



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

UNIDAD ZACATENCO

**“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS  
POR LA RADIACIÓN LÁSER DE DIODO 660NM  
EN SEMILLAS DE TOMATE”**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
MECÁNICA**

PRESENTA:

**Ing. Carlos Francisco De Jesús Rivera  
Talamantes.**

DIRIGIDA POR:

**Dr. Alexandre Michtchenko**

CIUDAD DE MÉXICO, DICIEMBRE 2018

# **“ANÁLISIS DE LOS EFECTOS PRODUCIDOS POR LA RADIACIÓN LÁSER DE DIODO 660NM EN SEMILLAS DE TOMATE”**

## **RESUMEN**

Hoy en día con la sobre explotación de los recursos naturales, la degradación ambiental, y la sobrepoblación vuelve necesario aumentar la productividad de los agro-ecosistemas. La presente investigación tiene como propósito analizar los efectos producidos por la radiación laser de diodo en semillas de tomate, para de esta forma comprender la interacción de la radiación laser de diodo con los productos biológicos de origen vegetal, para desarrollar técnicas alternativas que mejore la productividad de los agro-ecosistemas afectando en lo menor posible la calidad del producto final y reduciendo los contaminantes que se generan en los procesos de cultivo. El presente trabajo se dividió en los partes, la primera parte se analizaron los efectos de la radiación laser de diodo en semillas de tomate Orange producidas el año 2005, en esta parte pudimos observar un aumento significativo en el crecimiento de las plántulas y se observó homogeneidad entre el crecimiento del tallo y la radícula de los objetos en estudio. En la segunda parte se hizo uso de la técnica de envejecimiento acelerado publicada por Fontana, Et al [3.1], para inducir un envejecimiento semillas de tomate Orange producidas el año 2005, después de esto se analizaron los efectos de la radiación laser de diodo en estas semillas, en este análisis se observaron un aumento significativo en los índices de germinación y crecimiento homogéneo entre el tallo y la radícula de los objetos de estudio.

# **“ANALYSIS OF THE EFFECTS PRODUCED BY DIODE LASER RADIATION OF 660NM IN TOMATO SEEDS”**

## **ABSTRACT**

Nowadays, with the over exploitation of natural resources, environmental degradation, and overpopulation, it is necessary to increase the productivity of agro-ecosystems. The purpose of this research is to analyze the effects produced by diode laser radiation on tomato seeds, in order to understand the interaction of diode laser radiation with biological products of plant origin, to develop alternative techniques that improve productivity of the agro-ecosystems affecting as little as possible the quality of the final product and reducing the pollutants that are generated in the cultivation processes. The present work was divided into parts, the first part analyzed the effects of diode laser radiation on Orange tomato seeds produced in 2005, in this part we observed a significant increase in the growth of the seedlings and homogeneity was observed between the growth of the stem and the radicle of the objects under study. In the second part, the accelerated aging technique published by Fontana, Et al [3.1], was used to induce an aging of Orange tomato seeds produced in 2005, after which the effects of diode laser radiation were analyzed. These seeds, in this analysis, showed a significant increase in the germination and homogeneous growth rates between the stem and the radicle of the objects of study.

## ÍNDICE:

Resumen.....	I
Abstract.....	Ii
Índice de figuras.....	Iii
Índice de imágenes .....	i
Índice de tablas.....	i
Introducción.....	vi
Planteamiento del problema.....	Vii
Justificación.....	Vii
Objetivos.....	Vii
<b>CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>1</b>
Antecedentes.....	2
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
<b>Parte I.- Fundamentos teóricos de la radiación electromagnética láser.....</b>	<b>4</b>
2.0. – El espectro electromagnético.....	5
2.1. – Láseres.....	6
2.1.1. - Características generales de los equipos láser.....	6
2.1.2. - Principio de funcionamiento de un Láser.....	6
2.1.2.1. - Emisión espontánea.....	8
2.1.2.2. - Emisión estimulada.....	8
2.1.3. - Inversión de población.....	9
2.1.4. - Resonador óptico.....	10
2.1.5. - Partes principales de un equipo laser.....	11
2.1.6. - Tipos de radiación electromagnética láser.....	12
2.1.7. - Laser tipo gas.....	12
2.1.8. - Láser de estado sólido con bombeo óptico.....	13
2.1.9. – Láseres semiconductores.....	14
2.1.9.1. - Semiconductores.....	14
2.1.9.2. - Semiconductores intrínsecos.....	14
2.1.9.3. - Semiconductores extrínsecos.....	15
2.1.9.4. - Principio de funcionamiento de un láser semiconductor.....	16
<b>Parte II.- Antecedentes y características de los objetos de investigación (tomate).....</b>	<b>19</b>
2.2. – Descripción de la planta de tomate.....	20
2.2.1. – Clasificación.....	20
2.2.2. – Morfología.....	20
2.2.3. - Factores que afectan el desarrollo de la semilla.....	22
2.2.4. - Efectos de estimulación radiación electromagnética láser en las plantas.....	23
<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.0. – Metodología.....	27
3.1.- Equipo Láser de diodo.....	28
3.1.1.- Descripción general del láser utilizado en el experimento.....	28
3.1.2.- Partes que componen el equipo láser utilizado en el experimento.....	28
3.2. – Caracterización y selección de densidad de radiación láser.....	29
3.3. - Experimentación con semillas de tomate variedad Orange (Lycopersicon esculentum) en laboratorio.....	30
3.3.1. - Descripción general de las semillas utilizadas en el experimento.....	30
3.3.2. - Selección de semillas.....	30
3.3.3. - Prueba de heterogeneidad.....	31

3.3.4. - Coeficiente de variación.....	32
3.4. - Radiación láser y germinación.....	33
3.5. - Inducción de envejecimiento en semillas de tomate de variedad Orange producidas el año 2007.....	34
3.6. - Definición de tratamientos láser.....	35
3.6.1. - Experimento 1.- Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007.....	35
3.6.2. - Experimento 2.- Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 con 21 horas de envejecimiento.....	35
3.7. - Definición de etapas de análisis.....	36
3.7.1. - Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007.....	36
3.7.2. - Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 con 21 hr. de envejecimiento	36
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
<b>Parte I: Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007.....</b>	<b>38</b>
4.1.1. - Comparación y análisis de los índices de germinación.....	39
4.1.2. - Comparación y análisis de los niveles de crecimiento de las plántulas.....	40
4.1.3. Comparación y análisis visual de entre los tratamientos con 120 y 0 segundos de exposición a 192 horas de tiempo de experimentación.....	41
4.1.4. - Análisis de germinación y crecimiento a 192 horas de tiempo de experimentación...	42
4.1.4.1. - Efectos de estímulo en germinación.....	42
4.1.4. 2.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula.....	43
<b>Parte II: Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 con 21 horas de envejecimiento.....</b>	<b>44</b>
4.2.1. - Comparación y análisis de los porcentajes de germinación.....	45
4.2.2. - Comparación y análisis de los niveles de crecimiento de las plántulas.....	46
4.2.3. - Comparación y análisis de los niveles del tallo de las plántulas.....	47
4.2.4. - Comparación y análisis de los niveles de crecimiento de las raíces de las plántulas...	48
4.2.5. - Comparación y análisis visual de entre los tratamientos con 60 y 0 segundos de exposición a 144 horas de tiempo de experimentación.....	49
4.2.6. - Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.....	50
4.2.7. – Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.....	51
4.2.8. - Efectos de estímulo en crecimiento de tallo a 192 horas de experimentación.....	52
4.2.9.- Efectos de estímulo en crecimiento de radícula 192 horas de experimentación.....	53
<b>Conclusiones.....</b>	<b>54</b>
<b>Trabajos futuros.....</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>56</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.0. – Espectro electromagnético.....	5
Figura 2.1.- Modelo atómico de Bohr.....	7
Figura 2.2.- Esquema de (a) absorción, (b) emisión espontánea, y (c) emisión estimulada.	7
Figura 2.3. - Ilustración del proceso de emisión estimulada.....	8
Figura 2.4. - Sistema de tres niveles de energía.....	9
Figura 2.5. – Población de estados de energía para tres niveles.....	10
Figura 2.6. – Estructura básica de un resonador óptico,.....	11
Figura 2.6. – Principales partes un equipo láser.....	11
Figura.2.7 – Estructura básica de un láser de gas helio-neón.....	13
Figura 2.8. – Láser de estado sólido con bombeo óptico.....	13
Figura 2.9. - Enlaces covalentes en un material intrínseco.....	14
Figura 2.10. – Semiconductores, tipo-N (a) y tipo-P (b).....	15
Figura 2.11. – Conceptos básicos en el funcionamiento del láser semiconductor.....	16
Figura 2.12. – Diagrama esquemático de un diodo laser.....	17
Figura 2.13. – Corte longitudinal de fruto de tomate.....	20
Figura 2.14. – Corte longitudinal de semilla de tomate.....	21
Figura 3.1.- Diagrama a bloques de la metodología utilizada en el proyecto.....	23
Figura 3.2.- Calibración de densidad de radiación.....	25
Figura 4.1. – Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación.....	27
Figura 4.2. - Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación...	38
Figura 4.3. – Fotografía comparativa con dos tiempos de irradiación en un tiempo de experimentación de 192 horas.....	40
Figura 4.4.- Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.	41
Figura 4.5. - Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.....	42
Figura 4.6. - Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación.....	43
Figura 4.7. - Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación...	46
Figura 4.8. - Efectos de crecimiento en tallo a diferentes tiempos de experimentación.....	48
Figura 4.9. - Efectos de crecimiento en radícula a diferentes tiempos de experimentación...	50
Figura 4.10. – Fotografía comparativa con dos tiempos de irradiación en un tiempo de experimentación de 144 horas.....	52
Figura 4.11.- Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.....	53
Figura 4.12.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.....	54
Figura 4.13.- Efectos de estímulo en crecimiento de tallo a 192 horas de experimentación..	55
Figura 4.14.- Efectos de estímulo en crecimiento de radícula a 192 horas de experimentación.....	56
	57

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 3.1.- Equipo láser utilizado en el experimento.....	26
Imagen 3.2.- Semillas en cajas de Petri puestas a germinar después de la radiación láser.....	31
Imagen 3.3.- Inducción de envejecimiento en semillas.....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Peso de las muestras de semillas utilizadas en el proyecto.....	28
Tabla 3.2.- Tratamiento láser en experimento 1.....	33
Tabla 3.3.- Tratamiento láser en experimento 2.....	33
Tabla 4.1.- Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación.....	37
Tabla 4.2.- Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación.....	39
Tabla 4.3.- Efectos de estímulo en germinación.....	42
Tabla 4.4.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula.....	43
Tabla 4.5.- Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación.....	45
Tabla 4.6.- Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación.....	47
Tabla 4.7.- Efectos de crecimiento en tallo a diferentes tiempos de experimentación.....	49
Tabla 4.8.- Efectos de crecimiento en radícula a diferentes tiempos de experimentación.....	51
Tabla 4.9.- Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.....	54
Tabla 4.10.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.....	55
Tabla 4.11.- Efectos de estímulo en crecimiento de tallo a 192 horas de experimentación....	56
Tabla 4.12.- Efectos de estímulo en crecimiento de radícula a 192 horas de experimentación.....	57

## INTRODUCCIÓN

Con la reducción de las materias primas fósiles, recursos combustibles, el crecimiento de la población y la degradación ambiental, el problema de aumentar la productividad de los agro-ecosistemas es cada vez más importante. Puede resolverse de dos formas: genética y epigenética.

La genética involucra un cambio artificial en el genotipo utilizando hibridación, muta-génesis o medidas de choque genético. El segundo, la epigenética estudia y se refiere al conjunto de elementos funcionales que regulan la expresión génica de una célula sin alterar la secuencia de ADN [0.1].

En la actualidad la producción de agro-ecosistemas tiene como limitantes las plagas y el cambio climático. Para mantener alta productividad de los agro-ecosistemas, se hace necesario usar varios agentes químicos: fungicidas, herbicidas, fertilizante, etc., sin los cuales la pérdida total de rendimiento será significativa. Sin embargo, el uso generalizado de estos productos, junto con un efecto positivo, conduce a una serie de consecuencias negativas. La solubilidad (es la capacidad de una sustancia de disolverse en otra llamada solvente) de éstas sustancias es altamente tóxicas y puede acumularse en plantas, suelo, agua, etc. Muchos de ellos son mutágenos y cancerígenos [0.2], y de acuerdo con V.S. Shavelukhi [0.3], de 400 plaguicidas analizados, más de 240 tuvieron un pronunciado efecto muta génico.

Junto con la contaminación ambiental y los efectos dañinos para la salud humana, tales sustancias reducen la viabilidad de las plantas cultivadas [0.5]. Además, el uso a largo plazo de fungicidas conduce a la selección espontánea de patógenos para la resistencia. Como resultado, surgen y se propagan razas de microorganismos nuevos que se vuelven resistentes a los productos utilizados para su control [0.4].

En palabras de E. McFeldien: "En una competencia entre agentes químicos y plagas, los químicos siempre e inevitablemente se quedan atrás" [0.5]. Por este motivo es de vital importancia contar con técnicas alternativas que subsanen ésta necesidad sin tener alto impacto en el medio ambiente y en la salud de los consumidores.

En éste trabajo se muestra un análisis de los efectos producidos por la radiación láser de diodo 660 Nm de baja intensidad en semillas de tomate, cuantificando índices de germinación y crecimiento de las plantas de tomate en los primeros días de su desarrollo.

En el capítulo I se muestra los estudios que anteceden este proyecto, estos trabajos fueron desarrollados por distintos investigadores, muestran la capacidad de la radiación láser como medio estimulante.



Posteriormente en el capítulo II se abordan conceptos generales acerca de los equipos láser, se explica brevemente su principio funcionamiento y estructura general. A su vez se hace mención de las características de la planta de tomate. En éste capítulo también se hace mención de los conceptos que explican la interacción entre la radiación láser y las plantas.

En el capítulo III se describe la metodología empleada para llevar a cabo esta investigación, así como algunas técnicas que se utilizaron en las semillas de tomate para deteriorarlas y probar la magnitud los efectos que produce la radiación láser de diodo.

En el capítulo IV se muestran los resultados y se analizan los efectos producidos por la radiación láser de diodo sobre semillas de tomate, mostrando gráficamente análisis estadísticos de tendencias de crecimiento y análisis en porcentajes de estimulación.

Por último, se presentan las conclusiones de la investigación y se proponen trabajos futuros.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El sector agrícola se encuentra en constante estudio y mejora para la calidad de los alimentos, así como la reducción de químicos en todo el proceso de crecimiento de cada uno de los cultivos. Con éste proyecto de investigación se busca realizar diversos experimentos aplicando la técnica de radiación láser de diodo 660 nm, analizar y evaluar sus efectos en semillas de tomate y de ésta manera evaluar las mejorías en la germinación de la planta y en qué porcentaje es viable utilizar esta técnica para diversos fines en la agricultura.

## **JUSTIFICACIÓN**

En la actualidad existe una alta demanda en el sector de agricultura por ello se encuentra en constante estudio en busca de mejorar la calidad de los alimentos, así como la reducción de químicos en todo el proceso de crecimiento de los cultivos, en éste trabajo se llevará a cabo un análisis de los efectos producidos por la radiación de diodo láser a 660nm con potencia de 200 mW en semillas de tomate para encontrar técnicas que permita influir de manera positiva en el cultivo de tomate.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Analizar los efectos producidos por la radiación láser de diodo de potencia 200mW y longitud de onda de 660nm en semillas de tomate.

### **Objetivos Específicos**

- Estudiar el mecanismo de interacción de la luz con las plantas.
- Definir parámetros de radiación.
- Radiar las semillas.
- Medir los efectos producidos por la radiación en semillas de tomate.
- Hacer una comparación entre los diferentes tiempos de radiación y determinar cuál es el que tiene mejores resultados.

# Capítulo I: Estado del arte:

*En el Capítulo I se presentan algunos de los trabajos relevantes relacionados con la radiación láser en productos biológicos de origen vegetal, se hace mención brevemente de los efectos de estimulación más relevantes de cada trabajo y de la técnica utilizada en cada estudio.*

## Capítulo I: Estado del arte

Diversos láseres han demostrado ser potencialmente útiles a determinados parámetros de irradiación y podrían beneficiar el establecimiento de siembra en condiciones adversas por sequía, frío, salinidad etc. En el cultivo de guisantes utilizando un láser de helio-neón que emitía luz roja a una longitud de onda de  $\lambda = 660 \text{ nm}$  con una dosis única de  $4 \times 10^{-3} \text{ J/cm}^2$  y un tiempo de exposición de 1 segundo se observó que se aceleró significativamente la emergencia de las plántulas, mejoró la uniformidad de la emergencia y modificó las etapas de crecimiento de las plantas [3.1].

El tratamiento de sistemas biológicos con campos magnéticos superiores al campo magnético de la tierra también indica efectos positivos que lo sugieren como opción para elevar el rendimiento de los cultivos [3.2].

En el trabajo de Souza [3.3] se aplicó tratamiento magnético a semillas de tomate para observar diferencias en la germinación y el crecimiento de las plántulas, encontrando un aumento del porcentaje de germinación 5 días post-siembra, además el crecimiento fue estimulado de 5 a 25% en la mitad de los tratamientos aplicados, encontrando que la magnitud del estímulo depende de dos factores primordiales, la intensidad del campo magnético y del tiempo. Por otra parte.

Flórez [3.4] estudio las mismas diferencias sobre semillas de maíz con campos magnéticos estacionarios obteniendo plántulas más altas y de mayor peso, con respecto a semillas de control, a los 7 y 10 días post-siembra.

Álvarez et al [3.5] trabajo con semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), se irradiaron con un equipo láser de He-Ne con potencia de 25 mW y diferentes periodos de exposición: 0, 5, 10, 20, 30 y 60 segundos, 0 segundos se utilizó como control. Los resultados mostraron un incremento significativo ( $p \leq 0.05$ ) en los indicadores; altura de las plantas (50%), longitud de la raíz (13%), diámetro del tallo (17%), diámetro medio ecuatorial (7%), masa promedio de los frutos (13%) y rendimiento por plantas (67%), respecto al control.

# **CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.**

*En el capítulo II, se describen algunos conceptos necesarios para poder desarrollar nuestro proyecto. Este capítulo se divide en dos partes, en la primera parte se abordarán los temas relacionados con la radiación electromagnética láser. En la segunda parte se habla sobre los antecedentes y características de los objetos de investigación (tomate) y se abordan los efectos de estimulación mediante radiación electromagnética láser en las plantas.*

# **Parte I.- Fundamentos teóricos de la radiación electromagnética láser.**

## 2.0. –El espectro electromagnético:

La luz puede representarse como una onda electromagnética armónica que se propaga tanto en el vacío como en medios materiales. La radiación electromagnética se describe utilizando la longitud de onda ( $\lambda$ ) que se define como la distancia que hay que recorrer para encontrar un punto semejante a lo largo de la onda. Puesto que vamos a considerar muchos fenómenos ópticos que dependen de la longitud de onda, necesitamos clasificar la radiación electromagnética según el valor de la longitud de onda. Las divisiones entre las regiones espectrales son aproximadas y están basadas en diferencias en la fuente de luz, en el sistema de detección, en la respuesta del ojo humano o en la transmisión atmosférica. La radiación visible es sólo una pequeña porción del espectro electromagnético, el cual se extiende desde las ondas de radio, ( $\lambda$ ) grandes, hasta los rayos X a longitudes de onda muy cortas. La radiación electromagnética a la cual nuestro ojo responde tiene longitudes de onda comprendidas entre  $0.4 \mu\text{m}$  (violeta) y  $0.8 \mu\text{m}$  (rojo). La radiación invisible incluye la radiación ultravioleta (UV), que tiene una longitud de onda más corta que el violeta, y la infrarroja (IR), con longitud de onda más larga que el rojo [2.18]. La longitud de onda se relaciona con la frecuencia óptica ( $\nu$ ) mediante:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Ec.1.0}$$

Donde  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz en el vacío (o en el aire). Cuando la onda atraviesa diversos medios, su longitud de onda cambia. Sin embargo, la frecuencia de la radiación permanece constante una vez que la onda ha sido generada. Por lo tanto, una disminución en la velocidad da lugar a una disminución proporcional de la longitud de onda. El índice de refracción ( $n$ ) es la constante de proporcionalidad y se define como el cociente entre la velocidad de la onda en el vacío y la velocidad en el medio ( $\nu$ ) [2.18].

$$n = \frac{c}{\nu} \quad \text{Ec.1.1}$$

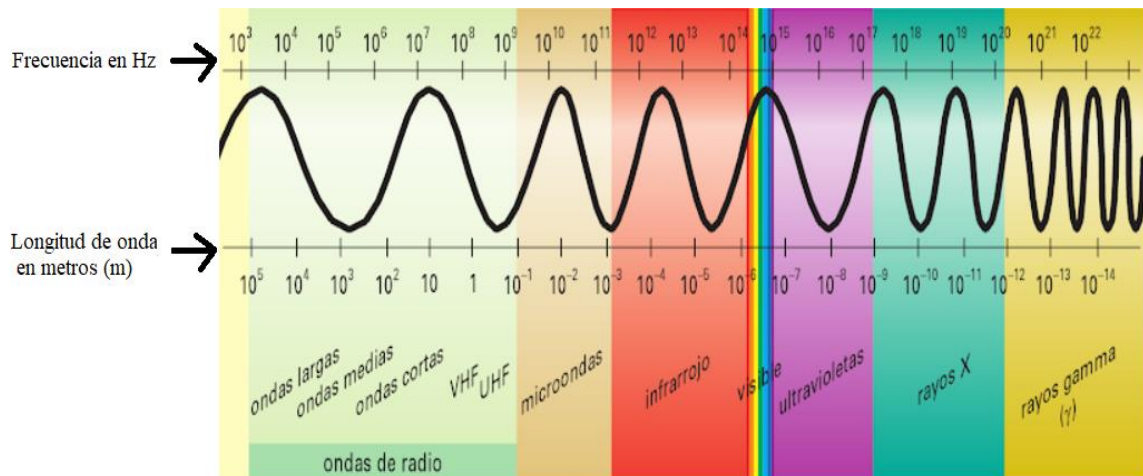


Figura 2.0. – Espectro electromagnético [2.19].

## **2.1. – Láseres**

### **2.1.1. - Características generales de los equipos láser.**

El término láser es un acrónimo de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), actualmente en la ciencia y tecnología son ampliamente utilizados por sus propiedades físicas, monocromaticidad (emite una radiación electromagnética de una sola longitud de onda), colimado, potencia concentrada, coherencia espacial (la radiación láser tiene una divergencia casi imperceptible, es decir, se proyecta a largas distancias sin que el haz se abra o disemine) y coherencia temporal (La luz láser se transmite de modo paralelo en una única dirección debido a su naturaleza de radiación estimulada, al estar constituido el haz láser con rayos de la misma fase, frecuencia y amplitud estos se acoplan ordenadamente entre sí). Los podemos encontrar en distintas áreas como son el área médica como medios quirúrgicos, industrial como medio de corte y para soldar materiales, computacional como lector y escritor de datos, agrícola como medio de nivelación de terrenos, entre otras. Los equipos láser remontan sus orígenes a 1917 Albert Einstein sienta las bases para la tecnología láser cuando predice el fenómeno de "emisión estimulada", que es fundamental para el funcionamiento de todos los láseres. Después en 1939 Valentin Fabrikant teoriza el uso de la emisión estimulada para amplificar la radiación. En el año 1950 Charles Townes, Nikolay Basov y Alexander Prokhorov desarrollan la teoría cuántica de emisión estimulada y demuestran la emisión estimulada en las microondas. Más tarde reciben el Premio Nobel en física por este trabajo de vanguardia. En el año 1959 Gordon Gould, graduado de la Universidad Columbia, propone que la emisión estimulada se puede usar para amplificar la luz. Describe un resonador óptico que puede crear un haz angosto de luz coherente y lo llama LASER, por las siglas en inglés de "amplificación de luz por emisión estimulada de radiación".

### **2.1.2. - Principio de funcionamiento de un Láser.**

Para continuar con la generación de láser, es preciso hablar sobre el modelo atómico de Bohr [figura 2.1] que nos dice que un átomo consiste en un núcleo que está rodeado de electrones y que el núcleo mismo está compuesto de protones y neutrones. Los electrones están cargados negativamente y los protones cargados positivamente, mientras que los neutrones son eléctricamente neutros. En una descripción simplificada de la estructura atómica, se considera que los electrones se mueven en órbitas circulares de radios específicos correspondientes a estados de energía discretos, con el núcleo como centro. El cambio de niveles de energía de los electrones dentro de un átomo se puede describir mediante tres fenómenos: absorción o absorción estimulada, emisión espontánea y emisión estimulada [figura]. El láser basa su funcionamiento en la teoría de emisión estimulada, propuesta por Albert Einstein en 1916, la cual dice en su forma más simple, que la generación del láser es el resultado de la emisión de energía asociada con la transición de un electrón de un nivel de energía más alto a uno más bajo u órbita dentro de un átomo.



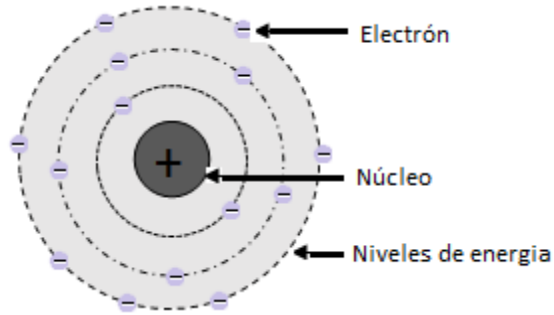


Figura 2.1.- Modelo atómico de Bohr

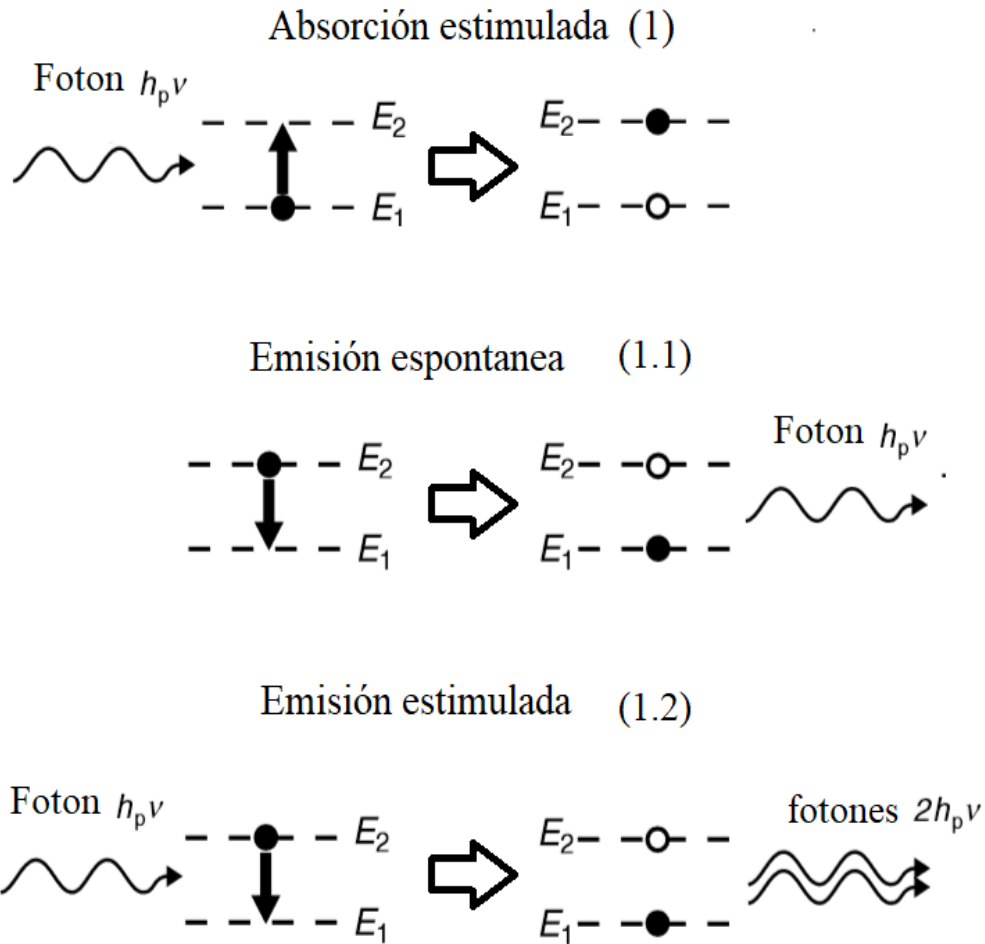


Figura 2.2.- Esquema de (a) absorción, (b) emisión espontánea, y (c) emisión estimulada [2.1].

### 2.1.2.1. - Emisión espontánea

La emisión espontánea ocurre cuando la transición del estado excitado a un nivel de energía más bajo no es estimulada por ninguna radiación incidente, pero ocurre más o menos naturalmente (Fig. 1.5b). Esto sucede porque los átomos excitados quieren volver a su estado fundamental, y si se los deja solos, es sólo cuestión de tiempo antes de que lo hagan. Si el átomo estuviera completamente estable en su estado excitado, no habría emisión espontánea. La transición entre los niveles de energía  $E_2$  y  $E_1$  da como resultado la emisión de un fotón de energía dado por:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h_p \nu \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde  $\nu$  es la frecuencia del fotón emitido y  $h_p$  es la constante de Planck con un valor de  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

### 2.1.2.2. - Emisión estimulada

Si el átomo en el nivel de energía 2 está sujeto a radiación electromagnética o a un fotón de frecuencia  $\nu$  correspondiente a la diferencia de energía  $\Delta E = E_2 - E_1$  entre los niveles 1 y 2, el fotón estimulará al átomo a experimentar una transición al nivel de energía más bajo. La energía emitida como resultado de esta transición, tiene la forma de una onda electromagnética que la del fotón estimulante y se superpone al fotón incidente, lo que refuerza la luz emitida. Esto produce una emisión estimulada, donde los fotones incidentes y emitidos tienen las mismas características y están en fase, lo que resulta en un alto grado de coherencia, y la dirección, frecuencia y el estado de polarización del fotón emitido son esencialmente los mismos que los del fotón incidente. Los dos fotones pueden generar otro conjunto, con una avalancha de fotones resultante [figura 2.3]. La tasa de emisión por unidad de volumen, en el caso de la emisión estimulada es proporcional a la población en el nivel 2 ( $E_2$ ), así como a la densidad de energía, y está dada por:

$$\Delta E = 2 h_p \nu \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde  $\nu$  es la frecuencia del fotón emitido y  $h_p$  es la constante de Planck con un valor de  $6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ .

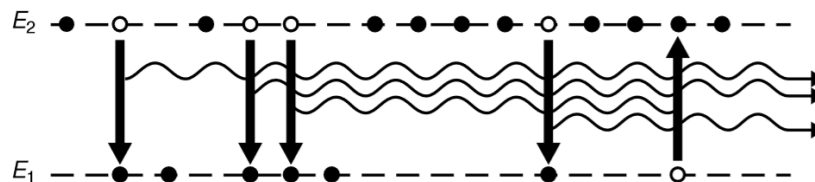


Figura 2.3. - Ilustración del proceso de emisión estimulada [2.2].

### 2.1.3. - Inversión de población:

Como anteriormente se mencionó el principio de funcionamiento de los láseres es la emisión estimulada la cual se lleva a cabo gracias a la inversión de población. La inversión de población ocurre cuando un sistema de niveles de energía se sale de su estado de equilibrio, provocando que la cantidad de electrones de los átomos del medio activo que se encuentra en los niveles más altos de energía sea mayor que las partículas en los niveles más bajos de energía. En este caso, la inversión de población no ocurre en un sistema de dos niveles de energía, es necesario un nivel intermedio dando lugar a un sistema de tres niveles de energía, que se describe a continuación.

Un sistema de tres niveles de energía no degenerados,  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ , a los cuales se les asocia las variables,  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$ , que son el número de partículas por unidad de volumen en cada uno de estos niveles. El bombeo óptico que incide al sistema produce una transición de los átomos del estado base al estado de mayor energía (Nivel 3). Después los átomos sufren un rápido decaimiento no radiante hacia el nivel de energía intermedio (Nivel 2), en esta transición, una fracción de la energía se disipa en forma de vibraciones. Las partículas del estado intermedio sufren una transición al estado base a partir de un decaimiento radiante, esto significa que en esta transición se emitirán fotones a partir de emisión espontánea y emisión estimulada, por lo que es evidente que la inversión de población se dará entre el nivel intermedio y el estado base.

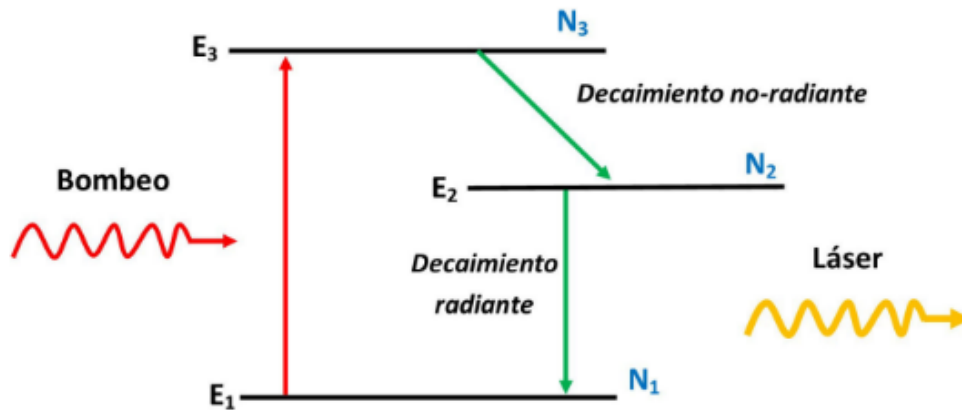


Figura 2.4. - Sistema de tres niveles de energía [2.3].

La inversión de la población no se produce en condiciones normales de equilibrio térmico. Para que sea posible, los átomos dentro del medio láser deben ser excitados o bombeados a un estado de no equilibrio. Esto se hace con la fusión de una cantidad sustancial de energía en el medio utilizando una fuente externa. El proceso disminuye el número de átomos en el nivel de energía más bajo mientras aumenta el número en el nivel más alto. Un material en el que se induce la inversión de la población se llama medio activo.

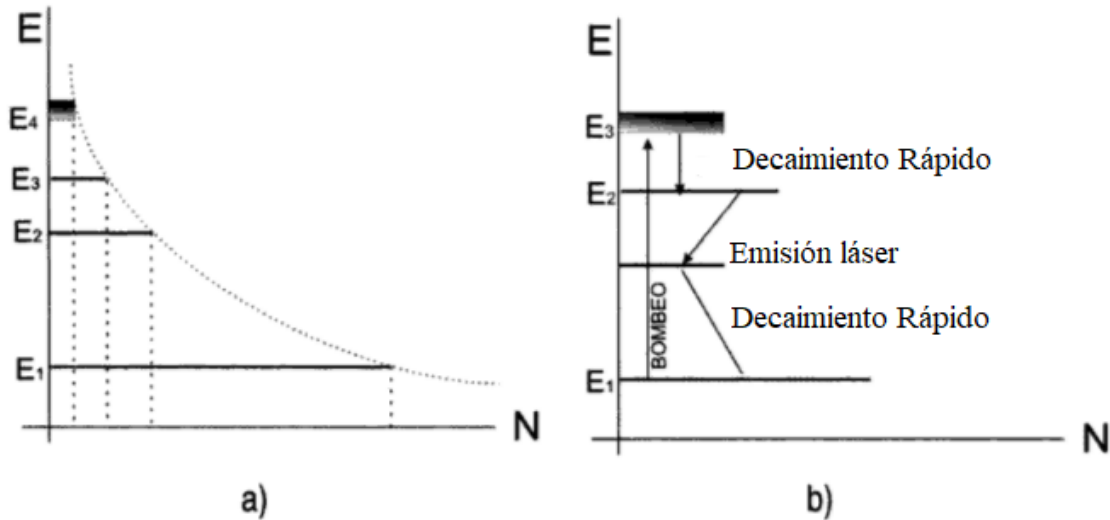


Figura 2.5. – población de estados de energía para tres niveles: a) antes del bombeo, b) después del bombeo [2.4].

#### 2.1.4. - Resonador óptico.

Una vez lograda la inversión de población para mantener suficientes números de fotones emitidos, la potencia que se consigue no alcanza como para obtener algún beneficio práctico del sistema. Para incrementar la intensidad y poder obtener luz con la máxima potencia posible y disminuir la dispersión, se utilizan los resonadores ópticos. Se sabe que los fotones de luz generados durante la emisión estimulada se crean en todas direcciones y para poder conseguir en haz de luz láser necesitamos que estén ordenados, para lograr esto, se hace uso de una cavidad óptica resonante, que varía dependiendo el tipo de laser que se esté analizando. Generalmente consiste en un medio activo que es donde se generan los fotones, un espejo parcialmente reflectante y un espejo altamente reflectante. El espejo altamente reflectante refleja cerca del 99% de la luz que recibe y el espejo parcialmente reflectante refleja alrededor de 75%.

Los dos espejos se encuentran paralelamente alineados y entre ellos encuentra el medio activo. El espejo trasero es el altamente reflectante y el espejo delantero parcialmente reflectante. El espejo parcialmente reflectante permite la salida de una pequeña parte de la radiación generada en el interior de la cavidad, mientras que la parte restante es enviada de regreso al interior para continuar con el proceso de emisión estimulada con otros átomos en estado excitado y a su vez amplificar la radiación con el espejo altamente reflectante [2.14].

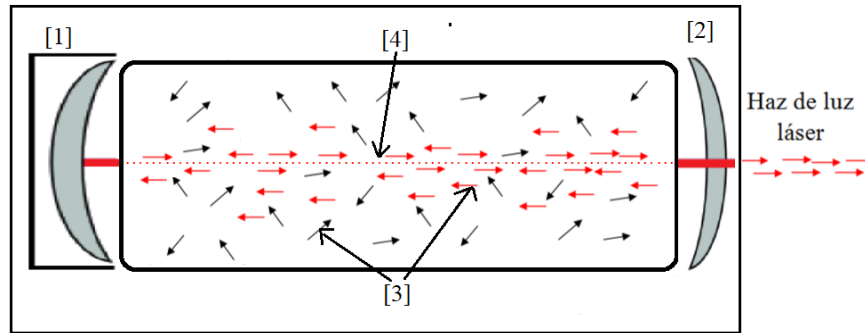


Figura 2.6. – Estructura básica de un resonador óptico, espejo altamente reflectante (1), espejo parcialmente reflectante (2), fotones (3), eje óptico (4).

### 2.1.5. - Partes principales de un equipo láser:

1. Fuente de bombeo
2. Medio activo
3. Resonador óptico.

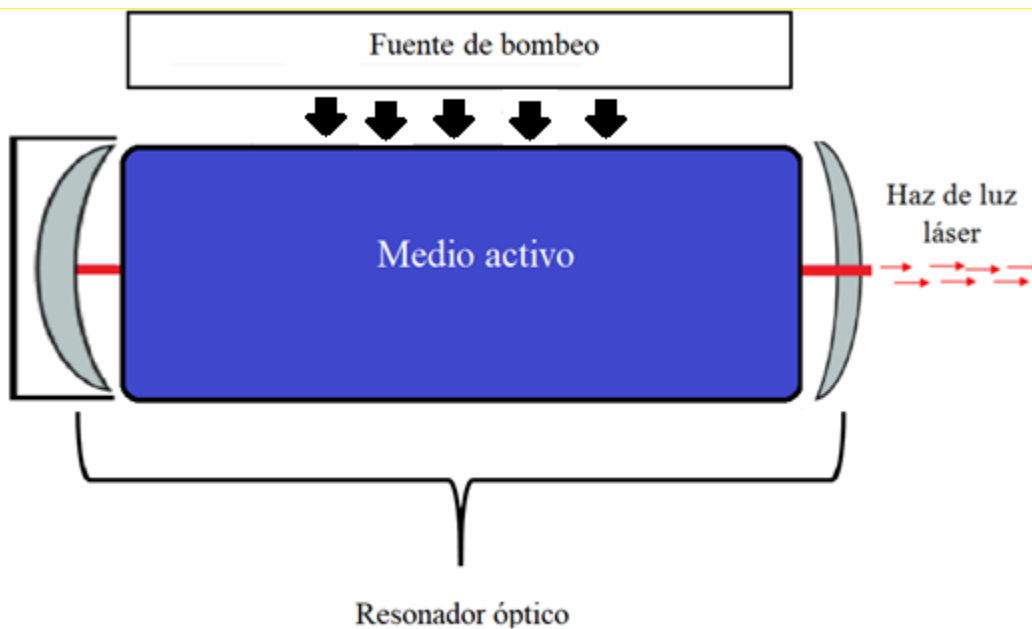


Figura 2.6. – Principales partes un equipo láser.

La fuente de bombeo lleva energía externa al láser. El medio láser activo se sitúa en el interior del láser. Dependiendo del diseño, el medio láser puede estar compuesto de una mezcla de gases (láser de CO<sub>2</sub>), o un cuerpo de cristal (láser YAG) o fibras de vidrio (láser de fibra). Cuando se inyecta energía al medio láser por medio de la bomba, emite energía en forma de

radiación. El medio láser activo se sitúa entre dos espejos, el "resonador". Uno de esos espejos es un espejo unidireccional. La radiación del medio láser activo se amplifica en el resonador. Al mismo tiempo, sólo una cierta radiación puede abandonar el resonador a través del espejo unidireccional. Esta radiación en forma de haz es la radiación láser.

#### **2.1.6. - Tipos de radiación electromagnética láser:**

Existen diferentes tipos de radiación electromagnética láser, se diferencian fundamentalmente por el medio activo del láser que genera la emisión:

1. Gas.
2. Sólido con bombeo óptico.
3. Líquido.
4. Semiconductores.

Cada tipo de láser emite radiación electromagnética con una determinada longitud de onda (banda del espectro electromagnético), la penetración de radiación electromagnética depende de dos factores la longitud de onda y coeficiente de absorción del material irradiado. A continuación, se describirán algunos tipos de láseres.

#### **2.1.7. - Laser tipo gas:**

Como su nombre lo indica, los láseres de gas utilizan un medio gaseoso como medio activo. Ejemplos comunes son los láseres de He-Ne y  $CO_2$ . Los láseres de gas se encuentran entre las formas más comunes en la industria del láser. Los niveles de potencia varían desde varios kilovatios a mili vatios. Se pueden operar en modo continuo o en modo pulsado, con frecuencias de salida que van desde ultravioleta a infrarrojo. El bombeo eléctrico es, el medio más común para excitar el medio activo en los láseres de gas. El bombeo también se realiza por medios químicos, con un haz de electrones o por expansión de gas dinámico.

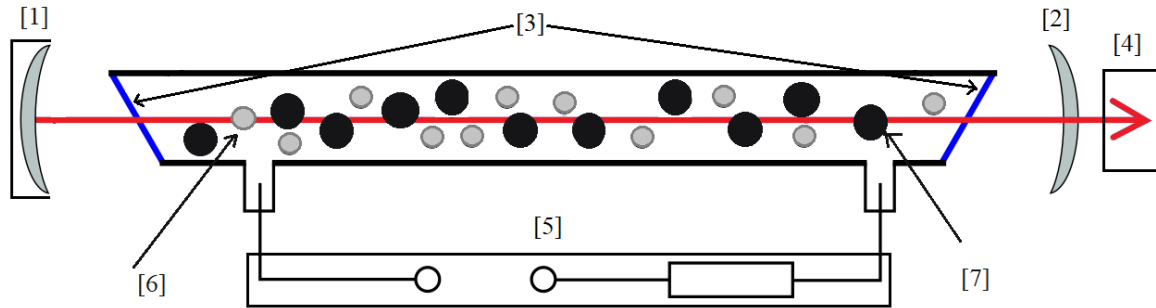


Figura.2.7 – Estructura básica de un láser de gas helio-neón, espejo 99% reflectante (1), espejo parcialmente reflectante (2), ventana de Brewster (3), salida de radiación láser (4), suministro eléctrico (5), gas helio (6) y neón (7).

### 2.1.8. - Láser de estado sólido con bombeo óptico.

El láser utiliza como medio activo un material cristales sólidos, algunos ejemplos de estos cristales solidos son el neodimio, rubí y Alejandría o titanio-zafiro. En el medio activo de estos láseres se insertan impurezas iónicas, que proporciona la estructura energética requerida para producir el efecto láser.

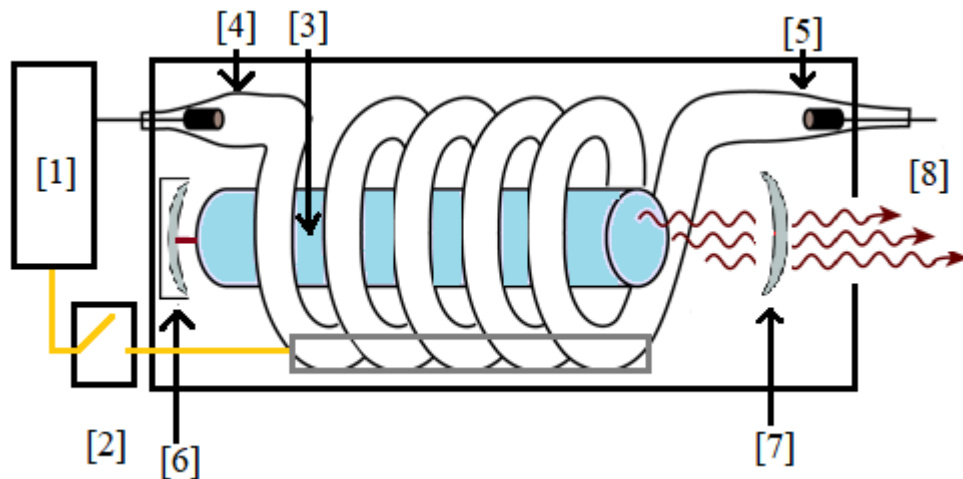


Figura 2.8. – Láser de estado sólido con bombeo óptico, fuente de poder (1), interruptor (2), cristal medio activo (3), ánodo + (4), cátodo - (5), espejo altamente reflectante (6), espejo parcialmente reflectante (7), haz de luz láser (8).

## 2.1.9. – Láseres semiconductores

### 2.1.9.1. - Semiconductores.

Un semiconductor es un elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre. Los enlaces de los átomos que los componen son los que permiten que tenga estas propiedades. Existen dos tipos de semiconductores intrínsecos y extrínsecos:

**2.1.9.2. - Semiconductores intrínsecos:** Un semiconductor puro que no contiene impurezas se conoce como un semiconductor intrínseco. Dicho semiconductor tiene un número igual de electrones y orificios de conducción, ya que los orificios se crean por la excitación de los electrones a la banda de conducción. De acuerdo con la ley de Boltzmann, el número de agujeros en la banda de valencia y los electrones en la banda de conducción (que están disponibles para la conducción eléctrica) aumentan con la temperatura. La ocupación de mayores niveles de energía aumenta con la temperatura (según la ley de Boltzmann). Ejemplos de dicha clase de materiales son el silicio y el germanio, que son elementos del grupo IV de la tabla periódica, y cada uno tiene cuatro electrones en las órbitas más externas de sus átomos. Cada átomo comparte sus cuatro electrones más externos con otros cuatro átomos circundantes para formar enlaces covalentes (figura 2.9), y como cada enlace involucra dos electrones, la capa más externa ahora tiene ocho electrones en total y, por lo tanto, está completamente llena. Por lo tanto, se comporta como un aislante en el cero absoluto, y la conductividad aumenta con la temperatura.

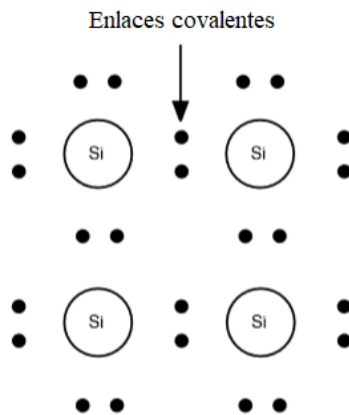


Figura 2.9. - Enlaces covalentes en un material intrínseco [2.17].



**2.1.9.3. - Semiconductores extrínsecos:** Si a un semiconductor intrínseco se agrega un elemento del grupo V, el arsénico, que tiene cinco electrones de valencia, en pequeñas cantidades como impurezas al sólido de germanio (un proceso llamado dopaje), cuatro de sus electrones formarán enlaces estables con los átomos de germanio que lo rodean y dejarán el quinto lugar. átomo no unido estrechamente y, por lo tanto, esencialmente libre y móvil en el sólido (Figura 2.10a).

Cuando un semiconductor se dopa de esta manera, se dice que es de **tipo N**, donde la "n" indica negativo ya que hay un exceso de electrones disponibles para la conducción. El arsénico es entonces un elemento donante. Por el contrario, si el sólido original está dopado con un elemento del grupo III, como el galio, que tiene tres electrones de valencia, entonces hay una deficiencia en la unión de los electrones, lo que resulta en la creación de agujeros (Figura 2.10b). El semiconductor resultante se dice que es de **tipo P**.

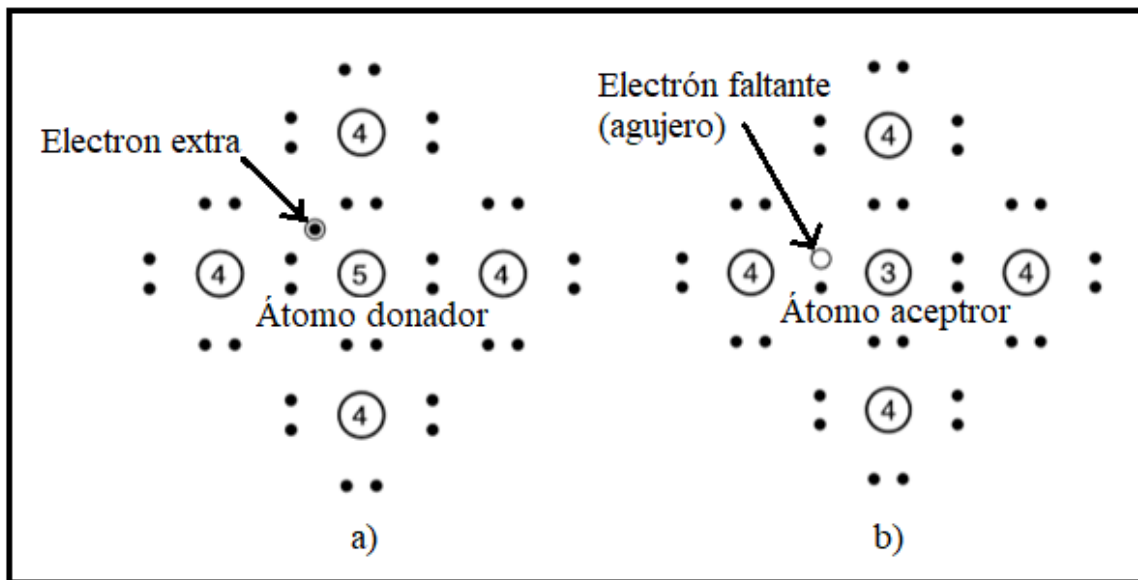


Figura 2.10. – Semiconductores, tipo-N (a) y tipo-P (b) [2.17].

**2.1.9.4. - Principio de funcionamiento de un láser semiconductor:**

Para comprender el principio de funcionamiento de un láser semiconductor, primero considere un semiconductor intrínseco a temperatura cero absoluta (Figura 2.11 a), donde la banda de valencia ( $V_b$ ) está completamente llena (indicada por la región sombreada). Si ahora se excitan los electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción ( $C_b$ ), por ejemplo, bombeando, estos electrones descienden rápidamente hacia los estados en la banda de inducción con un tiempo de aproximadamente 0,1ps. Del mismo modo, los electrones en la banda de valencia también se redistribuyen para llenar los niveles más bajos que están vacíos, lo que resulta en la creación de agujeros en la parte superior de la banda de valencia (Figura 2.11 b). En estas circunstancias, el semiconductor en su conjunto no se encuentra en

equilibrio térmico, aunque el proceso de redistribución produce un equilibrio localizado en cada banda. En cada banda, hay un nivel de Fermi que separa los niveles totalmente ocupados y vacíos en esa banda. Estos están indicados por  $F_c$  y  $F_v$  para las bandas de conducción y valencia, respectivamente, y sus valores dependen del número de electrones bombeados a la banda de conducción. Cuando el semiconductor en su totalidad está en equilibrio,  $F_c = F_v$ .

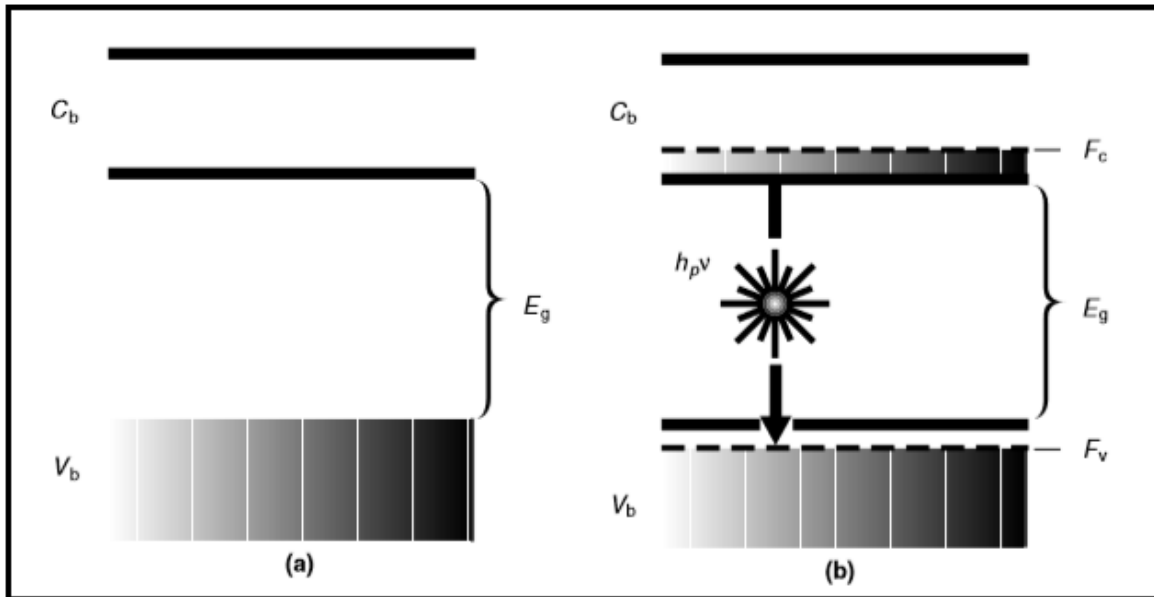


Figura 2.11. – Conceptos básicos en el funcionamiento del láser semiconductor. (a) Una banda de valencia completamente llena. (b) Una inversión de población resultante de una banda de conducción parcialmente llena [2.16].

Normalmente, la oscilación láser implica el uso de dos espejos para formar una cavidad. En los láseres semiconductores, esto se logra mediante la escisión del material a lo largo de planos cristalinos naturales para obtener superficies altamente reflectantes y paralelas en dos extremos del cristal que también son perpendiculares a la unión. Las otras dos superficies se dejan ásperas para suprimir la oscilación en direcciones no deseadas. Además, dado que los semiconductores tienen un índice de refracción muy alto, aproximadamente 3.6, la reflectividad inherente en la interfaz cristal-aire es muy alta, aproximadamente 35%, lo que hace innecesario el uso de recubrimientos reflectantes. Los láseres semiconductores tienen la ventaja de ser de tamaño relativamente pequeño y fáciles de fabricar por producción en serie, por lo que son de bajo costo.

Los láseres semiconductores tienen la ventaja de ser de tamaño relativamente pequeño y fáciles de fabricar por producción en serie, por lo que son de bajo costo. Las dimensiones típicas son  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ , con el grosor de la región activa, donde se concentra la mayor parte de la oscilación, aproximadamente  $1\text{ }\mu\text{m}$  (Fig. 8.26). Sin embargo, debido a la

difracción, el haz es mucho más ancho (aproximadamente  $40 \mu\text{m}$ ).

La extensión del haz a las regiones alejadas de la interfaz da lugar a altas pérdidas de cavidad, ya que la absorción es mucho mayor que la emisión a medida que uno se aleja de la interfaz. Estas pérdidas dan como resultado que se requieran altas densidades de corriente de umbral.

El umbral de corriente aumenta con la temperatura y esto se debe a que:

$$P_V(E_V) = [1 - P_C(E_C)] \uparrow \text{aumenta,}$$

$$P_C(E_C) = [1 - P_V(E_V)] \downarrow \text{disminuye}$$

A medida que aumenta la temperatura, la ganancia de oscilación disminuye. La anchura relativamente estrecha del haz, aproximadamente  $40 \mu\text{m}$ , a medida que sale de la cavidad óptica, da lugar a una alta divergencia del haz, en comparación con otros láseres, ya que se difracta en la abertura de la cavidad. Esto puede variar desde  $5^\circ$  hasta  $15^\circ$ . Además, dado que la transición se produce entre dos bandas anchas, su monocromaticidad no es tan buena como en otros láseres. Sin embargo, la conversión directa de la energía eléctrica en energía óptica da como resultado una eficiencia muy alta para los láseres semiconductores, hasta aproximadamente el 50%.

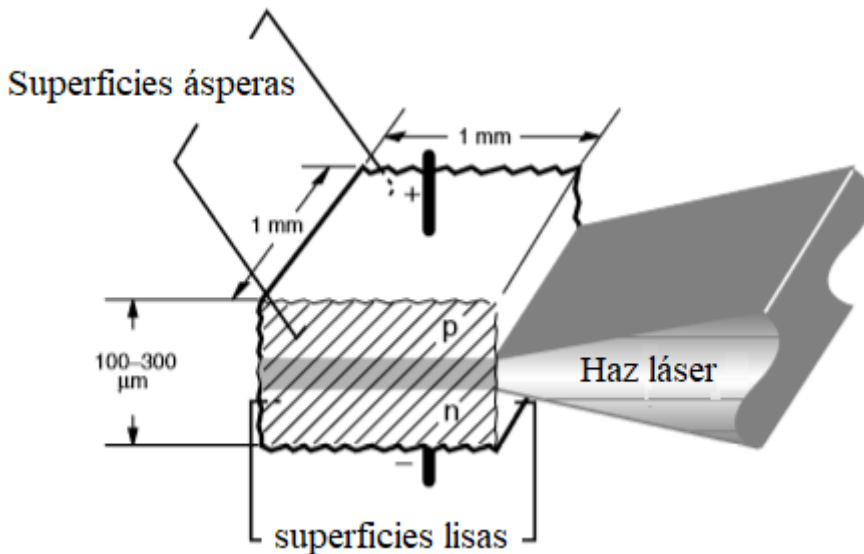


Figura 2.12. – Diagrama esquemático de un diodo láser [2.17].

## **Parte II.- Antecedentes y características de los objetos de investigación (tomate).**

## **2.2. – Descripción de la planta de tomate:**

El tomate es una hortaliza muy importante en el mundo, constituyendo el 30% de la producción hortícola, con alrededor de 2,9 millones de hectáreas sembradas y 72.744.000 toneladas de frutos cosechados [2.5]. El tomate data sus orígenes de los Andes del Perú, donde apareció silvestre con una fruta redonda de color rojo [2.6]. El tomate es una de las hortalizas más importantes en el mundo, debido al área sembrada, valor de la producción y nutricional, amplia distribución geográfica, elevado consumo, y sustento económico para pequeños y medianos productores. Esta hortaliza se ha establecido en todos los continentes del mundo. El área cosechada, de tomate, en México durante el año 2017 alcanzó las 16.388 hectáreas [2.7].

### **2.2.1. - Clasificación**

**Reino:** Plantae.

**División:** Magnoliophyta.

**Clase:** Magnoliopsida, Asteridae.

**Orden:** Solanales.

**Familia:** Solanaceae.

**Género:** Solanum.

**Especie:** *S. lycopersicum*.

### **2.2.2. – Morfología**

Las plantas de tomate, por su hábito de crecimiento pueden ser herbáceas, arbustos, árboles e incluso lianas, glabras o pubescentes, con las siguientes características morfológicas que las distinguen [2.8]:

**Tallo.** - El tallo principal tiene 2-4 cm de diámetro en la base y está cubierto por tricomas glandulares y no glandulares que salen de la epidermis. Forma de seis a doce hojas que crecen lateralmente, con una disposición de hojas sobre el tallo de 2/5, antes de que la yema principal se transforme en una inflorescencia (conjunto de flores que nacen sobre el tallo). El crecimiento subsiguiente se produce a partir de la yema axilar (es un brote embrionario localizado en la axila de una hoja) de la última hoja, la cual desarrolla un tallo secundario que crece como una prolongación del tallo primario y desplaza lateralmente la inflorescencia. Los sucesivos segmentos del tallo se desarrollan de forma similar, produciendo una inflorescencia cada dos o tres hojas.

**Hojas:** Las hojas del tomate son pinnado compuestas. Una hoja típica de las plantas cultivadas tiene unos 0.5 m de largo, algo menos de anchura, con un gran foliolo terminal y hasta ocho grandes folíolos laterales, que pueden a su vez ser compuestos (Figura 7). Los folíolos son generalmente peciolados y lobulados irregularmente con bordes dentados. Las hojas están

recubiertas de tricomas del mismo tipo que los del tallo. Las hojas del tomate son de tipo dorsiventral o bifacial.

Flores: Se presentan en inflorescencias cerradas, son hermafroditas y poseen un plano de simetría bilateral.

Fruto: Los frutos se presentan agrupados en racimos en número tamaño y estado de maduración diferentes. El fruto es una baya, de forma y tamaño muy variables. Está compuesto por la película (epidermis o piel, pulpa, placenta y semillas (Figura 2.13). Internamente los frutos están divididos en lóculos, sitios donde se alojan las semillas inmersas en el mucílago placentario. De acuerdo con el número de lóculos, los frutos pueden ser bi, tri, tetra o pluriloculares.

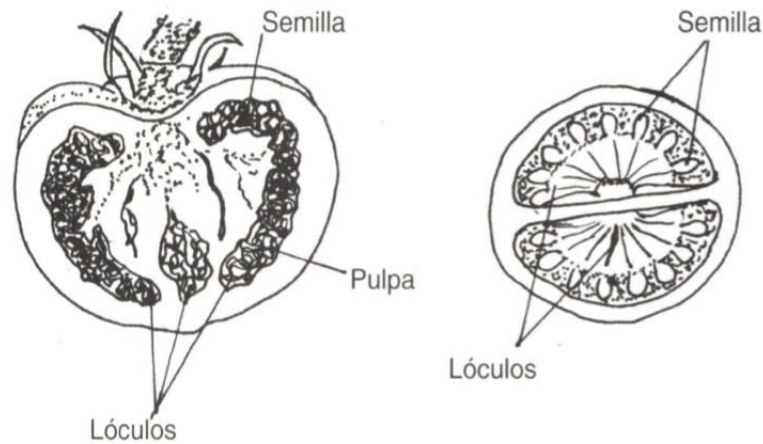


Figura 2.13. – Corte longitudinal de fruto de tomate [2.9].

Semilla: La semilla tiene forma lenticular, con unas dimensiones aproximadas de 5x4x2 mm y está constituida por el embrión, endospermo y la testa o cubierta seminal (Noez, 1995). El embrión está constituido por la yema apical, dos cotiledones, hipocotilo y radícula. El endospermo contiene los elementos nutritivos necesarios para el desarrollo inicial del embrión. La testa o cubierta seminal está constituida por un tejido duro e impermeable, recubierto de pelos que envuelve al embrión del endospermo [figura 2.14].

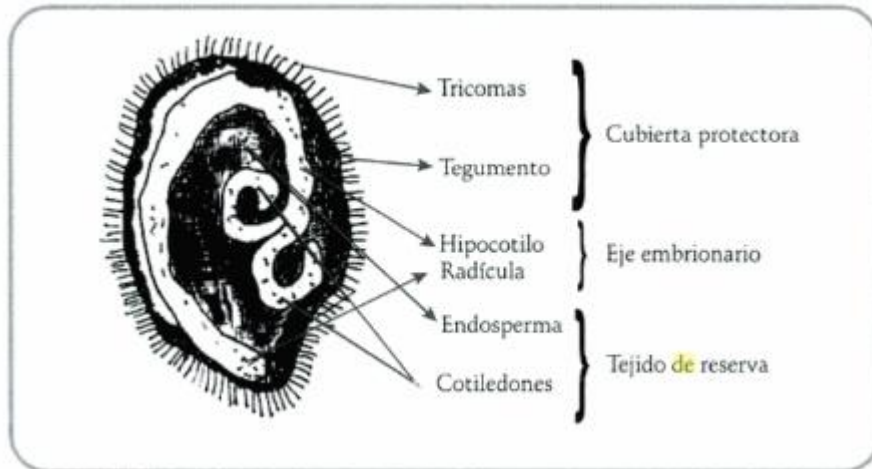


Figura 2.14. – Corte longitudinal de semilla de tomate [2.9].

### 2.2.3. - Factores que afectan el desarrollo de la semilla.

**Hidratación (Agua):** La entrada de agua a las semillas es un proceso físico que se produce por capilaridad a través de las cubiertas seminales. Para ello el agua debe encontrarse disponible en el suelo, siendo poco relevante la cantidad de agua que la semilla pueda captar de la atmósfera circundante. La existencia de un exceso o déficit de agua impide, la germinación de las semillas, o por lo menos afecta negativamente a los porcentajes finales de germinación. Es prudente decir que el estrés hídrico es superado en algunas especies, mediante el desarrollo de mecanismos adaptativos que les permiten establecerse en esas condiciones adversas [2.10].

**Oxígeno:** El oxígeno llega al embrión disuelto en el agua, siendo imprescindible para que la germinación pueda tener lugar. Sólo, excepcionalmente, las semillas de algunas especies, sobre todo de plantas acuáticas, pueden llegar a germinar con bajas concentraciones de oxígeno.

**Temperatura:** Para cada especie existen rango de temperaturas dentro del cual puede tener lugar la germinación de sus semillas. Este rango queda definido por una temperatura máxima y una temperatura mínima para la germinación; considerándose como temperatura óptima de germinación, la temperatura, dentro del intervalo, más idónea para obtener el mayor porcentaje de semillas germinadas en el menor tiempo posible.

**Dormición:** La dormición es un estado fisiológico por el cual las semillas no son capaces de germinar aun cuando las condiciones ambientales sean favorables. Las causas de la dormición pueden radicar en las cubiertas seminales o en el embrión.

**Luz:** El efecto que las condiciones de iluminación tienen sobre las semillas permite clasificar a éstas en tres categorías:

- A. Semillas con foto-sensibilidad positiva. Son semillas que germinan preferentemente bajo iluminación.
- B. Semillas con foto-sensibilidad negativa. Son semillas que germinan preferentemente

en oscuridad, mientras que la iluminación inhibe su germinación.

- C. Semillas no fotosensibles. Son semillas que germinan independientemente de las condiciones de iluminación. Así, en las especies cuyas semillas se incluyen en la primera categoría (foto-sensibilidad positiva), la germinación no tiene lugar si están profundamente enterradas.

#### **2.2.4. - Efectos de estimulación mediante radiación electromagnética láser en las plantas**

Fitocromos: Los Foto-receptores son moléculas o complejos moleculares capaces de activarse por fotones de determinadas longitudes de onda y de esta forma dotar a los organismos de la capacidad para responder a estímulos lumínicos. Las plantas han desarrollado foto-receptores, que les permiten el monitoreo de su entorno a través de la detección de longitudes de ondas específicas. Por ejemplo, la familia de foto-receptores llamadas “fitocromos” es capaz de detectar radiación en el 600-750 nm. Los fitocromos se encuentran en semillas, hojas, tallos, raíces y demás órganos de la planta. Aparecen en dos configuraciones intercambiables, denominadas Pr (por sus siglas en inglés phytochrome red) y Pfr (por sus siglas en inglés phytochrome far-red). La forma Pr se encarga de la absorción de la luz roja y la forma Pfr de la roja lejana. Puesto que en los procesos fisiológicos la luz roja tiene un efecto activador y la roja lejana un efecto inhibitorio, Pfr se considera la forma biológicamente activa del fitocromo y Pr, la inactiva (Figura 2.15a). Esta última se aloja en el citoplasma, mientras que la forma activa (Pfr) se localiza preferentemente en el núcleo celular. Los Fitocromos tienen relación directa con el crecimiento y desarrollo de las plantas de manera reversible por la radiación rojo o rojo lejano.

La primera evidencia que sugirió que la luz roja tiene una participación en el desarrollo de las plantas, surgió en 1936 de los experimentos de Lewis Flint, fisiólogo vegetal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Flint observó que la germinación de semillas de lechuga se estimulaba con la luz roja y se inhibía con luz roja-lejana. Posteriormente, en los años 50, Borthwick et al. 1952, mediante ciclos alternados de luz roja y luz roja lejana determinaron que, en lechuga, casi el 100% de las semillas germinaron cuando recibieron luz roja como último tratamiento, en cambio la germinación fue inhibida drásticamente cuando las semillas recibieron luz roja-lejana como el último tratamiento. [2.13]. En 1959 el fitocromo fue identificado como una sola especie química por Butler et al [2.15], quienes confirmaron el modelo planteado por Borthwick (Borthwick et al. 1952) demostrando que este “fitocromo” era un compuesto presente en extractos de plantas y que presentaba propiedades foto-reversibles in vitro.



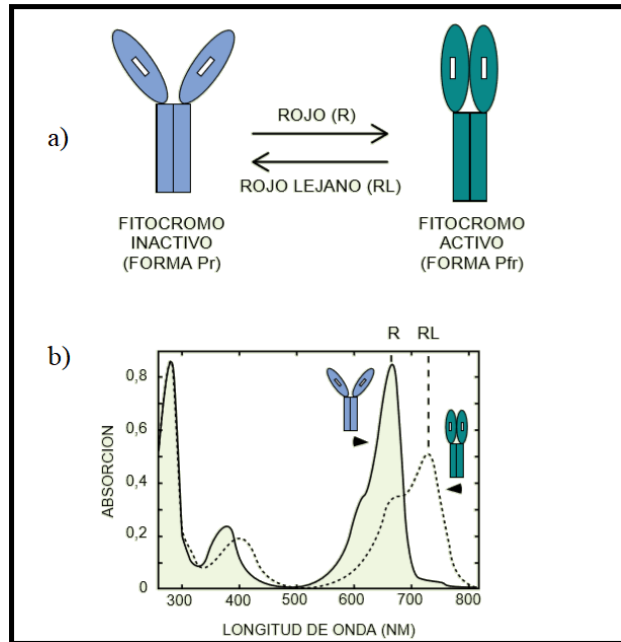


Figura 2.15. – Configuraciones del fitocromo [2.10].

Los Fitocromos son proteínas solubles y constituidas por dos subunidades idénticas de unos 1200 aminoácidos y 125 kilo-Dalton de masa molecular. El fitocromo existe en dos formas foto-convertibles: Pr, que absorbe luz roja (660 nm), y Pfr, que absorbe luz roja lejana (730 nm) (Figura 2.15b). Los fitocromos se sintetizan en la forma inactiva Pr; la absorción de luz roja produce un cambio reversible en la conformación de la proteína (acercamiento entre los extremos globulares de las dos subunidades del dímero) que la convierte a la forma activa Pfr. Esta última forma puede inactivarse y volver a la conformación Pr por la absorción de luz roja lejana. Los espectros de absorción de Pr y Pfr se solapan en buena parte, lo que significa que la forma activa (Pfr) coexiste siempre con la inactiva (Pr) en un foto-equilibrio que se establece en función de la proporción relativa de luz roja y roja lejana de la irradiación incidente.

El fitocromo controla los procesos fisiológicos vegetales siguientes [2.12]:

- Germinación de semillas
- Alargamiento de peciolo y entrenudos.
- Crecimiento de hojas.
- Formación de primordios foliares.
- Síntesis de clorofila y antocianinas.
- Floración.
- Formación de tubérculos.
- Diferenciación de estomas.

## **Capítulo III: Materiales y métodos.**

En el presente capítulo se muestran los materiales, equipos y la metodología necesarios para realizar la experimentación con semillas de tomate expuestas a radiación de luz láser roja. Se indica el tipo de semilla utilizada para realizar éste proyecto, así como la técnica utilizada para su selección. posteriormente se explica una técnica de envejecimiento inducido en semillas con la cual logramos deteriorar las semillas para posteriormente reactivarlas mediante la incidencia de radiación láser sobre las semillas. En seguida se definen los tratamientos láser que se aplican sobre las muestras utilizando un láser de diodo de 660nm de longitud de onda y una potencia de 200mW, definiendo la intensidad, el tiempo y el área óptima de trabajo. Finalmente se expone la metodología empleada para realizar pruebas en semillas bajo condiciones controladas en laboratorio.

### Capítulo III: Materiales y métodos.

#### 3.0. - Metodología:

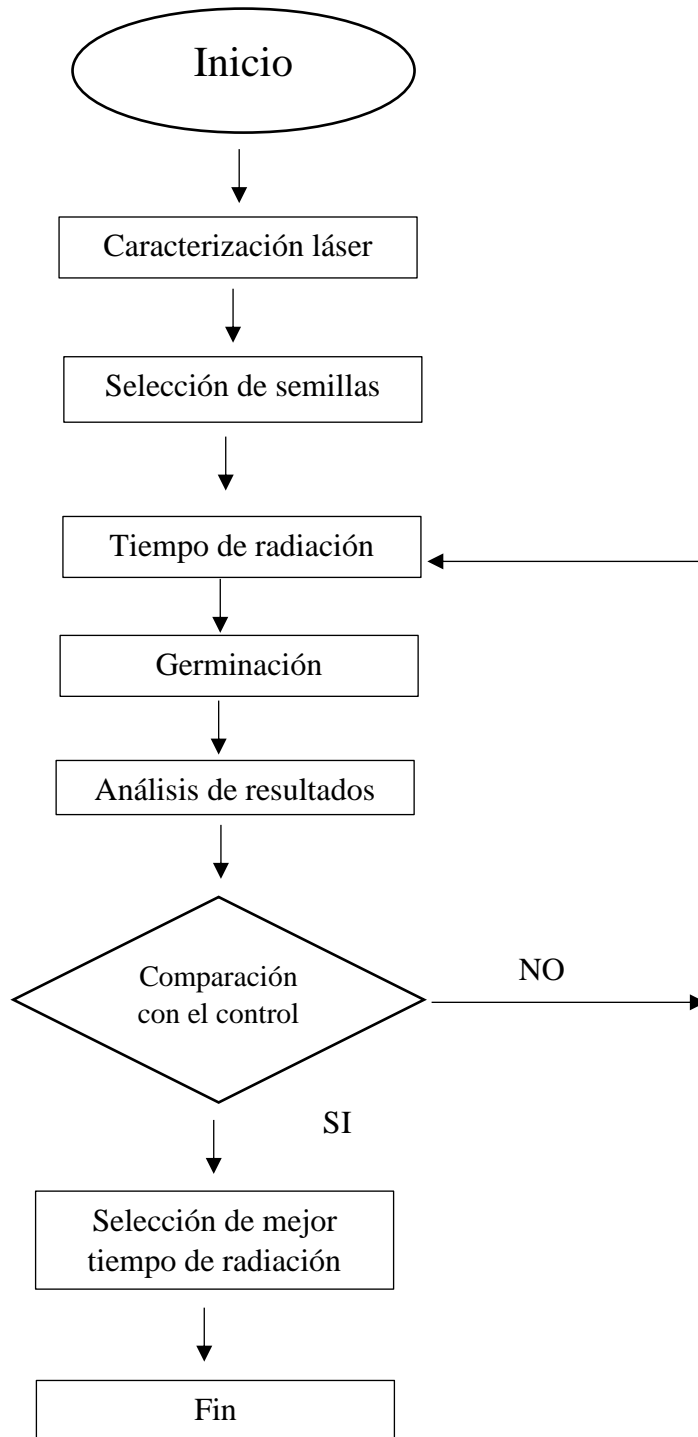


Figura 3.1.- Diagrama a bloques de la metodología utilizada en el proyecto.

### 3.1.- Equipo Láser de diodo.

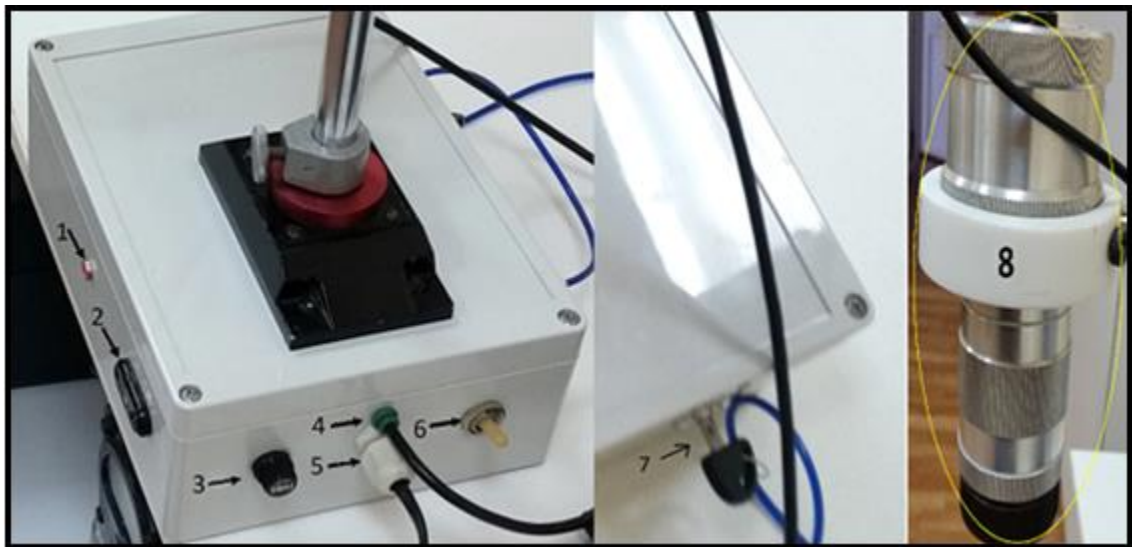
#### 3.1.1.- Descripción general del láser utilizado en el experimento.

Equipo láser para estimulación de semillas es un láser semiconductor con potencia de 200mW el cual está diseñado en cinco bloques fuente de poder, microcontrolador, laser, arreglo óptico e interfase gráfica. Tiene dos modos de funcionamiento mediante una activación manual y mediante el apoyo de una interfase láser-computadora con el apoyo de un software hace posible la activación y desactivación automática del láser, esto permite que los tiempos de exposición sean más certeros.

#### 3.1.2.- Partes que componen el equipo láser utilizado en el experimento:

1. Indicador de suministro de energía: Indica suministro de eléctrica.
2. Terminal a tierra: Se utiliza para polarizar el equipo a tierra en caso de ser necesario.
3. Fusible de seguridad: Es interruptor automático en caso de altos voltajes.
4. Cable para suministro eléctrico a Láser VDC.
5. Cable de suministro de energía eléctrica 110 VAC.
6. Interruptor eléctrico.
7. Selector de modo de funcionamiento:
  - a. Apagado
  - b. Encendido
8. Láser y Óptica.

Imagen 3.1.- Equipo láser utilizado en el experimento.



### 3.2. – Caracterización y selección de densidad de radiación láser:

Para calibrar la densidad de radiación y la selección de área óptima de trabajo se utilizó un medidor de potencia láser marca Ophir modelo 7Z01560 y un filtro de  $1 \text{ cm}^2$  modelo PD300-UV, se analizó la densidad de radiación definiendo un círculo de radio 4.5 cm el cual se dividió en 4 zonas S1(zona 1), S2(zona 2), S3(zona 3), S4(zona 4), se realizaron mediciones de densidad de radiación en diferentes puntos dentro de las zonas para posteriormente calcular valores promedio y determinar el margen de error.

Valor promedio en puntos  $\otimes$  =  $2.05 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Valor promedio en puntos  $\otimes$  =  $2.02 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Valor promedio en puntos  $\otimes$  =  $2.00 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Valor promedio en puntos  $\otimes$  =  $1.95 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$

Valor promedio general =  $2.00 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , Con un error de 4.8 %

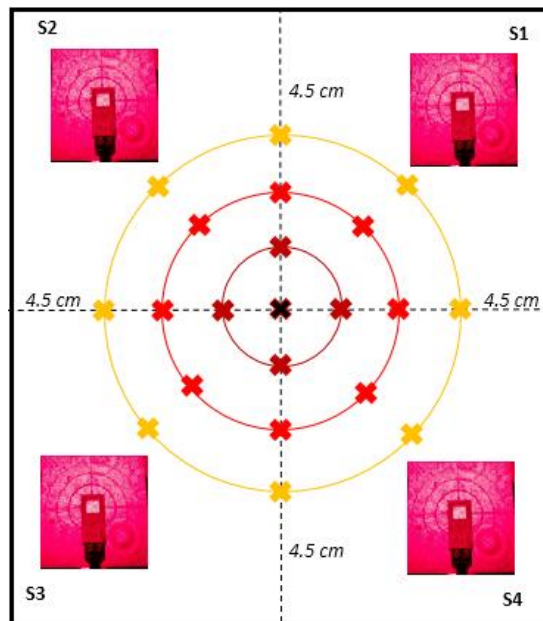


Figura 3.2.- Calibración de densidad de radiación

Por lo tanto nuestra área de trabajo estará definida por un círculo de 9 cm de diámetro y con una densidad de radiación de  $2 \frac{\text{W}}{\text{M}^2}$  con un error de 4.8 % .

### 3.3. - Experimentación con semillas de tomate variedad Orange (*Lycopersicon esculentum*) en laboratorio

#### 3.3.1. - Descripción general de las semillas utilizadas en el experimento:

Las semillas de tomate variedad Orange (*Lycopersicon esculentum*) utilizadas en este trabajo fueron producidas en el año 2007 por tanto tienen una edad aproximada de 11 años, durante los cuales se mantuvo en almacenamiento con una temperatura en un rango aproximado de 0 a 23°C y un porcentaje de humedad relativo de 25 %.

#### 3.3.2. - Selección de semillas

Para la selección de semillas nos basamos en lo estipulado en ISTA 2017 [3.2] (Reglas internacionales para la prueba de semillas) [3.2], de un lote de 500 gramos de semillas de tomate se tomaron arbitrariamente 10 grupos de 100 semillas y se midió su peso, se realizó una prueba de heterogeneidad para lotes de semillas en múltiples contenedores, La pruebas de heterogeneidad para lotes de semillas en múltiples contenedores tiene como objetivo detectar la presencia de heterogeneidad, lo que hace que el lote de semillas sea técnicamente inaceptable para el muestreo (Para nuestro experimento las ISTA marcan un nivel máximo de heterogeneidad de 1.6).

Para la obtención del peso de cada grupo se utilizó una pesa calibrada marca AND modelo DL-300 y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 3.1.- Peso de las muestras de semillas utilizadas en el proyecto.

Muestra de 100 semillas	Peso en gramos
1	0.245
2	0.248
3	0.244
4	0.243
5	0.247
6	0.249
7	0.247
8	0.244
9	0.246
10	0.246

### 3.3.3. - Prueba de heterogeneidad

El análisis de heterogeneidad que nos muestra que tan heterogénea es nuestra muestra ayudándonos a que nuestro experimento pueda mostrar resultados equivalentes entre cada uno de nuestros reactivos a analizar. Para realizar este cálculo definiremos las siguientes variables:

Media ( $x$ ): Se obtiene a partir de la suma de todos valores analizados dividida entre el número de sumandos.

Desviación estándar ( $\mathcal{S}$ ): Es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio

Prueba de atributos adoptados ( $\mathcal{X}$ ): sumatoria de todas las medias obtenidas en cada muestra divididas por el número de muestras.

Número de muestras ( $N$ ): Numero de muestras para la selección de semillas.

Número de semillas por muestra ( $n$ ): Numero de semillas por muestra.

Factor ( $f$ ): Factor para multiplicar la varianza teórica para obtener la varianza aceptable.

Varianza teórica ( $\mathcal{W}$ ): varianza teórica.

Varianza aceptable ( $\mathcal{V}$ ): varianza aceptable para determinar aceptable para nuestro experimento.

Heterogeneidad( $\mathcal{H}$ ): factor que de termina qué tan heterogénea es la muestra.

$$x = 0.2459 \quad 3.1$$

$$\mathcal{S} = 0.00191195 \quad 3.2$$

$$\mathcal{X} = \frac{\sum x}{N} = \frac{2.459}{10} = 0.2459 \quad \text{Ec. 3.3}$$

$$\mathcal{W} = \frac{\mathcal{X}(100 - \mathcal{X})}{n} \cdot f = \frac{0.2459(100 - 0.2459)}{100} \cdot (1.2) = 0.2943 \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$\mathcal{V} = \frac{N \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2}{N(N - 1)} = \frac{10 \cdot (0.6047) - 6.0466}{10(10 - 1)} = 4.555 \times 10^{-6} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$\mathcal{H} = \frac{\mathcal{V}}{\mathcal{W}} = \frac{4.555 e^{-6}}{0.2943} - 1.2 = -1.1999 \quad \text{Ec. 3.6}$$

Los valores negativos de  $\mathcal{H}$  son reportados como “0”.

Según los requerimientos que marca ISTA el valor máximo que puede tomar  $\mathcal{H}$  es igual a 1.69. En nuestro experimento nuestro valor de  $\mathcal{H} = 0$  por lo tanto nuestro experimento cumple con lo estipulado en ISTA para la selección de semillas.

$$0 < 1.69$$

3.7

### 3.3.4. - Coeficiente de variación

Para realizar este cálculo definiremos las siguientes variables:

Media ( $\bar{x}$ ): Se obtiene a partir de la suma de todos valores analizados dividida entre el número de sumandos.

Desviación estándar ( $S$ ): Es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio

Se calculó el coeficiente de variación entre las muestras, se encontró un coeficiente de variación con un valor de .77%. Esto indica que el lote de semillas con el que se está trabajando cumple con los requerimientos necesarios para trabajar con semillas.

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$CV = \frac{0.00191195}{0.2459} * 100 = 0.77753 \quad 3.9$$

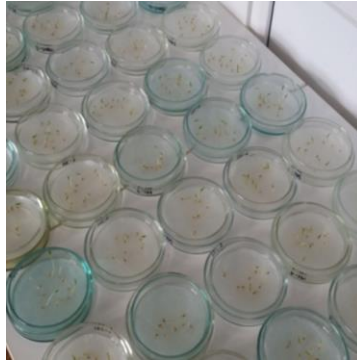


### 3.4. - Radiación láser y germinación:

Se trabajó con una densidad de radiación de  $2 \text{ WM}^2$  en un área de trabajo circular con un diámetro de 9 cm, la germinación se llevó a cabo en cajas de Petri utilizando como sustrato una hoja de papel de filtro.

1. Se tomaron cajas de Petri previamente esterilizadas utilizando una autoclave.
2. Se agregó en el fondo una hoja de papel de filtro.
3. Se colocaron 10 semillas distribuidas de manera homogénea dentro de la caja de Petri.
4. Se agregó 2 ml de agua.
5. Se dejaron en remojo por un lapso de 2 horas para ablandar la cascara.
6. Se procedió a la radiación laser.
  - a. Se apagó la luz de la habitación.
  - b. Se midió y se reguló la densidad de potencia del laser
  - c. Se procedió con la radiación
7. Se colocaron en una superficie plana, en un cuarto con una iluminación controlada.
  - a. Condiciones de iluminación de 330 Lux en el día y cero en la noche.
  - b. Temperatura promedio durante el día  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y durante la noche  $15^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .
  - c. Se agregó en promedio una dosis de .85 ml por día agua durante los primeros 7 días.
8. Se monitorearon en un lapso de 10 días y se analizó la germinación y crecimiento de la planta.

Imagen 3.2.- Semillas en cajas de Petri puestas a germinar después de la radiación láser.



### 3.5. - Inducción de envejecimiento en semillas de tomate de variedad Orange producidas el año 2007.

A continuación, se muestra la técnica que se utilizó para inducir un envejecimiento en semillas de tomate de acuerdo a lo expuesto por Fontana, Et al [3.1]:

1. Se contabilizaron 4 grupos de semillas de 250 y se colocaron en una caja de Petri sobre una hoja de papel filtro, tomando en cuenta que tengan una distribución uniforme.
2. Se regulo un termostato a 50 grados centígrados y humedad relativa de 80%.

Imagen 3.3.- Inducción de envejecimiento en semillas.



3. Se mantuvo con las mismas condiciones de temperatura y humedad durante 24 horas.
4. Se sacaron del termostato y se mantuvieron una hora en temperatura ambiente para que se acondicionaran a temperatura ambiente.
5. Se encuentran listas para el experimento.

### 3.6. - Definición de tratamientos láser

#### 3.6.1. - Experimento 1.- Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007:

Tabla 3.2.- Tratamiento láser en experimento 1.

Semillas 2007	
Densidad de radiación (W/m <sup>2</sup> )	Tiempo de exposición (en segundos)
2	<b>0</b>
2	<b>1</b>
2	<b>5</b>
2	<b>15</b>
2	<b>30</b>
2	<b>60</b>
2	<b>120</b>
2	<b>240</b>
2	<b>480</b>

#### 3.6.2. - Experimento 2.- Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 con 21 horas de envejecimiento:

Tabla 3.3.- Tratamiento láser en experimento 2.

Semillas 2007 con 21 horas de calor húmedo	
Densidad de radiación (W/m <sup>2</sup> )	Tiempo de exposición (en segundos)
2	<b>0</b>
2	<b>30</b>
2	<b>60</b>
2	<b>120</b>
2	<b>240</b>
2	<b>480</b>

### **3.7. - Definición de etapas de análisis:**

#### **3.7.1. - Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007:**

Análisis de germinación:

Para el análisis de germinación se tomaron dos factores importantes la velocidad de germinación y la homogeneidad de germinación en las muestras.

Análisis de crecimiento:

Para el análisis de crecimiento se analizó el crecimiento de la plántula.

#### **3.7.2. - Semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 con 21 hr. De envejecimiento:**

Análisis de germinación:

Para el análisis de germinación se tomaron dos factores importantes la velocidad de germinación y la homogeneidad de germinación en las muestras.

Análisis de crecimiento:

Para el análisis de crecimiento se analizó el crecimiento del tallo, raíz y plántula.

## Capítulo IV: Análisis de resultados

*En el presente capítulo se muestran un análisis de los resultados obtenidos en el experimento, en los cuales podemos observar los efectos producidos por la radiación laser de diodo 660nm en semillas de tomate. El primer análisis se realizó con semillas de tomate Orange producidas en el año 2007, las mediciones se realizaron a las 144, 168 y 192 horas después de iniciado el experimento, tomando como referencia que inicio el experimento una vez terminado el proceso de radiación láser. Se analizaron los índices de germinación y crecimiento de las plántulas por tratamiento y se representaron en porcentajes. El segundo análisis se realizó con semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 21 hr. De envejecimiento inducido, las mediciones se realizaron a las 144, 168 y 192 horas después de iniciado el experimento, tomando como referencia que inicio el experimento una vez terminado el proceso de radiación láser. Se analizaron los índices de germinación y crecimiento de las raíces, tallo y plántulas por tratamiento. Los resultados se representaron gráficamente.*

**Parte I: Semillas de tomate Orange  
producidas en el año 2007:**

#### 4.1.1. - Comparación y análisis de los índices de germinación.

Los índices de germinación en una medición a 192 horas de experimentación muestran los siguientes resultados: El control (0 segundos), se encontró una germinación del 94% con un error de 2.7%. Los tiempos de exposición 120 y 480 segundos reflejan una mejoría con una germinación del 100%, esto representa un 6% de estímulo positivo. Se observó que con estos tiramientos se redujeron los tiempos de germinación logrando un 100% de germinación en un tiempo de 144 horas, comparando con el control obtenemos un 33% aproximado de mejoría.

Tabla 4.1.- Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación

Análisis de germinación										
T. Exp.	Tiempo radiación de en segundos	* 0	1	5	15	30	60	** 120	240	*** 480
144 horas	Germinación	92	96	96	96	92	90	100	98	100
	<b>Error típico</b>	3.88	2.79	2.79	2.79	3.87	4.28	0	2	0
168 horas	Germinación	94	96	98	98	96	92	100	98	100
	<b>Error típico</b>	3.39	2.79	2	2	2.79	3.87	0	2	0
192 horas	Germinación	94	96	98	98	96	92	100	98	100
	<b>Error típico</b>	3.39	2.79	2	2	2.79	3.87	0	2	0

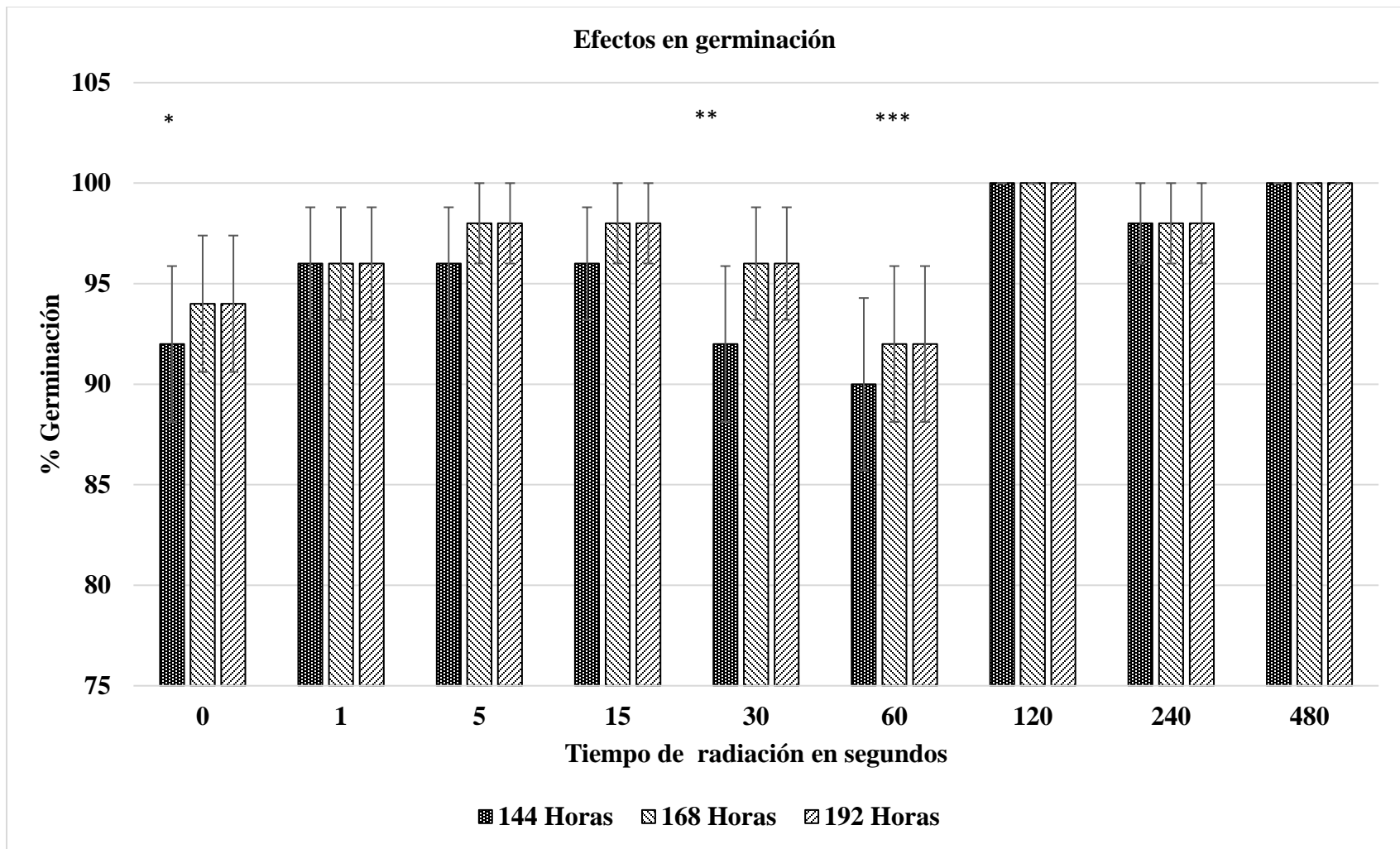


Figura 4.1. – Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).



#### 4.1.2. - Comparación y análisis de los niveles de crecimiento de las plántulas.

Crecimiento de plántula en una medición a 192 horas de experimentación, muestran los siguientes resultados: El control (0 segundos de exposición) mostro un crecimiento de 19.2 mm con un error de 1.68, se compararon los resultados obtenidos en los diferentes tiempos de exposición y se encontró que con un tiempo de 120 segundos hay un crecimiento 23.82 mm y un error de 0.94, esto representa un 23.8% de estímulo positivo.

Tabla 4.2.- Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación.

Análisis de crecimiento de plántula										
T. Exp.	Tiempo de radiación en segundos	*						**		
		0	1	5	15	30	60	120	240	480
144 horas	Germinación	10.3	10.7	9.38	9.4	12.52	11.6	12.6	11.1	11.14
	<b>Error típico</b>	1.14	1.25	0.94	1.02	1.329	1.42	1.193	1.21	1.073
168 horas	Germinación	13.7	13.4	14.18	13.9	15.9	15.3	16.16	15.1	14.72
	<b>Error típico</b>	1.35	1.12	1.022	1.08	1.251	1.44	0.909	1.2	1.045
192 horas	Germinación	19.2	20.9	20.72	18.7	21.8	20.3	23.82	19.6	20.56
	<b>Error típico</b>	1.68	1.34	1.15	1.2	1.48	1.62	0.94	1.26	1.163

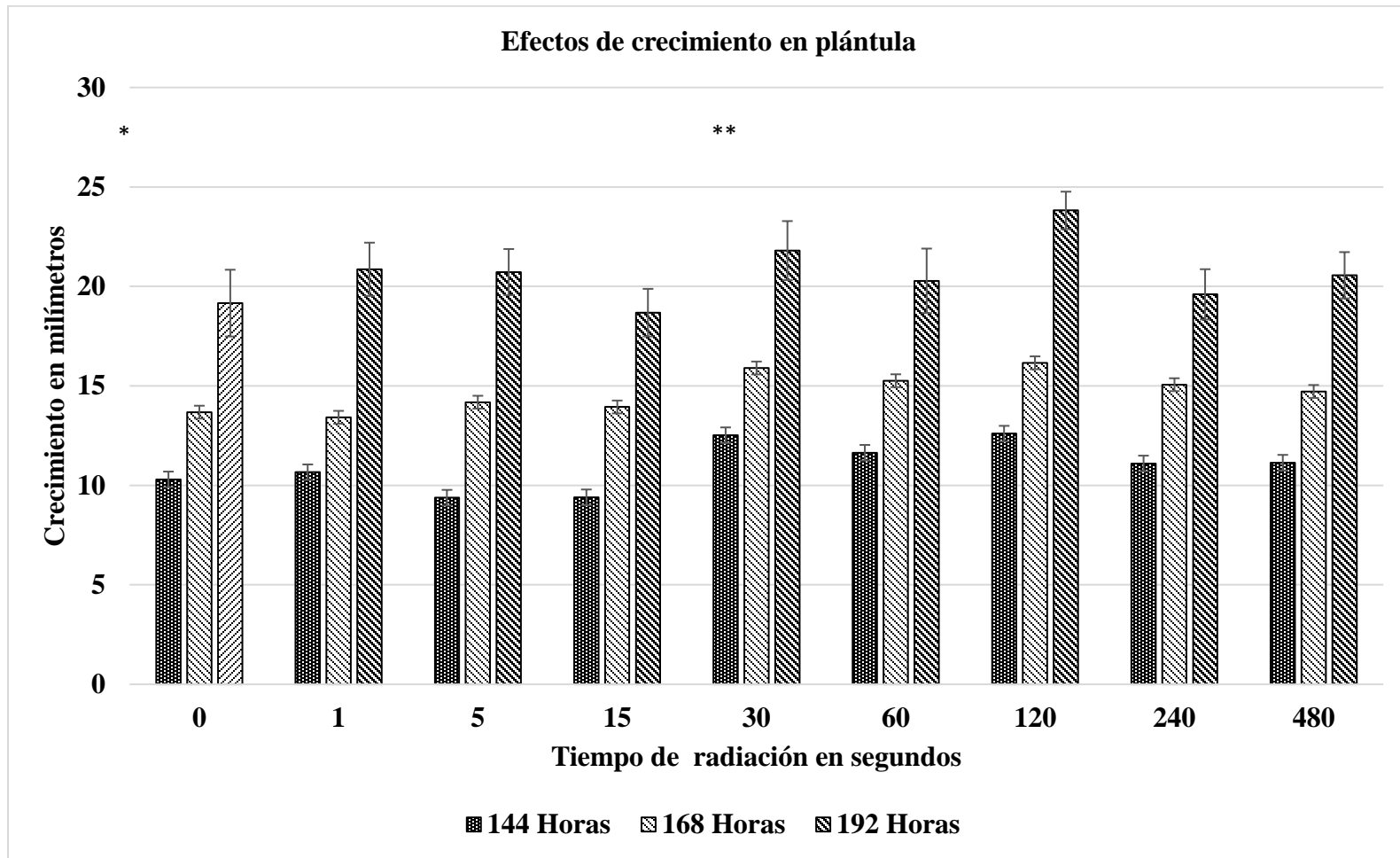


Figura 4.2. - Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).

#### 4.1.3. Comparación y análisis visual de entre los tratamientos con 120 y 0 segundos de exposición a 192 horas de tiempo de experimentación:

Comparamos la técnica de 120 segundos de exposición a una densidad de radiación de  $2 \frac{W}{M^2}$  respecto a una con cero segundos de exposición, podemos observar con el tratamiento de 120 segundos una mejoría en uniformidad de crecimiento entre el sistema radicular y del tallo, en cambio con cero segundos de radiación podemos observar un crecimiento en el sistema radicular y tallo no uniforme.

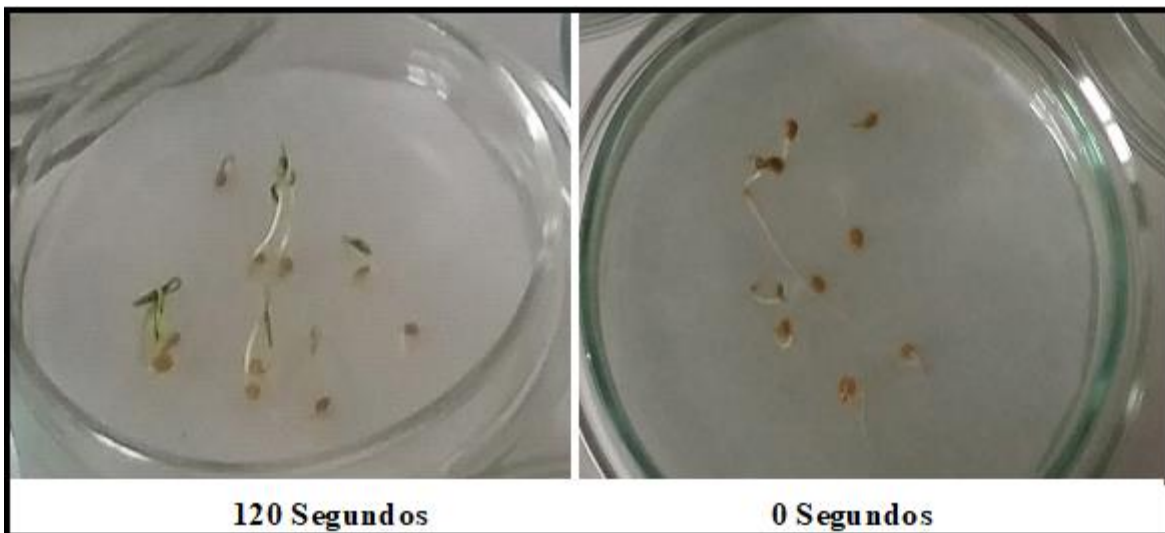


Figura 4.3. – Fotografía comparativa con dos tiempos de irradiación en un tiempo de experimentación de 192 horas.

#### 4.1.4. - Análisis de germinación y crecimiento a 192 horas de tiempo de experimentación:

##### 4.1.4.1. - Efectos de estímulo en germinación

El siguiente análisis muestra el porcentaje de estimulación en la germinación de las plantas de tomate. Los efectos positivos mayores se observaron con el tiempo de exposición de 120 y 480 segundos logrando un 6.4 % de estimulación más respecto al control.

Tabla 4.3.- Efectos de estímulo en germinación.

Tiempo de radiación en segundos	*						**		**
	0	1	5	15	30	60	120	240	480
% Estimulo	100	102.1	104.2	104.2	102.1	97.8	106.3	104.2	106.3

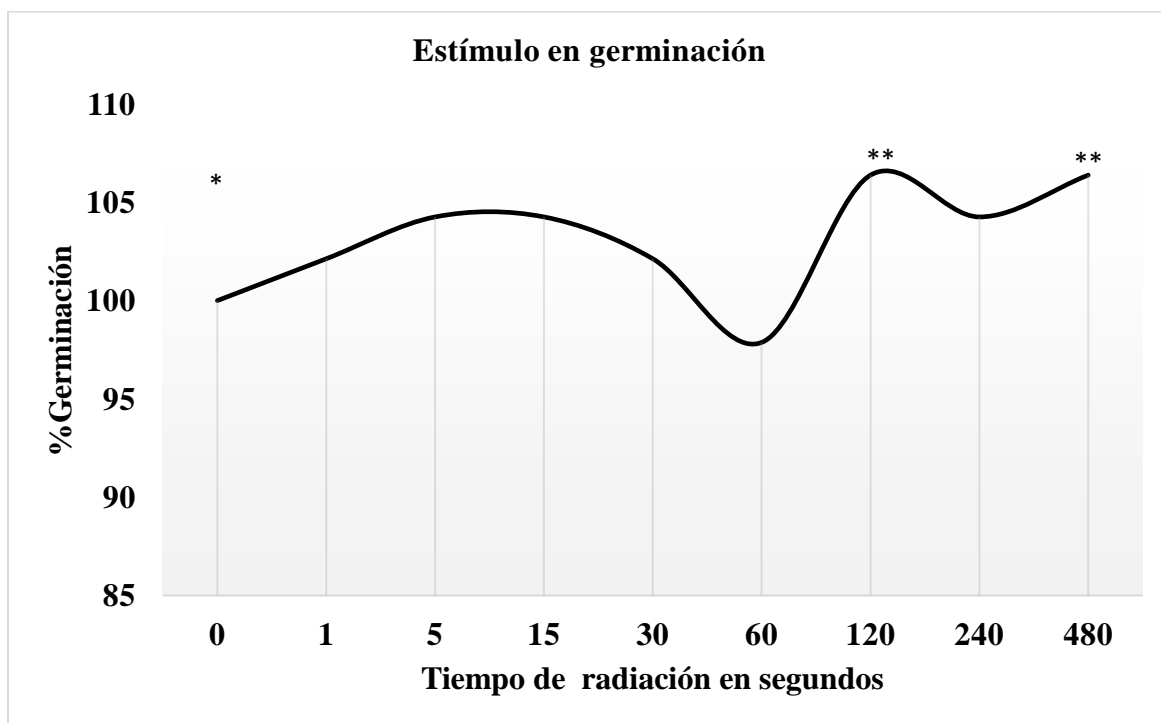


Figura 4.4.- Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.

#### 4.1.4. 2.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula.

El siguiente análisis muestra el porcentaje de estimulación en el crecimiento de las plantas de tomate. Los efectos positivos mayores se observaron con el tiempo de exposición de 120 segundos logrando un 24.3% de mejoría respecto al control. Por otra parte, con un tiempo de exposición de 15 segundos encontramos un efecto que frena el crecimiento en un 2.5%.

Tabla 4.4.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula.

Tiempo de radiación en segundos	*						**		
	0	1	5	15	30	60	120	240	480
% Estimulo	100	108.8	108.1	97.4	113.7	105.8	124.3	102.2	107.3

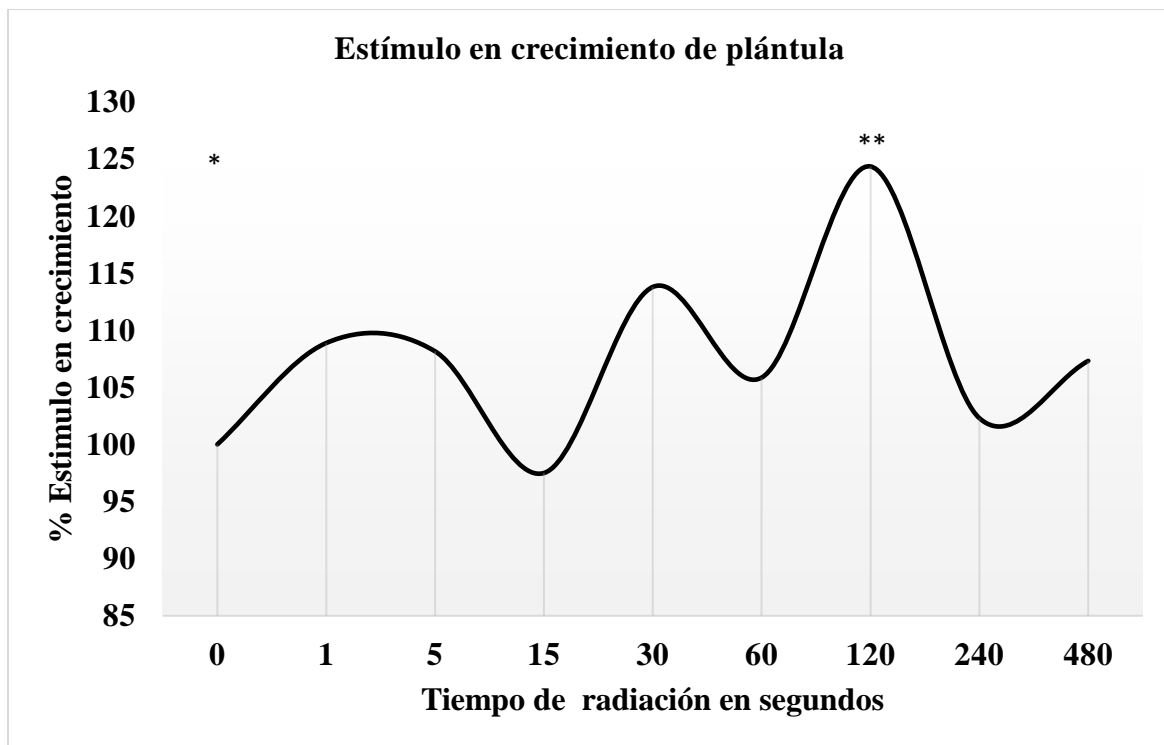


Figura 4.5. - Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación

**Parte II: Semillas de tomate Orange  
producidas en el año 2007 con 21 horas  
de envejecimiento:**

#### 4.2.1. - Comparación y análisis de los porcentajes de germinación.

Los índices de germinación en una medición a 192 horas de experimentación muestran los siguientes resultados: El control (0 segundos), se encontró una germinación del 32% con un error de 6.6%. El tiempo de exposición 60 segundos reflejan una mejoría con una germinación del 61%, esto representa un 90.6% de estímulo positivo.

Tabla 4.5.- Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación.

Análisis de germinación							
Tiempo de experimentación	Tiempo de radiación en segundos	* 0	30	** 60	120	240	480
144 horas	Germinación	26	18	50	18	24	28
	<b>Error típico</b>	6.2	5.4	7.1	5.4	6.1	6.4
168 horas	Germinación	32	24	52	22	34	34
	<b>Error típico</b>	6.6	6.1	7.1	6.5	6.7	6.7
192 horas	Germinación	32	28	61	22	36	36
	<b>Error típico</b>	6.6	6.4	5.9	6.5	6.8	6.8

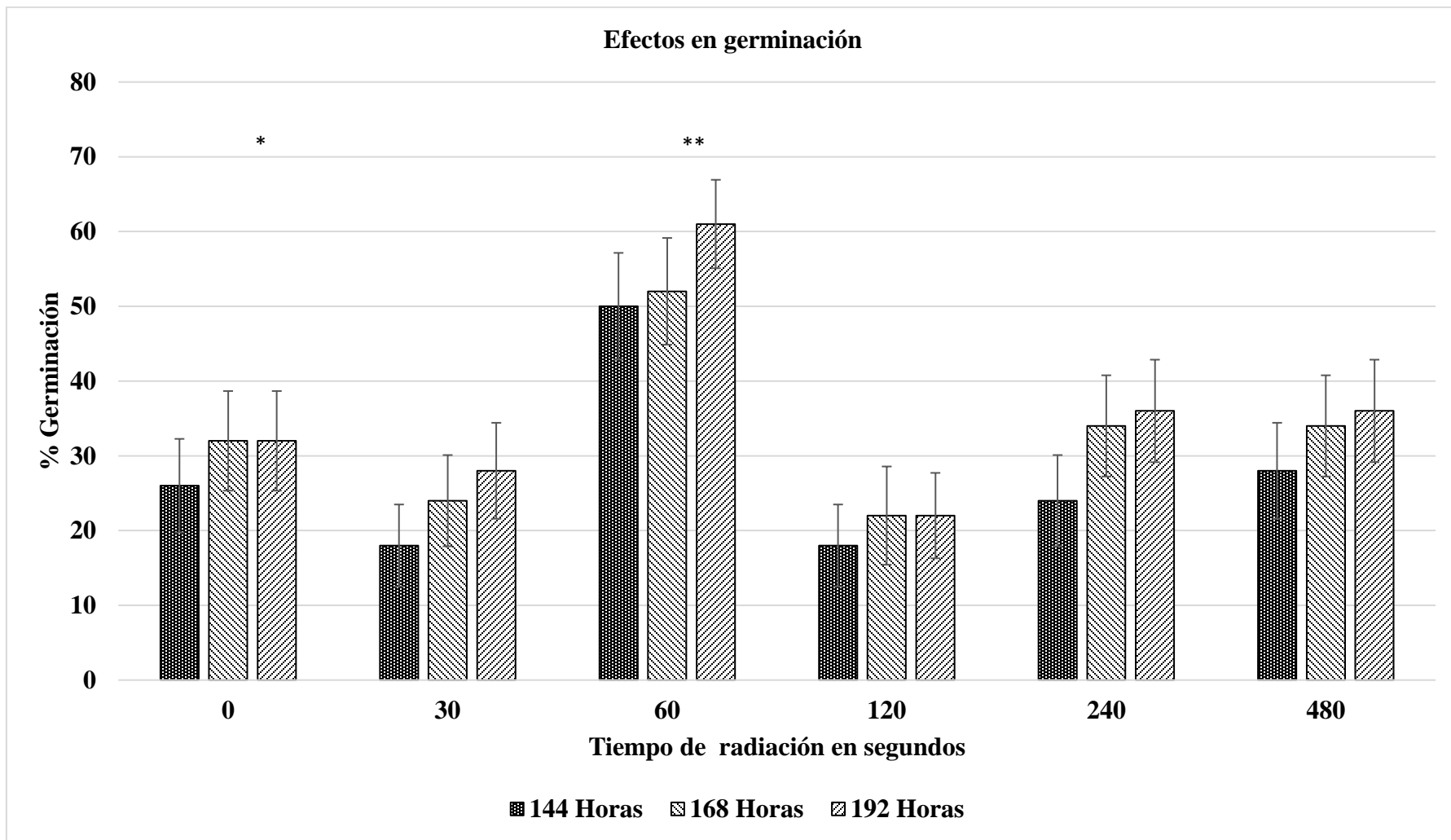


Figura 4.6. - Efectos en germinación a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).



#### 4.2.2. - Comparación y análisis de los niveles de crecimiento de las plántulas.

Crecimiento de plántula en una medición a 192 horas de experimentación, muestran los siguientes resultados: El control (0 segundos de exposición) mostro un crecimiento de 1.50 mm con un error de 0.38, se compararon los resultados obtenidos en los diferentes tiempos de exposición y se encontró que con un tiempo de 60 segundos hay un crecimiento 1.91 mm y un error de 0.24, esto representa un 26.7 % de estímulo positivo.

Tabla 4.6.- Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación.

Análisis de crecimiento de planta							
Tiempo de experimentación	Tiempo de radiación en segundos	*		**			
		0	30	60	120	240	480
144 horas	Medidas (mm)	4.50	1.90	6.40	3.20	3.20	3.90
	<b>Error típico</b>	1.40	0.70	1.20	1.30	1.00	1.00
168 horas	Medidas (mm)	8.30	3.80	10.90	5.70	7.00	7.30
	<b>Error típico</b>	2.30	1.20	1.90	2.10	1.90	1.70
192 horas	Medidas (mm)	15.0	7.80	19.10	7.50	10.7	11.5
	<b>Error típico</b>	3.80	2.20	2.90	2.60	2.60	2.50

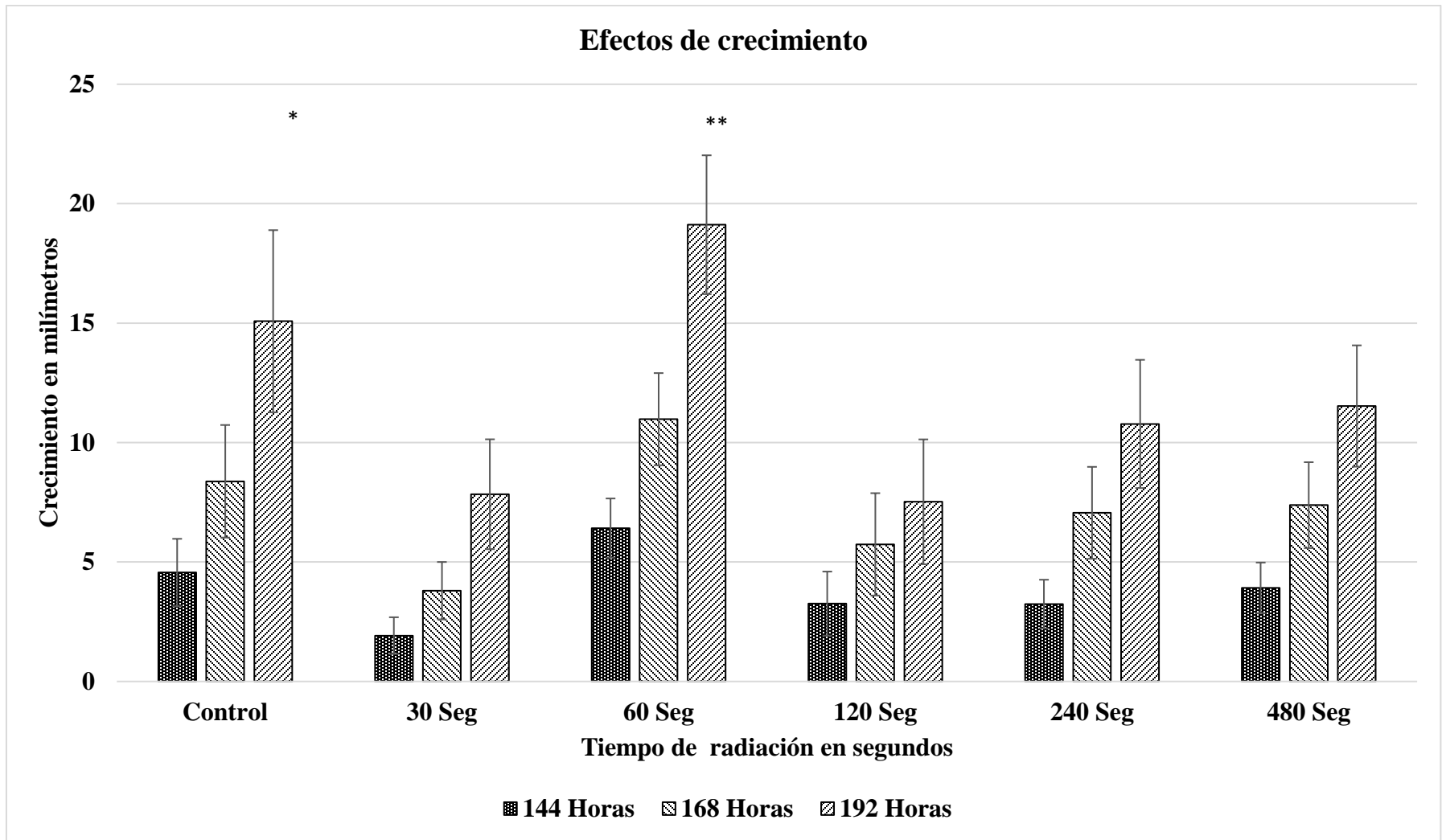


Figura 4.7. - Efectos de crecimiento en plántula a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).

#### 4.2.3. - Comparación y análisis de los niveles del Tallo de las plántulas.

Crecimiento de tallo en una medición a 192 horas de experimentación, muestran los siguientes resultados: El control (0 segundos de exposición) mostro un crecimiento de 6.66 mm con un error de 1.77, se compararon los resultados obtenidos en los diferentes tiempos de exposición y se encontró que con un tiempo de 60 segundos hay un crecimiento 8.32 mm y un error de 1.56, esto representa un 26.7 % de estímulo positivo.

Tabla 4.7.- Efectos de crecimiento en tallo a diferentes tiempos de experimentación.

Crecimiento de Tallo							
Tiempo de experimentación	Tiempo de radiación en segundos	*		**			
		<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>240</b>	<b>480</b>
144 horas	Medidas (mm)	1.68	1.02	3.26	1.44	1.84	1.80
	<b>Error típico</b>	0.59	0.47	0.68	0.61	0.67	0.52
168 horas	Medidas (mm)	3.74	1.96	6.52	2.64	3.30	3.82
	<b>Error típico</b>	1.10	0.70	1.16	1.00	0.96	0.96
192 horas	Medidas (mm)	6.66	3.02	8.32	2.82	3.74	4.00
	<b>Error típico</b>	1.77	1.04	1.56	1.07	1.12	0.98

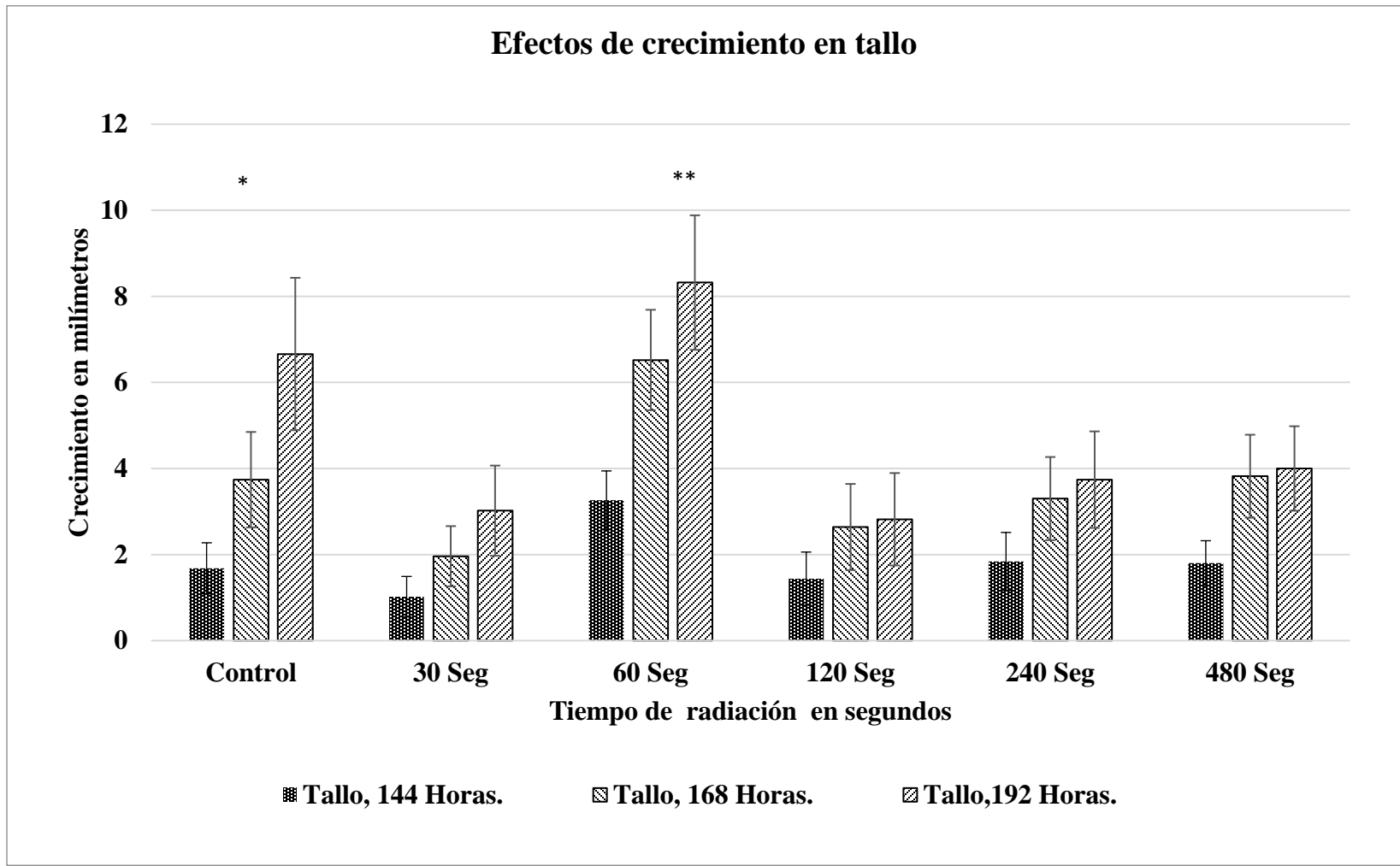


Figura 4.8. - Efectos de crecimiento en tallo a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).

**4.2.4. - Comparación y análisis de los niveles de crecimiento de la radícula en las plántulas.**

Crecimiento de radícula en una medición a 192 horas de experimentación, muestran los siguientes resultados: El control (0 segundos de exposición) mostro un crecimiento de 8.42 mm con un error de 2.13, se compararon los resultados obtenidos en los diferentes tiempos de exposición y se encontró que con un tiempo de 60 segundos hay un crecimiento 10.8 mm y un error de 1.50, esto representa un 28.57 % de estímulo positivo

Tabla 4.8.- Efectos de crecimiento en radícula a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).

<b>Crecimiento de radícula</b>							
Tiempo de experimentación	Tiempo de radiación en segundos	*		**			
		<b>0</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>120</b>	<b>240</b>	<b>480</b>
144 horas	Medidas (mm)	2.88	0.9	3.16	1.82	1.4	2.12
	<b>Error típico</b>	0.84	0.326	0.642	0.751	0.412	0.596
168 horas	Medidas (mm)	4.64	1.84	4.46	3.1	3.76	3.56
	<b>Error típico</b>	1.28	0.544	0.868	1.171	1.024	0.903
192 horas	Medidas (mm)	8.42	4.66	10.8	4.7	7.04	7.3
	<b>Error típico</b>	2.133	1.305	1.508	1.566	1.677	1.675

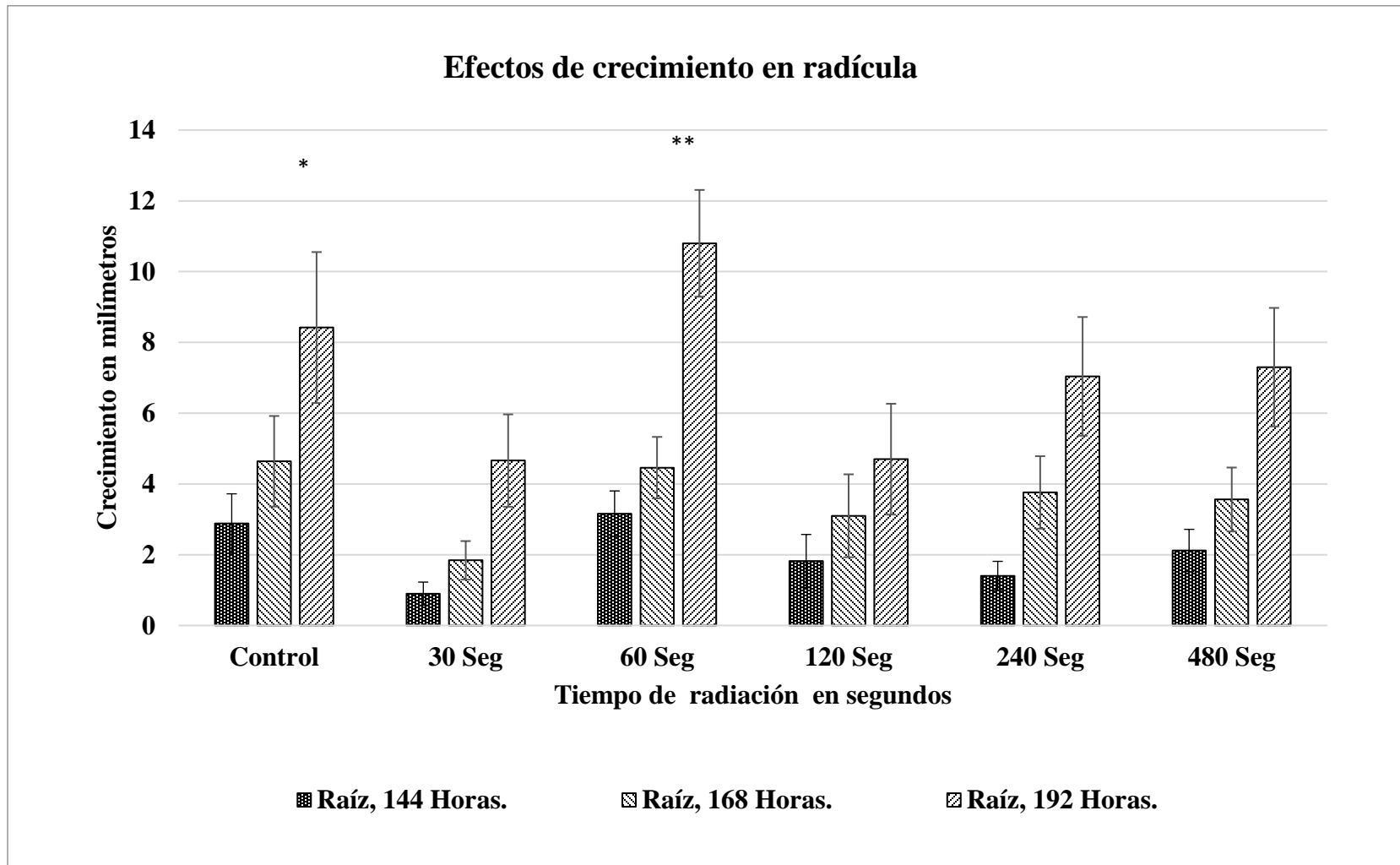


Figura 4.9. - Efectos de crecimiento en radícula a diferentes tiempos de experimentación (144, 168 y 192 horas).

**4.2.5. - Comparación y análisis visual de entre los tratamientos con 60 y 0 segundos de exposición a 144 horas de tiempo de experimentación:**

Comparamos la técnica de 60 segundos de exposición a una densidad de radiación de 2 W/M<sup>2</sup> respecto a una con cero segundos de exposición, podemos observar con el tratamiento de 60 segundos cómo se desactiva la latencia en el proceso de germinación, recuperando un 70% de las semillas envejecidas, en cambio con cero segundos de radiación aún hay 0% de germinación en algunas muestras.

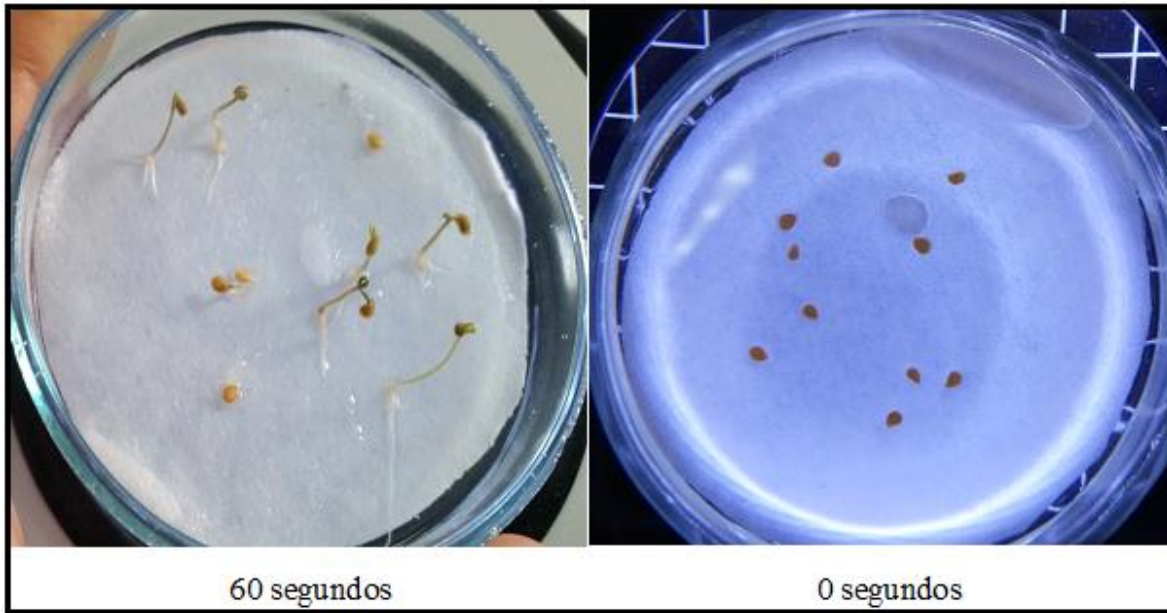


Figura 4.10. – Fotografía comparativa con dos tiempos de irradiación en un tiempo de experimentación de 144 horas.

#### 4.2.6. - Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.

El siguiente análisis muestra el porcentaje de estimulación en la germinación de las plantas de tomate. Los efectos positivos mayores se observaron con el tiempo de exposición de 60, 240 y 480 segundos logrando un efecto positivo máximo de 143.5% de estimulación respecto al control.

Tabla 4.9.- Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.

Tiempo de radiación en segundos	*		**			
	0	30	60	120	240	480
% Estimulo	100	87.50	190.6	62.50	112.50	112.50

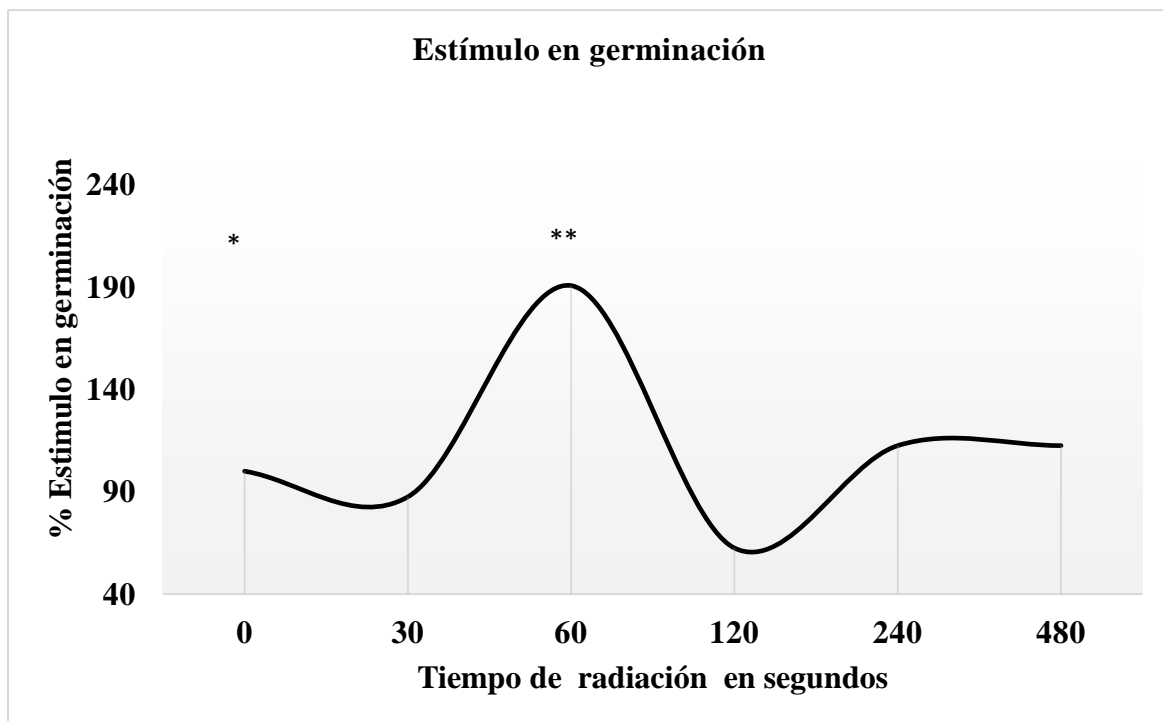


Figura 4.11.- Efectos de estímulo en germinación a 192 horas de germinación.



#### 4.2.7. – Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.

El siguiente análisis muestra el porcentaje de estimulación en el crecimiento de las plantas de tomate. Los efectos positivos mayores se observaron con el tiempo de exposición de 60 segundos logrando un 126.8% de mejoría respecto al control. Por otra parte, con un tiempo de exposición de 15, 30, 120, 240, 480 segundos encontramos un efecto que frena el crecimiento.

Tabla 4.10.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.

Tiempo de radiación en segundos	*		**			
	0	30	60	120	240	480
% Estimulo	100	51.9	126.7	49.8	71.4	76.4

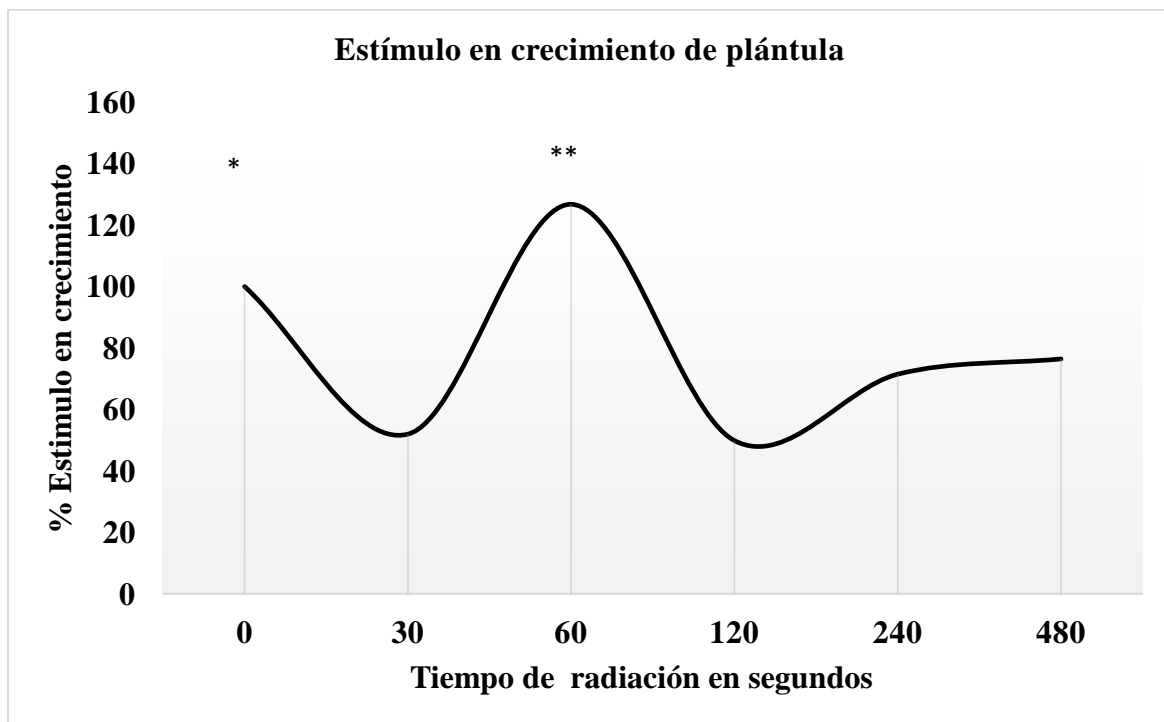


Figura 4.12.- Efectos de estímulo en crecimiento de plántula a 192 horas de experimentación.

#### 4.2.8. - Efectos de estímulo en crecimiento de tallo a 192 horas de experimentación

El siguiente análisis muestra el porcentaje de estimulación en el crecimiento del tallo en las plántulas de tomate. Los efectos positivos mayores se observaron con el tiempo de exposición de 60 segundos logrando un 124% de mejoría respecto al control. Por otra parte, con un tiempo de exposición de 15, 30, 120, 240, 480 segundos encontramos un efecto que frena el crecimiento respecto al control.

Tabla 4.11.- Efectos de estímulo en crecimiento de tallo a 192 horas de experimentación.

Tiempo de radiación en segundos	*		**			
	0	30	60	120	240	480
% Estimulo	100	45	124	42	56	60

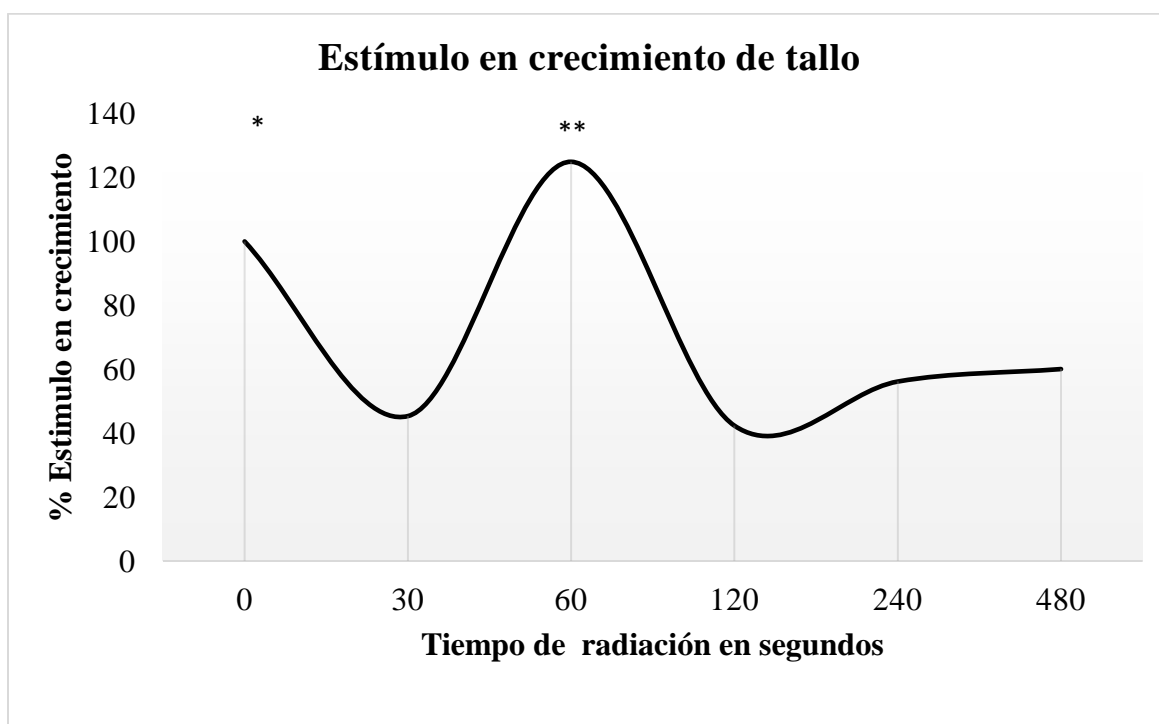


Figura 4.13.- Efectos de estímulo en crecimiento de tallo a 192 horas de experimentación.

#### 4.2.9.- Efectos de estímulo en crecimiento de radícula a 192 horas de experimentación

El siguiente análisis muestra el porcentaje de estimulación en el crecimiento de la raíz en las plántulas de tomate. Los efectos positivos mayores se observaron con el tiempo de exposición de 60 segundos logrando un 128% de mejoría respecto al control. Por otra parte, con un tiempo de exposición de 15, 30, 120, 240, 480 segundos encontramos un efecto que frena el crecimiento respecto al control.

Tabla 4.12.- Efectos de estímulo en crecimiento de radícula a 192 horas de experimentación

Tiempo de radiación en segundos	*		**			
	0	30	60	120	240	480
% Estimulo	100	55	128	55	83	86

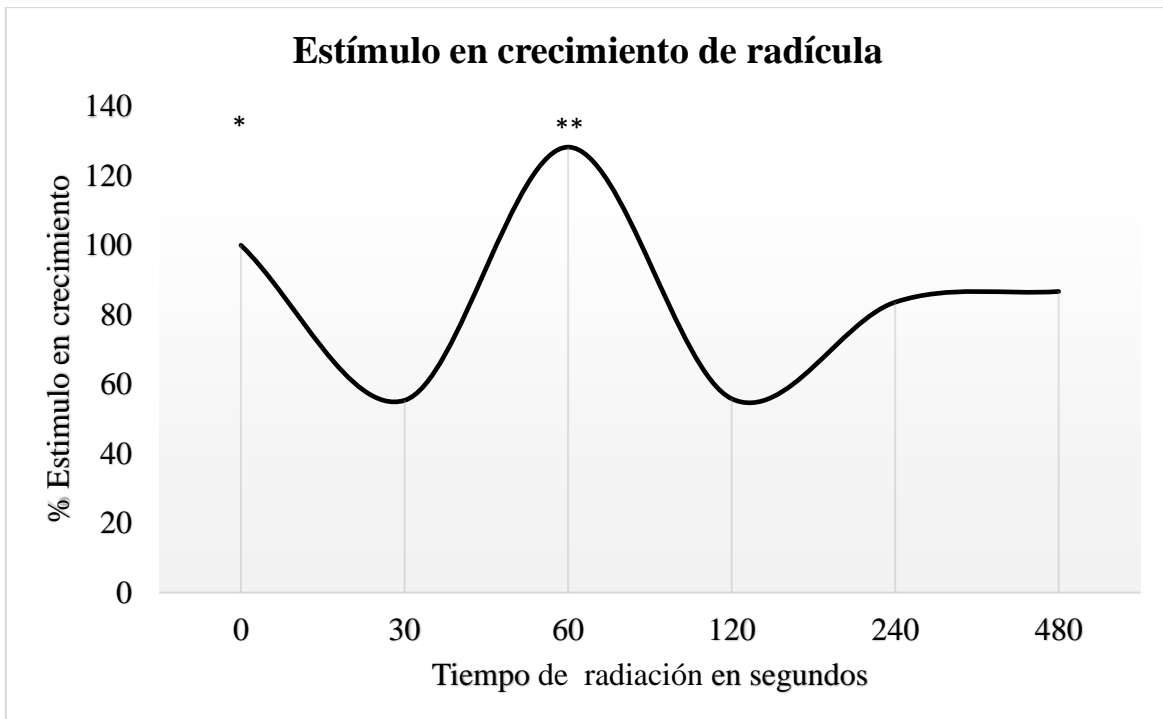


Figura 4.14.- Efectos de estímulo en crecimiento de radícula a 192 horas de experimentación

## Conclusiones:

- La radiación láser de diodo de baja intensidad es un elemento estimulador en los procesos biológicos de las semillas de tomate.
- Mediante el análisis estadístico de los datos recabados se demostró que existen diferencias significativas en el crecimiento de semillas de tomate debidas a la acción laser.

Los efectos como estimulación activa (suma un porcentaje) más notables fueron los siguientes:

- En semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 mediante el tratamiento de radiación laser de diodo con una potencia de  $2 \text{ W/m}^2$  y un tiempo de exposición 120 segundos es posible reducir los tiempos de germinación en un 33% respecto al control y aumentar las dimensiones de la plántula en un 26.7 % logrando aproximadamente una homogeneidad entre la parte del tallo y la radícula.
- En semillas de tomate Orange producidas en el año 2007 con 21 horas de envejecimiento mediante el tratamiento de radiación laser de diodo con una potencia de  $2 \text{ W/m}^2$  y un tiempo de exposición 60 segundos es posible aumentar los porcentajes de germinación en un 90.6 % y del mismo modo aumentar las dimensiones de la plántula en un 26.7 %, logrando aproximadamente una homogeneidad entre la parte del tallo y la radícula. Mediante el tratamiento de radiación laser de diodo con una potencia de  $2 \text{ W/m}^2$  y un tiempo de exposición 120 segundos se estimuló en un -62% el porcentaje de germinación y - 62% en crecimiento de la plántula respecto al control.
- El tratamiento de radiación laser con mayor efecto estimulador es directamente dependiente al estado físico y funcional en el que se encuentren las semillas que sirvan como objeto de investigación.
- La radiación láser de diodo de baja intensidad puede fingir como medio estimulador positivo y negativo.

## **Trabajos futuros**

- Analizar los efectos producidos por la radiación laser de baja intensidad en semillas de tomate:
  - El desarrollo de la planta de tomate.
  - En la cantidad y calidad de producción final de frutos de tomate.
  
- Probar la viabilidad de la radiación laser como medio estimulador en semillas de tomate bajo condiciones de estrés hídrico y térmico.
  
- Verificar el uso de radiación láser de diodo en semillas de tomate como medio fungicida.

## **Bibliografía:**

[0.1]. - Freire et al, ¿Sabes qué es la epigenética?, 2013.

[0.2]. - Dubinin NP, Pashin Yu.V. Mutágenos del medio ambiente, 1977/Дубинин Н.П., Пашин Ю.В. Мутагены окружающей сре-ды. - М.: Знание, 1977. - 64 с.[1.3]. - Shevelukha V.S. El crecimiento de las plantas y su regulación en la ontogénesis, 1992/Шевелуха В.С. Рост растений и его регуляция в онтогенезе. - М.: Колос, 1992. - 593 с.

[0.4]. - Waard, M. A. 1994. Resistance to fungicides which inhibit sterol 14a-demethylation, an historical perspective, p. 3–10. In S. Heaney, D. Slawson, D. W. Hollomon, M. Smith, P. E. Russels, and D. W. Parry (ed.), Fungicide resistance. British Crop Protection Council, Surrey, United Kingdom.

[0.5]. - Zhuchenko A.A. Potencial adaptativo de las plantas culturales (ecológicas y genéticas). - Kishinev: Shtiintsa, 1988/ Жученко А.А. Адаптивный потенциал культурных растений (эколого-генетические основы). - Кишинёв: Штиинца, 1988.- 767 с.

[1.1]. - “Changes in the germination process and growth of pea in effect of laser seed irradiation”. Anna Podleśna1\*, Bożena Gładyszewska2, Janusz Podleśny1, and Wojciech Zgrajka3.

[1.2]. - Ueno, S., Biological effects of magnetic and electromagnetic fields, Plenum Press, E. U. A, pp.1-27, (1996).

[1.3]. - De Souza Torres A., Porras León E. y Casate Fernández R., Efecto del tratamiento magnético de semillas de tomate (*Lycopersicon Esculentum* Mill) sobre la germinación y el crecimiento de las plantulas, Investigacion Agraria, Produccion y Proteccion Vegetal, Vol. 14 (3), pp. 437-444, (1999).

[1.4]. - Flórez M, Carbonell M. V., Martínez E., Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth, Environmental and Experimental Botany, Vol. 59, Elsevier, pp. 68-75, (2007).

[1.5]. - A. Álvarez et al, Efecto del tratamiento de semillas con láser de baja potencia, sobre el crecimiento y rendimiento en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), 2011.

- [2.1]. - De O'Shea, D. C., Callen, W. R., y Rhodes, W. T., 1977, Introducción a los láseres y sus aplicaciones.
- [2.2]. - De Chryssolouris, G., 1991, Laser Machining: Theory and Practice. Con el permiso de Springer Science and Business Media).
- [2.3]. - H.E. Ibarra Villalóna O. Pottiez and A. Gómez Vieyrac, DECEMBER 2018, El camino hacia la luz láser.
- [2.4]. - Édgar González, El láser: principios básicos.
- [2.5]. - Vallejo, F. A. y E.I. Estrada. 2004. Producción de hortalizas de clima cálido. Universidad Nacional de Colombia, Palmira, Colombia.
- [2.6]. - Carol Brouwer, Ph.D., Harris County Extension Agent—Horticulture, El Tomate, sus Datos e Historia.
- [2.7]. - FAOSTAT. 2014 Production. Crops data. Em: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.; consulta: marzo de 2017.
- [2.8]. - Hawkes et al. The biology and taxonomy of the Solanaceae 738 pp.
- [2.9]. - Melo, P.C T. de. Melhoramento genético do tomateiro. Campinas (Brasil), Asgrow do Brasil sementes, 1989. 55pp
- [2.10]. - JOSE MANUEL PITA VILLAMIL et al. GERMINACION DE SEMILLAS. Dpto. Biología Vegetal, E.U. Ingeniería Técnica Agrícola, UPM 28040 Madrid.
- [2.11]. - Jaime F. Martínez-García et al 2004, Fitocromos y desarrollo vegetal
- [2.12]. - Perez G. F. y Martinez-Laborde J. B. (1994), Introducción a la fisiología vegetal, 1a ed. Ediciones Mundi-Prensa, España, pp.101, 104, 105,122, 123, 137, 138.
- [2.13]. - Lee A. Meisell et al Fotorreceptores y Respuestas de Plantas a Señales Lumínicas.

[2.14]Cuesta, A., Tecnología láser. Aplicaciones industriales, Alfa-omega, 1a Edición, México, 2011,

[2.15]. - BUTLER, W. L., W. H. SIEGELMAN, AND C. O. MILLER. 1964. Denaturation of phytochrome. Biochemistry 3: 851-57.

[2.16]. - From Svelto, O., 1989, Principles of Lasers, 3rd edition. By permission of Springer Science and Business Media.

[2.17]. - Elijah Kannatey-Asibu Jr, ,2009. PRINCIPLES OF LASER MATERIALS PROCESSING.

[2.18]. - Glenn D. Boreman, Fundamentos de electro-óptica para ingenieros.

[2.19]. - Dulce María Andrés Cabrerizo, Física y Química 4.

[3.1]. - Fontana, Et al, 2016 ,“PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO PARA DETERMINAR VIGOR DE SEMILLAS DE PROSOPIS ALBA DE TRES PROCEDENCIAS GEOGRÁFICAS”.

[3.2]. - The International Seed Testing Association (ISTA) Zürichstr. 50, CH-8303 Bassersdorf, Switzerland, International Rules for Seed Testing 2017