7722441  0
ROJO-AZUL    0.5566667 0.5010892 0.6122441  0
RA-BLANCO    0.3733333 0.3177559 0.4289108  0
ROJO-BLANCO  0.2133333 0.1577559 0.2689108  0
ROJO-RA     -0.1600000 -0.2155775 -0.1044225  0
  
```

Al contrastar los tratamientos mediante la prueba de Tukey, se tiene como resultado que el tratamiento con base en luz led color rojo-azul posee diferencias significativas respecto a los otros tratamientos seguido del tratamiento con luz led color rojo, ambos tuvieron incrementos de crecimiento del 55% y 32% respectivamente respecto al testigo; sin embargo, el tratamiento con luz azul presenta un decremento en el crecimiento. En la Figura 40 se pueden observar de manera gráfica los resultados de los tratamientos realizados en este experimento, y se puede concluir que hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Mostrando mejor respuesta el tratamiento de luz LED combinada rojo-azul.

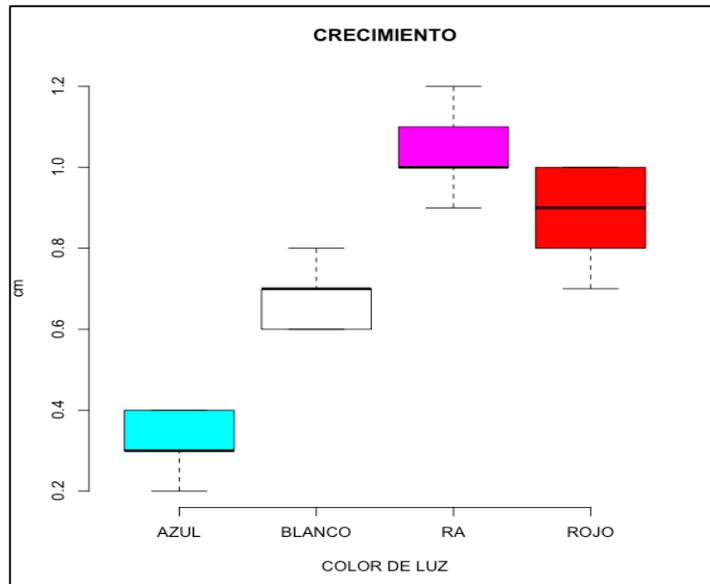


Figura 40. Resultados de medias en crecimiento del tallo

La Figura 41 que se muestra a continuación, presenta de manera gráfica el crecimiento de tallo de acuerdo a los tratamientos aplicados.

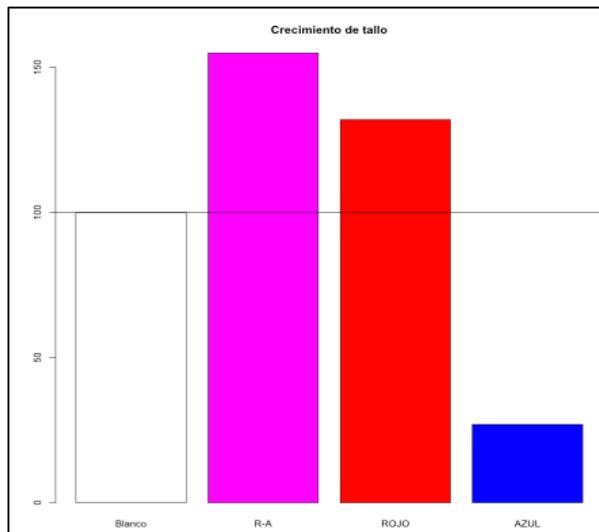


Figura 41. Crecimiento de tallo

Los datos de peso seco se presentan a continuación en la Cuadro 14.

Cuadro 14. Peso seco de raíz (g)

Nº muestra	Blanco	Rojo-Azul	Rojo	Azul
1	0.105	0.1058	0.1598	0.0753
2	0.1239	0.1453	0.134	0.096
3	0.125	0.1814	0.1387	0.0865
4	0.148	0.1758	0.1402	0.1696
5	0.1754	0.1467	0.1357	0.1114
6	0.1511	0.1854	0.0981	0.0652
7	0.1279	0.1242	0.0967	0.0536
8	0.1071	0.1652	0.0755	0.0734
9	0.1474	0.1219	0.1363	0.0527
10	0.1401	0.0961	0.1265	0.1172
11	0.0627	0.1528	0.1679	0.1132
12	0.1237	0.1275	0.147	0.146
13	0.1262	0.1431	0.0451	0.1129
14	0.1564	0.1579	0.1028	0.1437
15	0.0687	0.1121	0.1219	0.1384
16	0.1112	0.1678	0.1564	0.1688
17	0.1231	0.1267	0.0855	0.081
18	0.1458	0.1348	0.0738	0.1
19	0.1059	0.133	0.1184	0.0972
20	0.0924	0.0836	0.1831	0.1462
21	0.1442	0.1256	0.0986	0.0815
22	0.165	0.1436	0.1103	0.1576
23	0.1323	0.1253	0.1132	0.0612
24	0.093	0.1537	0.0972	0.135
25	0.1229	0.1489	0.0875	0.1563
26	0.1265	0.1965	0.1365	0.0546
27	0.145	0.1432	0.1459	0.0843
28	0.1465	0.1256	0.1125	0.1247
29	0.1578	0.1876	0.1487	0.04312
30	0.1145	0.1564	0.1567	0.1257

Cuadro 15. Resultados de Análisis de Varianza en Excel

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Columna 1	30	3.8147	0.127156667	0.000698824
Columna 2	30	4.2935	0.143116667	0.000738986
Columna 3	30	3.6505	0.121683333	0.000997272
Columna 4	30	3.17232	0.105744	0.001408575

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.021400107	3	0.007133369	7.423522169	0.000136379	2.682809407
Dentro de los grupos	0.111466065	116	0.000960914			
Total	0.132866172	119				

Cuadro 16. Resultados de análisis de varianza en R

```

Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
datos$COLOR 3 0.0214 0.007133 7.424 0.000136 ***
Residuals 116 0.1115 0.000961
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
    
```

El cuadro 16 es la salida básica de un Análisis de la Varianza: a través de los datos que muestra se sabe si realmente existe una relación de dependencia entre variables objeto de estudio o no. En los cuadros 15 y 16 se muestra el valor calculado del estadístico F y su nivel de significancia.

En este caso, dado que el valor de significancia es 0.000136, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, existe diferencia significativa entre los tratamientos.

Los tratamientos de luz, muestran diferencias estadísticas significativas en las variables evaluadas del crisantemo variedad Snow Eleonora.

En el análisis de varianza aplicado a la variable peso seco de la raíz, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

Cuadro 17. Resultado de prueba de Tukey en Excel

	testigo	rojo-azul	rojo	azul
testigo		-0.016	0.005	0.021
rojo-azul	0.016		0.021	0.037
rojo	-0.005	-0.021		0.016
azul	-0.021	-0.037	-0.016	

Cuadro 18. Resultado de prueba de Tukey en R

```

Tukey multiple comparisons of means
 95% family-wise confidence level

Fit: aov(formula = datos$PESOSECO ~ datos$COLOR)

$`datos$COLOR`
      diff      lwr      upr    p adj
BLANCO-A  0.021412667  0.0005494184  0.0422759149 0.0419196
RA-A      0.037372667  0.0165094184  0.0582359149 0.0000480
ROJO-A    0.015939333 -0.0049239149  0.0368025816 0.1971497
RA-BLANCO 0.015960000 -0.0049032482  0.0368232482 0.1961786
ROJO-BLANCO -0.005473333 -0.0263365816  0.0153899149 0.9030657
ROJO-RA   -0.021433333 -0.0422965816 -0.0005700851 0.0416390
  
```

Las pruebas de Tukey se pueden apreciar en el cuadro 17 y 18; se encontraron diferencias significativas entre las medias para cada tratamiento y la prueba de comparación de medias de Tukey concluyó que existen diferencias significativas entre los tratamientos.

El tratamiento que presenta incremento en el peso seco con respecto al testigo es la combinación rojo-azul con 12%. Los tratamientos de LEDs rojos y azules (independientes) presentan un decremento del 4% y 16% respectivamente. Los tratamientos de luz LED color rojo y blanca no tuvieron diferencias significativas entre ellos. La Figura 42 que se muestra a continuación, presenta de manera gráfica el peso seco de acuerdo a los tratamientos aplicados.

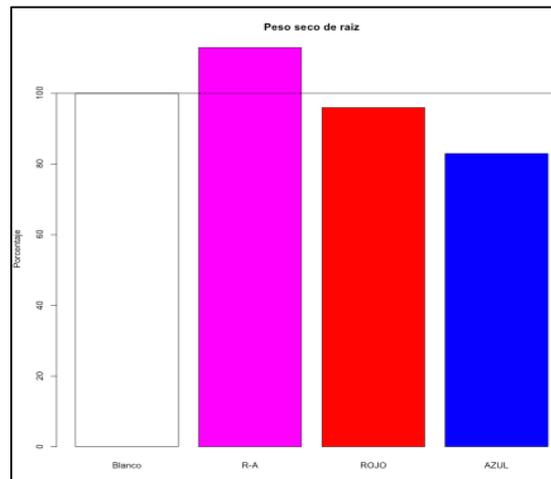


Figura 42. Peso seco de las raíces

En la Figura 43 se observa de manera gráfica los resultados de las medias de los tratamientos realizados en este experimento.

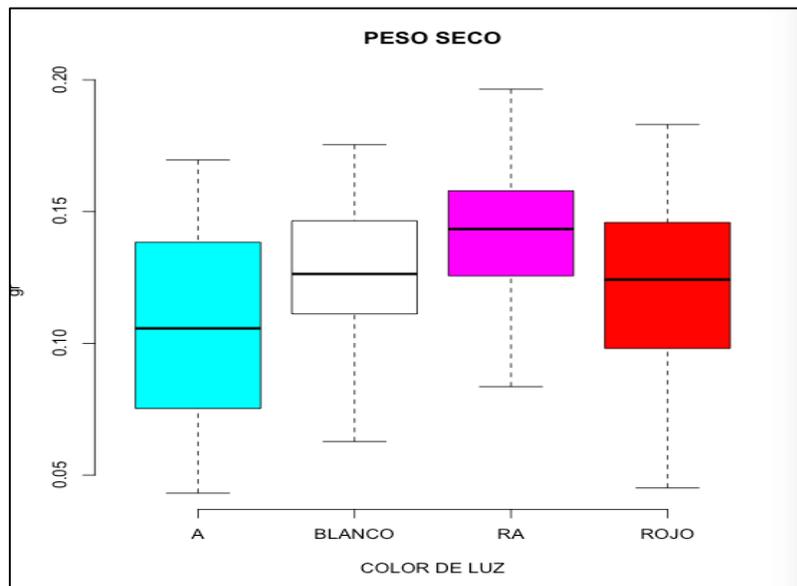


Figura 43. Resultados de medias de peso seco

Cada especie reacciona de manera diferente a los estímulos de luz y los resultados varían de acuerdo a la etapa de estudio. En la etapa de enraizamiento, los colores azul y rojo se manejan de manera independiente, tienen resultados contrarios, el rojo favorece su crecimiento mientras que el azul lo perjudica. Sin embargo, las combinaciones de ambos colores traen consigo mejores resultados en comparación con el color rojo y la luz blanca tradicional que se obtiene de los focos incandescentes.

Las condiciones climatológicas inciden de manera directa en el crecimiento, sin embargo, el tener espacios controlados como lo son los invernaderos, permiten recrear el ambiente ideal para el aprovechamiento de los nutrientes por parte de la planta para generar calidad y crecimiento.

6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

El archivo de texto que genera el microcontrolador Arduino®, se puede interpretar con un software de hojas de cálculo, sin embargo, se requiere tiempo y conocimiento en el manejo del software para obtener los resultados deseados. Por lo anterior, se desarrolló un software para que, con solo seleccionar el archivo de datos, se procese la información generando graficas de datos y colocando los datos en un formato de Excel® para poder ser exportados y analizados de otra manera, si así se requiere. La Figura 44 que se muestra a continuación, presenta la pantalla principal del software.

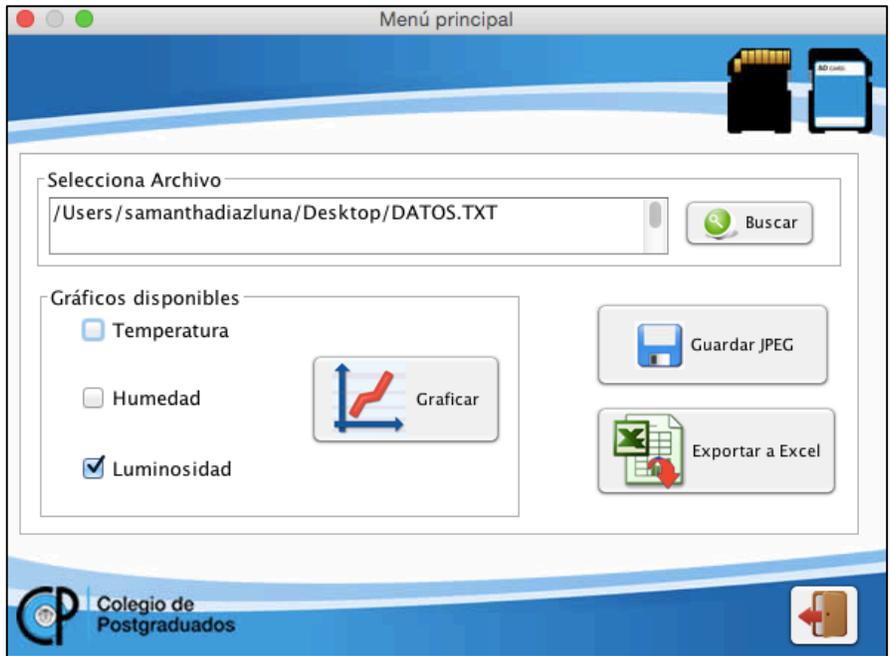


Figura 44. Software para procesar los datos ambientales

La Figura 45 muestra un ejemplo de las gráficas que se generan de manera automática. El usuario selecciona las variables que desea consultar (temperatura, humedad relativa y luminosidad) y el software procesa la información.

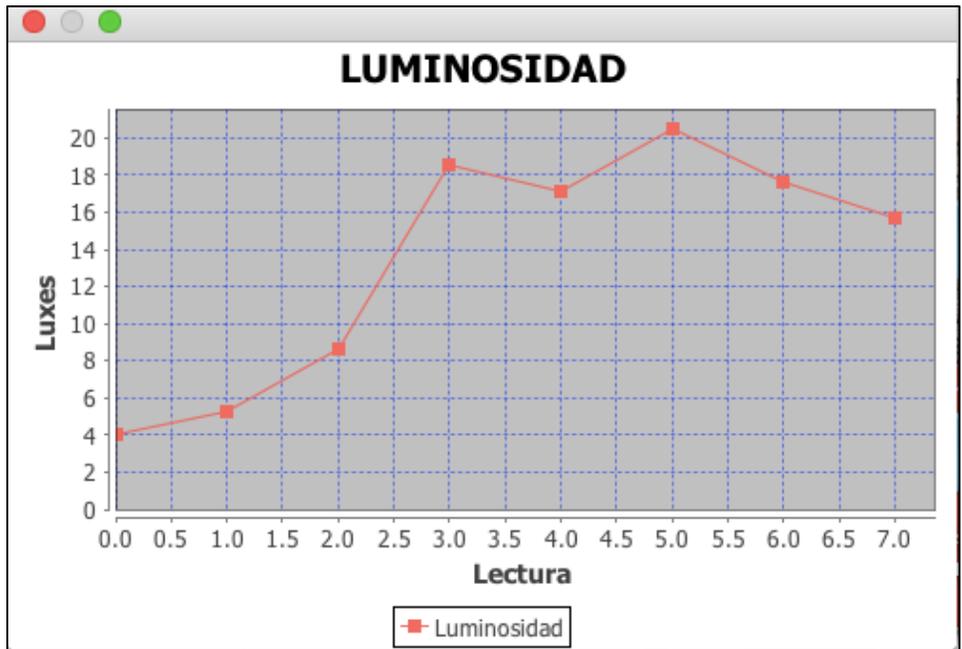


Figura 45. Gráficas generadas por el software.

6.4 SOFTWARE DE CONTROL

Los puertos de comunicación de una computadora, al igual que la placa Arduino®, operan con corrientes y tensiones muy bajas, por este motivo, son incapaces de controlar aparatos electrónicos que funcionan en corrientes y tensiones altas como por ejemplo una bomba de agua que utiliza 220 voltios. La solución para este problema, fue utilizar un relé.

La Figura 46 presenta la interconexión general de los componentes donde la tarjeta Arduino® funciona como interfaz principal para poder obtener los datos provenientes de los sensores, y accionar los dispositivos de control, la bomba de agua y las lámparas led.

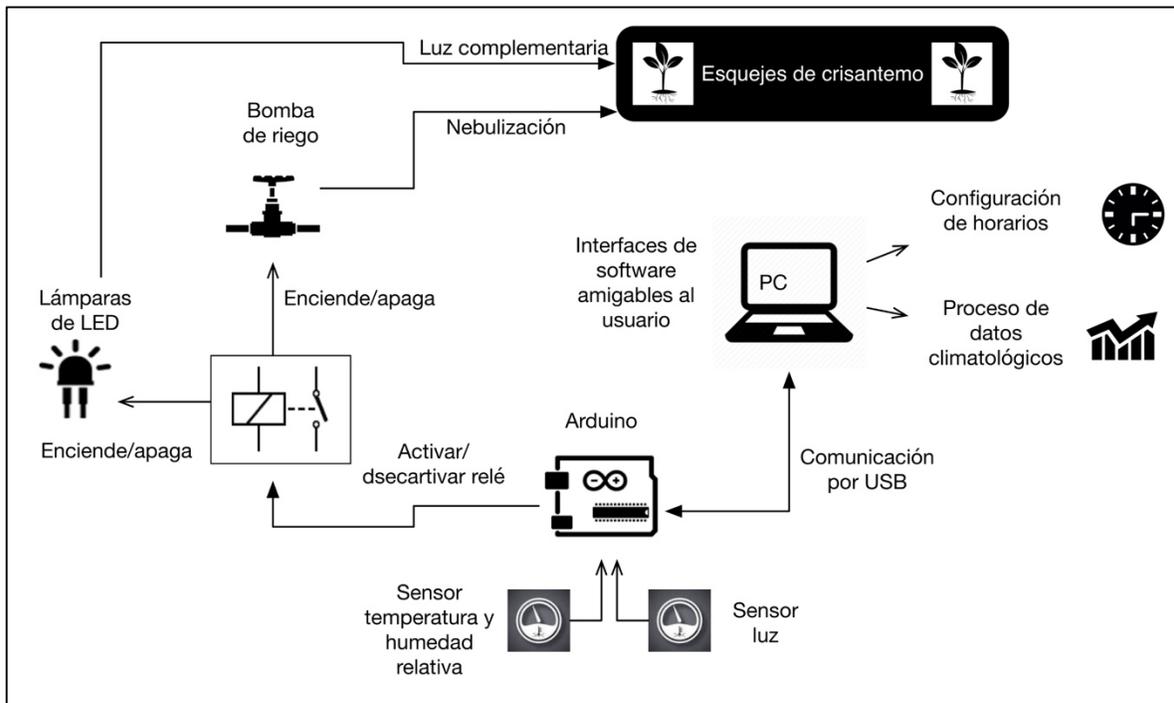


Figura 46. Diagrama de conexión de componentes.

En la figura 47 se observa con imágenes la manera en que quede comprendido el proyecto de Tesis.

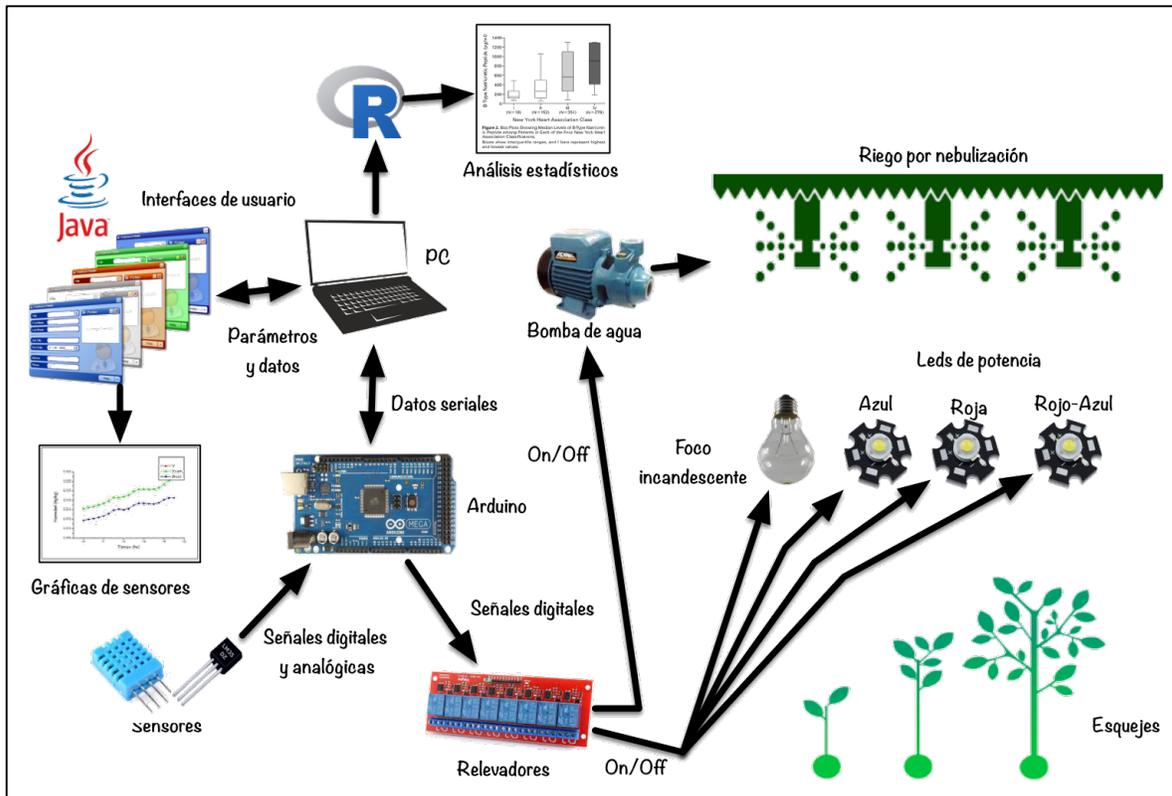


Figura 47. Esquema general del proyecto de Tesis

Hay módulos de 1, 2, 4 y 8 relés disponibles en el mercado. La selección del módulo depende de la cantidad de dispositivos que se desea controlar. En la Figura 48 se puede apreciar el circuito esquemático de un canal, el resto de los canales repite la misma configuración.

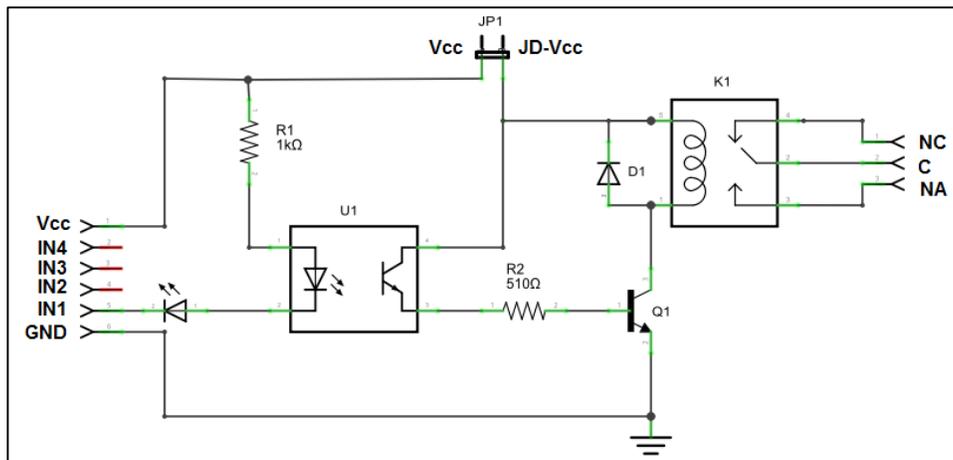


Figura 48. Circuito esquemático de un relé

En la siguiente Figura 49, se aprecia la conexión del módulo de 8 relés con la placa Arduino®.

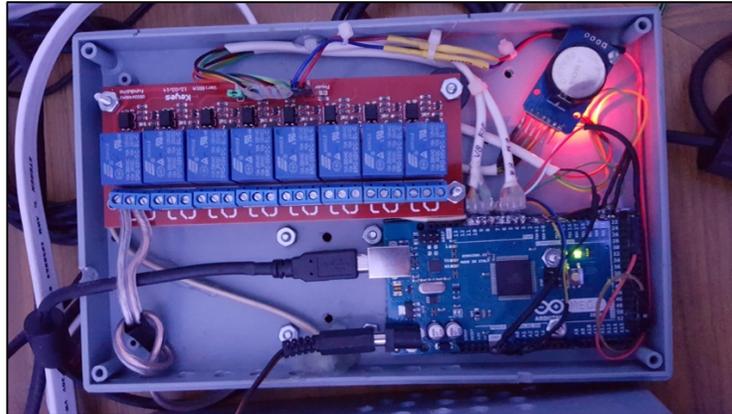


Figura 49. Relés para accionar lámparas y bomba de riego

Se desarrolló un software *ad hoc* con una interfaz amigable para el usuario para poder a) monitorear los sensores de luz, humedad relativa y temperatura; como se muestra en la Figura 50, por otro lado, permite accionar de manera manual el encendido de bombas y luz en caso de requerirlo, y b) configurar los horarios de encendido tanto de la bomba de riego como de las luces como se ilustra en la Figura 51.

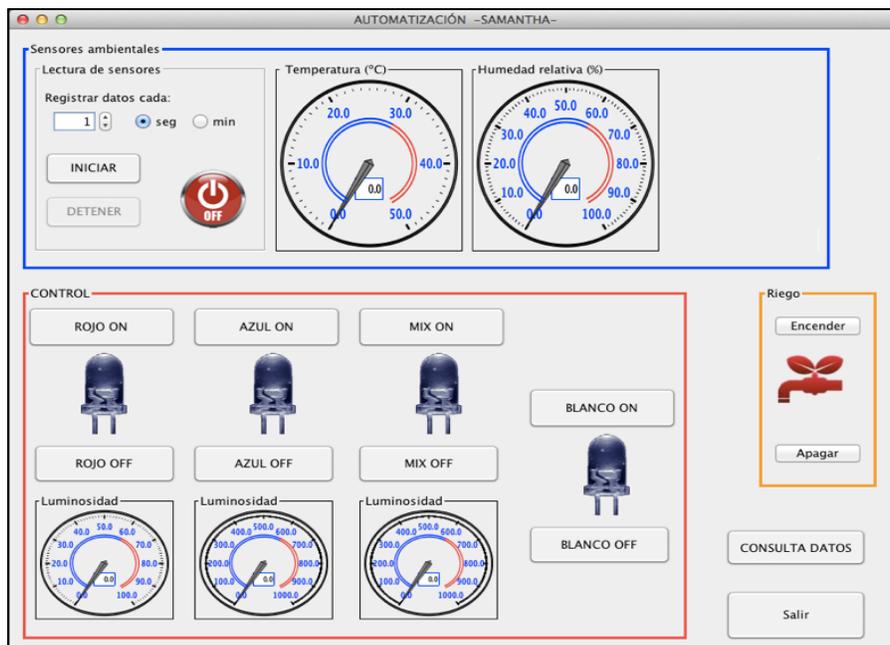


Figura 50. Pantalla principal del software de control.



Figura 51. Configuración de horarios.

6.5 AUTOMATIZACIÓN DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO

La interfaz de línea de comandos o interfaz de línea de órdenes (en inglés, command-line interface, CLI) es un método que permite a los usuarios dar instrucciones a algún programa informático por medio de una línea de texto simple.

R posee una línea de comandos llamada R Shell que permite ejecutar de forma automatizada, instrucciones contenidas en un script.

La línea de comando de R permite: automatizar scripts en R, integrar R embebido en otros lenguajes de programación, llamar a R a través de otras herramientas o sistemas informáticos. Hay dos comandos Linux que se utilizan para este objetivo: el comando RScript y el comando R CMD BATCH.

El formato para ejecutar el shell de R es el siguiente:

en Linux

```
R CMD BATCH [opciones] script.R [archivoSalida]
```

en Windows

```
"C:\Program Files\R\R-2.13.1\bin\R.exe" CMD BATCH  
--vanilla --slave "c:\script.R"
```

La Figura 52 muestra el diagrama de flujo con la interacción entre la plataforma Arduino®, Java® y el software estadístico R®. De esta manera, el usuario se libera de la necesidad de aprender un lenguaje de comandos como lo es R® y puede llevar a cabo análisis estadísticos de manera automatizada. R® es una herramienta gratuita que posee robustez y rapidez comparables a softwares estadísticos comerciales.

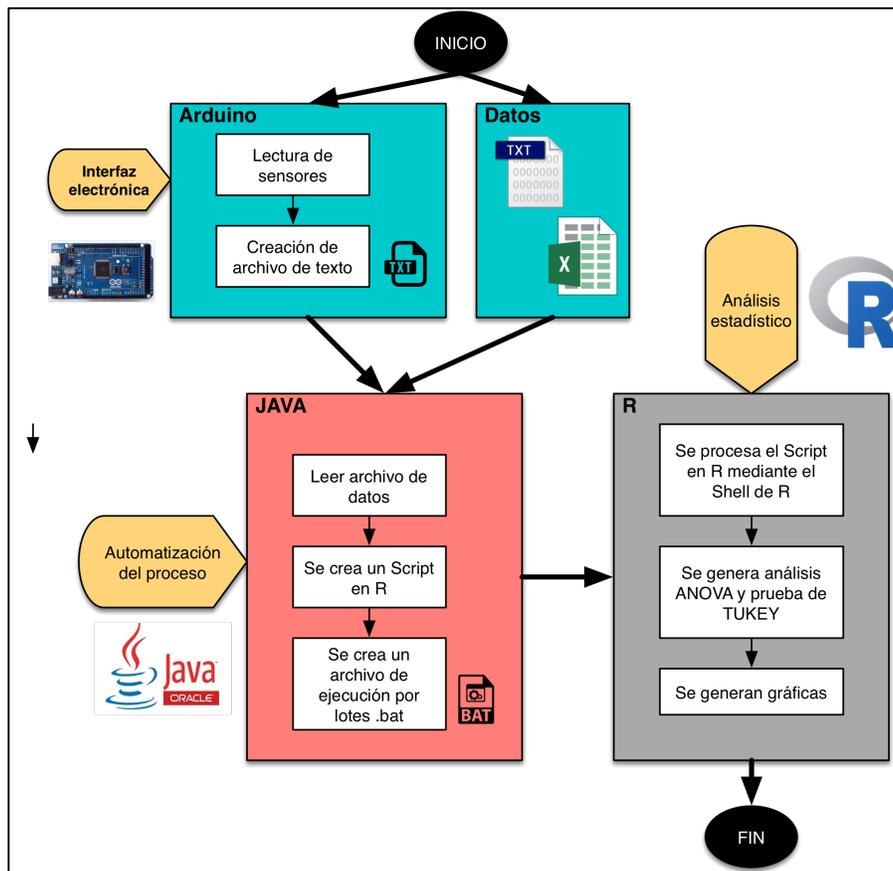


Figura 52. Automatización del análisis estadístico

6.6 EXPERIMENTOS PREVIOS Y SUS DIFICULTADES

El primer experimento se realizó diseñando y construyendo un prototipo en un lugar aislado de la luz solar, donde la temperatura y humedad ambiental fueron constantes. Se utilizaron vasos de plástico transparente para el enraizamiento del crisantemo variedad Snow Eleonora. Se utilizó riego por goteo. Resultados: en 20 días, las plantas no mostraron aparición de raíz, en 30 días se observó ligera presencia de raíz menor a 3 mm (ver figura 53).



Figura 53. Experimento inicial

Se repitió el experimento con el prototipo diseñado, pero, se reemplazó los vasos por charolas de plástico de 30 cm. x 20 cm.(ver figura 54A). El sistema de riego fue por nebulización (Porque de esta manera, la plántula queda húmeda). La iluminación se aprecia en la Figura 54B. El experimento tuvo un tiempo de duración de 30 días donde se observó crecimiento radicular y vegetativo.



Figura 54. Experimento fase dos

La tercera repetición del experimento se llevó a cabo en un invernadero ubicado en Tequexquihuac, Estado de México. El riego fue por nebulización. Las lámparas fueron construidas con leds de alta potencia, sin embargo, la luz se dispersaba a las plantas aledañas, por lo que fue necesario buscar una manera de aislarla, para ello se colocaron barreras con plástico negro. Este experimento no tuvo resultados debido a que los caracoles se comieron las plantas. (ver figura 55A y 55B).

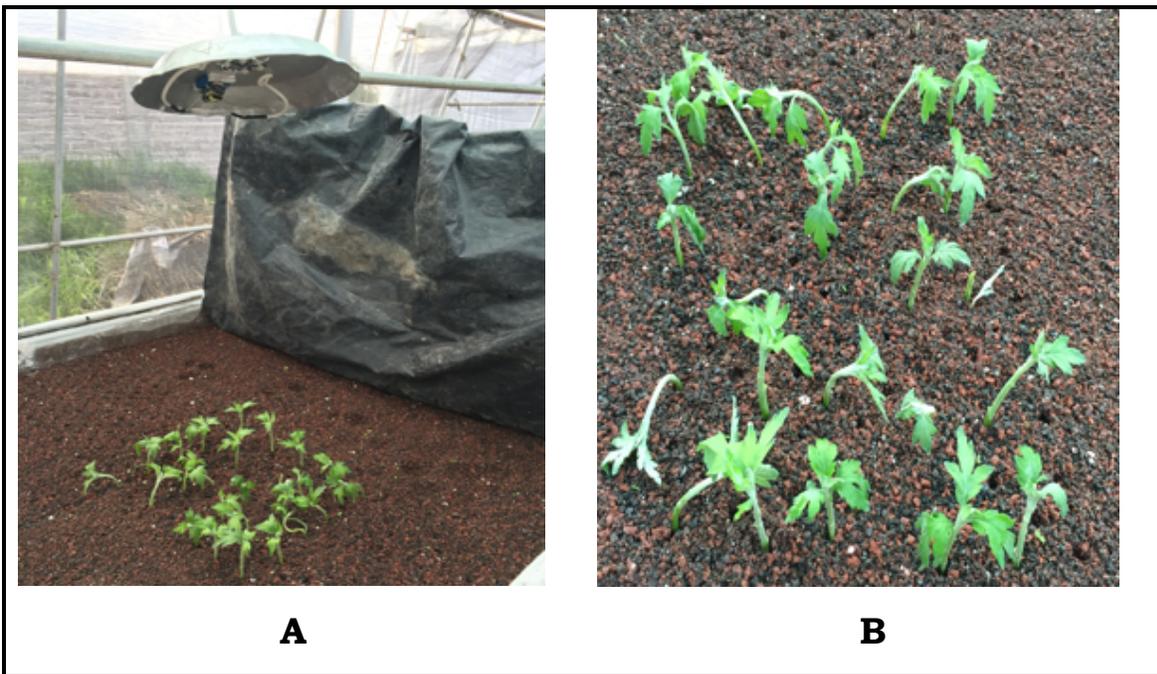


Figura 55. Primer experimento en invernadero

El experimento en invernadero se repitió por cuarta vez. Se colocó una malla de acero sobre las plántulas para evitar que el cultivo fuera atacado por los caracoles (ver figura 56).



Figura 56. Experimento con malla

En este experimento, se presentó marchitez y stress hídrico en las plantas, por lo que fue necesario retirar la malla. La malla no permitía que la nebulización llegara de manera directa a las plantas.

En un quinto experimento, la malla de acero fue colocada a la orilla de la cama (ver figura 57), sin embargo, las lámparas por encima de los esquejes y la malla alrededor, tampoco permitía un riego adecuado. El resultado fue que la gran parte de las plantas se perdieron, y muy pocas lograron sobrevivir, sin embargo, a simple vista tenían hojas muy marchitas y manchadas, los troncos eran muy delgados y débiles, y apenas se podía ver brote de raíz.



Figura 57. Experimento con malla a la orilla de la cama

El experimento se repitió por sexta vez, sin embargo, debido a condiciones extremas del clima (lluvia y viento fuerte), se rompió el techo del invernadero provocando con ello que los rayos del sol penetraran directamente a las plantas; aunado a esto, ocurrió una helada muy fuerte lo que propicio que más de la mitad de las plantas se perdieran (ver figura 58).



Figura 58. Techo de invernadero

Para poder ejecutar el experimento final, se tuvo que reparar el techo del invernadero para aislar las condicionales ambientales dentro del invernadero. Se colocó un químico a un costado de las camas de cemento para evitar que los caracoles se comieran las plántulas. Se retiró la malla de acero para permitir una correcta aplicación del riego por nebulización.

En total, el experimento en el prototipo se repitió dos veces, y en el invernadero, cinco veces. Para conseguir el esqueje entre cada experimento, se tuvo que dejar pasar el periodo de floración para que después del corte, se obtuviese los nuevos esquejes provenientes de la planta madre.

Dos y tres meses fue el tiempo que se tenía que esperar para volver a repetir el experimento. En este lapso de tiempo, se aprovechó para hacer ajustes al hardware y software.

7. CONCLUSIONES

Los resultados de la investigación comprueban la existencia del fenómeno de fotomorfogénesis en la etapa de enraizamiento para esquejes de Eleonora.

Los tratamientos de luz LED en comparación con focos incandescentes presentan mayor elongación de tallo y desarrollo de raíz de esquejes en etapa de enraizamiento.

El mejor tratamiento de luz complementaria resultó ser la combinación de colores rojo y azul. Con este tratamiento, se incrementaron la longitud del tallo en un 55% y el peso seco de la raíz en un 12% en comparación a la luz generada por el foco incandescente.

El peor tratamiento de luz complementaria en la etapa de enraizamiento, resultó ser el color azul, ya que redujo el crecimiento en las dos variables analizadas. Este tratamiento muestra un decremento con respecto al testigo, en la longitud del tallo en un 62% y el peso seco de la raíz en un 16%.

La combinación sensores-Arduino-software posibilita la automatización del riego y encendido de luces para tener eficiencia en la aplicación de tratamientos. El software permite configurar los tiempos de encendido y apagado en los diferentes tratamientos, evitando la reprogramación del microcontrolador de Arduino.

8. RECOMENDACIONES

Los puntos de interés derivados del presente estudio que podrían estudiarse más a fondo son los siguientes:

1) *Experimentación en la fase de crecimiento vegetativo de crisantemo variedad Snow Eleonora:* Evaluar la longitud y diámetro del tallo del crisantemo variedad Snow Eleonora con el complemento de luz LED de alta potencia con diferentes longitudes de onda azul, rojo y combinación rojo-azul, teniendo como testigo luz blanca proveniente de un foco incandescente.

2) *Monitoreo y control ambiental.* Automatización con herramientas libres para disminuir costos. Generar el ambiente idóneo para el crecimiento de las plantas: Desarrollo de software para el monitoreo y control del invernadero (abrir y cerrar cortinas del invernadero, activar luz, medir temperatura, entre otros).

3) *Experimentación con otras variedades de flores:* Implementar la luz LED de alta potencia con diferentes longitudes de onda azul, rojo, combinación rojo-azul con otras variedades de flores que dependan del fotoperiodo para su desarrollo.

4) *Aplicación de luz led ultravioleta para tratamiento de plagas:* La prolongada exposición de rayos ultravioleta en las plantas es dañina, sin embargo, estudios recientes en fruticultura y horticultura demuestran que el uso de la luz ultravioleta en periodos cortos ayuda a la inhibición de gran parte de plagas y enfermedades en flores e inactivación microbiana en frutos , además que propicia efectos positivos como crecimiento y desarrollo de cultivos, mejoras en el color y contenido de ciertos

pigmentos, cambios químicos en la planta relacionados con el gusto y aroma. (paul,2013; Millán et. al.,2015)

5) Diferentes tiempos de exposición para determinar comportamiento de crecimiento. Experimentar con lapsos diferentes de tiempo para encontrar el periodo óptimo de exposición a la luz LED, con el objetivo de ahorrar energía eléctrica y favorecer la calidad y crecimiento de la planta.

6) Ajuste automático de la luz complementaria, de acuerdo a la etapa fenológica (crecimiento) del cultivo y la estación del año. Los requerimientos de luz varían de acuerdo a la etapa de crecimiento en que se encuentre el cultivo. La duración del día depende de la estación del año en cuestión por lo que es necesario un ajuste en el complemento de luz LED para cumplir su requerimiento de fotoperiodo.

7) Monitoreo y control ambiental remoto. GSM, Internet, Ondas de radio. Alarmas al usuario: No siempre se tienen las condiciones ideales para tener los recursos humanos necesarios para cubrir las demandas del manejo del invernadero, por lo que es necesario poder aplicar acciones preventivas o correctivas mediante comunicación remota vía datos celulares, ondas de radio o Internet.

8) Sensor de humedad en el suelo para riego automático: En este experimento el riego fue aplicado por periodos de tiempos fijos, sin embargo, es posible introducir un sensor de humedad en el suelo, para poder accionar el riego y tener un ahorro de agua, energía y favorecer el crecimiento de la planta.

9. LITERATURA CITADA

Al-Hasithi, B.M., García, C.C.E., Cedazo, L.R. y Looor,L.C. 2016. Desarrollo de un sistema de Iluminación Artificial Inteligente para cultivos Protegidos.Revista Iberoamericana e Informática Industrial. Vol.13.

Aphalo, P.J.; Gibson, D. y Di Benedetto, A.H. 1991.Responses of growth, photosynthesis, and leaf conductance to white light irradiance and end-of-day red and far- red pulses in *Fuchsia magellanica* Lam. *New Phytologist*. 117, 461–471.

Arbos, L. A. M. 1992. El Crisantemo, Cultivo, Multiplicación y Enfermedades. Ediciones Mundi - Prensa. Madrid, España. 170 p.

Bantis, F., Ouzounis, T., & Radoglou, K. (2016). Artificial LED lighting enhances growth characteristics and total phenolic content of *Ocimum basilicum*, but variably affects transplant success. *Scientia Horticulturae*, 198, 277-283.

Barceló, J., G. Nicolás, B. Sabater y R. Sánchez Tamés. 2000. Fisiología vegetal. Ed. Pirámide, Madrid. 9a Ed.

Berón, M., Henriques, P. R., Varanda Pereira, M. J., & Uzal, R. 2006. Herramientas para la comprensión de programas. In VIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación.

Bidwell,R.G.S. 1979. Fisiología Vegetal. Primera Edición en Español, Editorial AGT EDITOR S.A. 762 p.p.

Bourget, C. M. 2008. An Introduction to Light-emitting Diodes, *HortScience*, 43 (7): 1944-1946.

Botti, C. 1999. Principios de la propagación y técnicas de propagación por estacas. En: Manejo tecnificado de invernaderos y propagación de plantas. Departamento de Producción Agrícola. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. pp 72-82.

Bradburne, J.A.; Kasperbauer, M.J. y Mathis, J.N. 1989. Reflected far-red light effects on chlorophyll and light-harvesting chlorophyll protein (LHC-II) contents under field conditions. *Plant Physiology*. 91(3): 800-803.

Caldari, J. P. 2007. Manejo de la luz en Invernaderos. Los beneficios de Luz de Calidad en el cultivo de Hortalizas. Primer Simposio Internacional de Invernaderos. México: 1-15.

Casal, J.J. y Aphalo, P.J. 1989. Phytochrome control of chlorophyll content in mature attached leaves of *Petunia axillaris*. *Annals of Botany*. 63(5), 595-598.

Casierra-Posada, F. y Rojas, B.J.F. 2009. Efecto de la exposición del semillero a coberturas de colores sobre el desarrollo y productividad del brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*). Bogotá, Colombia. *Agronomía Colombiana*. 27(1):49-55.

Casierra-Posada, F. y Peña-Olmos, J.E. 2015. Modificaciones fotomorfológicas inducidas por la calidad de la luz en plantas cultivadas. *Revista Acad. Colom. Cienc. Ex. Fis. Nat.* Vol. 39(supl.)

Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico, tecnología y manejo. Ediciones Mundi Prensa. Madrid. 37-62; 83-136.

Coene, T. 1995. *The Growing Edge* 6(3):66-72.

Chamovitz, D. A. y Deng X. W. (1996). Light signaling in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 15 (5-6):455-478.

Daniel, WW. 1984. Bioestadística. Limusa, México D.F. p. 485.

De las Rivas J. 2000. La luz y el aparato fotosintético. En: Fundamentos de Fisiología Vegetal. J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.) McGraw-Hill Interamericana, 131-153

Dirr, M. y Heuser, C. Jr. 1987. The reference manual of woody plant propagation. From seed to tissue culture. Georgia, USA. Varsity Press INC. 239 p.

Dorais, M. 2003. The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. Canadian Greenhouse Conference October 9.

Faust, J.E.2003. Light, 71-84 pp. In: Ball Redbook.Crop Production. Vol. 2. 17 th edition. HAMRICK,D. (ed.). Ball Ed. Batavia, USA.

Folta, K.M. y Maruhnich, S.A. 2007. Green light: a signal to slow down or stop. Journal of Experimental Botany. 58(12):3099-3111.

Gómez-Coto, F.J. 2014. Efecto de la calidad espectral sobre el desarrollo vegetal de Salvia splendens variedad vista Red and White.

González, MI. 2008. Potencia de prueba: la gran ausente en muchos trabajos científicos. Agronomía Mesoamericana n 19(2):309-313.

Hartmann, H. y Kester, D. 1980. Propagación de plantas. Principios y prácticas.México. Compañía Editorial Continental S. A. 814 p.

Hartmann, H. y Kester, D .1988. Propagación de plantas. Principios y prácticas. México. Compañía Editorial Continental S. A. 760 p.

Hernandis, B. 1999. Diseño de nuevos productos. Valencia: Servicio de Publicaciones, p.21.

Hermosilla, M. 1996. Utilización de sustratos a base de corteza compostada para propagación vegetativa por medio de estacas de tallo. Tesis Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia. 83 p

Hernández, R. 2002. Naturaleza de la luz. Material didáctico. <http://www.forest.ula.ve/~rubenhg>.

Humphrey, W. S., Psp (sm): a self-improvement process for software engineers. Addison-Wesley Professional, (2005).

Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México(ICAMEX). 2015.<http://icamex.edomex.gob.mx/sites/icamex.edomex.gob.mx/files/files/publicaciones/2014/CRISANTEM O.pdf>

Jao, R. C.; Fang, W.2004 Effects on Frequency and Duty Ratio on the Growth of Potato Plantlets In Vitro Using Light-emitting Diodes, HortScience, 39 (2): 375-379.

Jiao, Y.; Lau, O.S. y Deng, X.W. 2007. Light-regulated transcriptional networks in higher plants. Nature Reviews Genetics. 8(3):217-230.

Kofraneki, M.A. 1980, Cut Crysanthemus. In:Introduction to floriculture. R.A. Larson. Academic Press.

Levine, M. W. 2000. Fundamentals of sensation and perception. Levine and Shefner's. Oxford University Press 3a Ed.

MacDonald, B. 1986. Practical woody plant propagation for nursery growers. London. Ed. Batsford. 669 p.

Malagamba, S. P. 2015. Luces LED, una alternativa eficiente para optimizar la producción de invernaderos. Agricultures.com. <http://agriculturers.com/luces-led-una-alternativa-eficiente-para-optimizar-la-produccion-en-invernaderos/>

Mansfield, T.A. and Jones, M.B. 1976. Photosynthesis leaf and whole plant aspect. pp. 294-321. Hall, M.A.(ed.). Plant structure function and adaptation. Mc. Millan Press. U.S.A.

Martin, R., P.; Navas, G., L.M.; Hernandez-,N., S.; Correa,G.,A.; Martin, G., J.; Martin, B., E.; Chamorro, P., P. y Duran ,A., J. M. 2010. Diodos Emisores de luz para irradiación de plantas. Scribd. 7044.

Massa, G.D. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. HortScience.43(7):1951-1956.

Masi, C.G. 2008 Hybrid approach to system design. Estados Unidos. Revista Control Engineering. p.58

Matsuda, R., Ohashi-Kaneko, K., Fujiwara, K., Kurata, K. 2008. Effects of blue light deficiency on acclimation of light energy partitioning in PSII and CO₂ assimilation capacity to high irradiance in spinach leaves. Plant and Cell Physiology. 49: 664-670.

Megías, M.; Molist, P. y Pombal, M.A. 2015. Atlas de la Historia Vegetal y Animal. Peroxisomas, Mitocondrias y Cloroplastos. Universidad de Vigo. <http://webs.uvigo.es/mmegias/inicio.html>

Millán, V.D.; Romero, G.L.; Brito, M. Y Ramos-Villaroel, A.Y. 2015. Luz ultravioleta: inactivación microbiana en frutas. SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad Oriente. Cumaná, Venezuela. 27(3):454-469.

Nigel, P.; Fereres, A.; Martínez-Abaigar, J. 2013. La luz ultravioleta, una nueva herramienta para la horticultura. <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/107840-La-luz-ultravioleta-una-nueva-herramienta-para-la-horticultura.html>.

Ouzounis, T., Fretté, X., Rosenqvist, E., & Ottosen, C-O. (2014). Spectral effects of supplementary lighting on the secondary metabolites in roses, chrysanthemums, and campanulas. *Journal of Plant Physiology*, 171(16), 1491-1499.

Paniagua, P. G.; Hernández, A.C.; Rico, M.F.; Domínguez, P.F.A; Martínez, O.E. y Martínez, G.C.L. 2015. Efecto de la luz led de alta intensidad sobre germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.). *Polibotánica, Revista Botánica Internacional del Instituto Politécnico Nacional*. N^o 40. ISSN 1405-2768.

Pérez, M. J., A. Teixeira da Silva y M. T. Lao. 2006. Light Management in Ornamental Crops En Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology. Global Science Books. Vol. IV:683-695. UK.

Pinto, M., C. Linaza, C. Pastenes, A. Riquelme, M. Berti. 2000. Efecto de la radiación ultravioleta-B sobre el crecimiento y la fotosíntesis de siete variedades de trigo. *Rv. Chil. Hist. nat.* 73(1).

Plénet, D.; Mollier, A. y Pellerin S.. 2000. Growth analysis of maize field crops under phosphorus deficiency. II. Radiation-use efficiency, biomass accumulation and yield components. *Plant Soil* 224:259-272.

Ramos, G. Y. y Ramírez, L. E. 2016. Desarrollo de un sistema de iluminación artificial LED para cultivos en interiores- Vertical Farming (VF). *Informador técnico*. Vol 80(2): 111-120.

Reingart, M. 2012. Plataforma de Desarrollo Rápido de Aplicaciones bajo el Proceso de Software Personal: en búsqueda de agilidad, solidez y disciplina para la Ingeniería de Software. 15vo Concurso de Trabajos estudiantiles

Rodriguez, V. S. 2013. Arquitectura organizacional para soluciones empresariales de software. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*.

Russell, J. 2012. *Open-Source Hardware*. s.l: Book on Demand.

Santelices, R. 1998. Propagación vegetativa del Hualo, (*Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser), mediante estacas procedentes de rebrotes de tocón. Tesis Magister en Ciencias Forestales, Mención Manejo Forestal. Escuela de Postgrado. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile. 93 p.

Sala, J. J. 2003. *Introducción a la programación: teoría y práctica*. s.l: Club Universitario.

Salisbury, B.F. y Ross, W.C. 1994. *Fisiología Vegetal*. Traducción español Virgilio González Velásquez. Iberoamericana. México, D.F.

Secretaria de Agricultura, Ganaderia, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).2013. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta(SIACON).

Shahak, Y.; Gal, E.; Offir, Y. y Ben-Yakir, D.2008.Photoselective Shade Netting Integrated with Greenhouse Technologies for Improved Performance of Vegetable and Ornamental Crops. *Acta Horticulture*. 797: 75-80.

Taiz, L. y E. Zeiger. 2002. *Plant Physiology* (3rd ed) Sinauer Associates, Inc. Publishers, Massachusetts, USA.

Thomson W. and White M. J. 1991. Physiological and molecular studies of light- regulated nuclear genes in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 42: 423-466.

Torrente A. O. 2013. *Arduino: curso práctico de formación*. RC Libros.

Von Kinsky, B., Ivins, J., & Robey, M. (n.d.). Using PSP to Evaluate Student Effort in Achieving Learning Outcomes in a Software Engineering Assignment.

Xiaoying, L., Shirong, G., Taotao, C., Zhigang, X., Tezuka, T. 2012. Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting diodes (LED). *African Journal of Biotechnology*. 11 (22): 6169-6177.

Wells, J. 1979. *Plant propagation practices*. 14^a printing. New York. USA. Macmillan.Publishing co., INC. 344 p.