

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUÉRETARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA
UTILIZANDO DISEÑO DE EXPERIMENTOS.**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE CALIDAD

PRESENTA

ALEJANDRO FLORES RANGEL

Expediente 99166

DIRIGIDO POR

Dr. GILBERTO HERRERA RUIZ

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO. JUNIO DE 2010



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de calidad

INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE LECHUGA
UTILIZANDO DISEÑO DE EXPERIMENTOS

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería de calidad

Presenta:

Alejandro Flores Rangel

Dirigido por:

Dr. Gilberto Herrera Ruiz

SINODALES

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Presidente

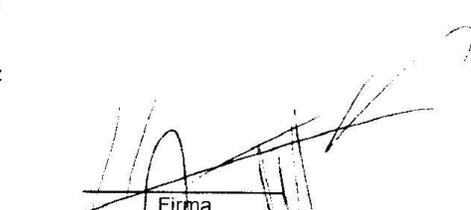
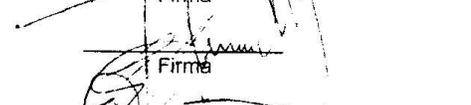
Dr. Miguel Galván Ruiz
Secretario

M. en C. Ma. Guadalupe López Vallejo
Vocal

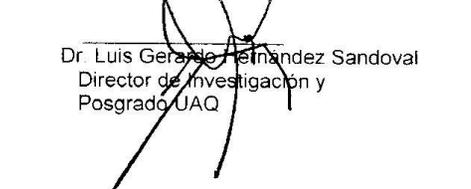
M. en C. Raúl Mendez Escalera.
Suplente

Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz.
Director de la Facultad


Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y
Posgrado UAQ

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Junio 2010
México

RESUMEN

Hoy en día la construcción de invernaderos ha tenido un crecimiento espectacular en México, el crecimiento de esta modalidad de producción ha crecido de manera muy importante, ya que mientras en 1999 se tenían en producción 721 hectáreas, para el año 2008, la extensión se incrementó a 9,068 hectáreas (SAGARPA). Como cualquier ramo de industria tiene una competencia implacable y día a día están en busca de incrementar su productividad para poder ser competitivos en el medio y para esto utilizan diferentes técnicas. En la presente investigación se buscó incrementar la productividad en la producción de lechuga bajo invernadero en el estado de Querétaro utilizando una metodología de mejora continua conocida como, diseño de experimentos. Esta metodología nos permitió plantear distintas estrategias para seleccionar, controlar, analizar e interpretar diferentes condiciones del fenómeno de una manera objetiva y sistemática. En un cultivo de lechuga hidropónica se realizó un experimento para evaluar el impacto de tres diferentes fertilizantes (Nitrógeno, Potasio y Magnesio) en el peso de la lechuga. El diseño del experimento consto de tres factores con dos niveles (bajo y alto) cada uno, dando como resultado ocho tratamientos y veintiuno réplicas con una distribución aleatoria dentro del invernadero siendo la variable de salida el peso de la lechuga. El experimento se llevó a cabo dentro de un invernadero de tecnología moderada con un área total de 108mts², donde se tuvo siete líneas de producción con veinticuatro plantas por línea. Las conclusiones obtenidas en el primer experimento fueron que el Magnesio fue estadísticamente significativo con un impacto negativo en el peso de la lechuga, de igual forma se encontró que el Nitrógeno fue estadísticamente significativo con un impacto positivo en el peso de la lechuga y el Potasio fue estadísticamente significativo con un impacto positivo en el peso de la lechuga pero en menor grado comparado con el Nitrógeno. Con base en las conclusiones obtenidas del primer experimento se realizó un segundo experimento obteniendo como resultado final en la producción lechuga hidropónica bajo invernadero un promedio de 450 gramos por lechuga incrementando la productividad en un 150% aproximadamente.

Palabras clave: Lechuga hidropónica, producción bajo invernadero, diseño de experimentos.

ABSTRACT

Nowadays the greenhouse industry in Mexico has a spectacular growth. The increase of this production's modality has grown in an important way. In 1999 there were 721 hectares in production and in 2008 the extension has increased to 9,068 hectares (SAGARPA). As any industry greenhouses have an implacable competition and they are always looking for increasing its productivity. They use different methodologies to obtain it. The present research looks for increasing the lettuce's productivity in greenhouses in Queretaro. We used a methodology which is well know like design of experiments, this methodology allowed us to think about different strategies to select, control, analyze and interpret different conditions of the phenomenon in an objective and systematic way. An hydroponics lettuce crop was studied in order to evaluate the impact of three different fertilizers (Nitrogen, Potassium and Magnesium) in the weight of the lettuce. The experimental design was a complete randomized experiment with 8 treatments and twenty one replicates. The variable study was lettuce height. The obtained conclusions of the first experiment were that the Magnesium's levels were statistically significant with a negative impact in the weight of the lettuce. The Nitrogen's levels were statistically significant with a positive impact in the weight of the lettuce and the Potassium's levels were statistically significant with a positive impact in the weight of the lettuce but in smaller degree than Nitrogen. With the obtained conclusions of the first experiment we did a second experiment obtained as a final result in the hydroponics lettuce production in greenhouses an average of 450gr. for lettuce increasing the productivity approximately in 150%.

Key words: hydroponic lettuce, greenhouse production, design of experiments.

DEDICATORIAS

A mi esposa Rocío Silva García por el apoyo que siempre me ha brindado en las decisiones que he tomado a pesar de no estar de acuerdo en muchas de ellas, así mismo por su paciencia durante mi estancia en la maestría. GRACIAS.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Gilberto Herrera Ruiz por todo su apoyo, el cual no encuentro palabras para externar mi agradecimiento.

Sin lugar a duda un agradecimiento para Ing. Adán Mercado Luna, ya que el éxito de los experimentos realizados en la presente tesis fue gracias a su apoyo.

A todo el personal involucrado del Campus Amazcala.

Al jurado de sinodales que con mucho esfuerzo y su valiosa aportación profesional se logro la culminación de la presente investigación.

Dr. Gilberto Herrera Ruiz.
Dr. Miguel Galván Ruiz.
M. en C. Ma. Guadalupe López Vallejo.
Dra. Rebeca del Rocío Peniche Vera.
M. en C. Raúl Méndez Escalera.

Y no puedo dejar fuera a mi Alma Máter, La Universidad Autónoma de Querétaro.

ÍNDICE

	Página.
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE CUADROS	ix
I .- INTRODUCCIÓN	01
II .- REVISIÓN DE LITERATURA	09
2.1 ORIGEN.....	09
2.2 TAXONOMÍA Y MORFOLOGÍA.....	09
2.3 IMPORTANCIA ECONÓMICA Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA...	10
2.4 MATERIAL VEGETAL.....	10
2.5 MEJORA GENÉTICA.....	11
2.6 REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS.....	11
2.6.1. Temperatura.....	11
2.6.2. Humedad relativa.....	12
2.6.3. Suelo.....	12
2.7 PARTICULARIDADES DEL CULTIVO.....	12
2.7.2 Preparación del terreno.....	12
2.7.3 Plantación.....	13
2.7.4 Riego.....	13
2.7.5 Blanqueo.....	13
2.7.6 Abonado.....	14
2.7.7 Malas hiervas.....	15
2.7.8 Recolección.....	16

2.8	ALMACENAMIENTO.....	17
2.9	VALOR NUTRICIONAL.....	17
2.10	PLAGAS Y ENFERMEDADES.....	18
2.10.1	Plagas.....	18
2.10.2	Enfermedades.....	21
2.11	FISIOPATÍAS.....	24
2.12	INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD CON DIFERENTES TÉCNICAS.....	26
III.-	METODOLOGÍA.....	34
3.1	PASOS DE UN DISEÑO EXPERIMENTAL.....	34
3.1.1	Reconocimiento y/o planteamiento del problema.....	34
3.1.2	Selección de factores y determinación de niveles.....	36
3.1.3	Estructura de tratamientos.....	36
3.1.4	Selección de la variable respuesta.....	37
3.1.5	Plantear y efectuar un diseño experimental.....	38
3.2	MODELO ESTADISTICO.....	39
3.3	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	41
3.4	MODIFICACIÓN DE INSTALACIONES.....	42
3.5	PRODUCCIÓN DE PLÁNTULA.....	45
3.6	SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO.....	47
3.7	PRODUCCIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS.....	49
3.8	PRODUCCCIÓN DE LECHUGA.....	53
IV.-	ANÁLISIS.....	54
V.-	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
VI.-	BIBLIOGRAFÍA.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
3.0 Ubicación geográfica de Amazcala.....	41
3.1 Invernadero experimental ubicado en el campus Amazcala.....	42
3.2 Primer depósito instalado.....	42
3.3 Acondicionando instalaciones.....	42
3.4 Depósitos de riego.....	43
3.5 Protección solar de depósitos.....	43
3.6 Cepa interna.....	43
3.7 Cepa para tubería.....	43
3.8 Tubería en cepa.....	44
3.9 Distribución de SN.....	44
3.10 Distribución de sustrato.....	44
3.11 Medición de separación.....	44
3.12 Semillero.....	45
3.13 Producción de plántula.....	45
3.14 Plántula.....	46
3.15 Plántula T.....	46
3.16 Control.....	47
3.17 Caja de control.....	47
3.18 En producción.....	53
3.19 Distribución de SN.....	53
4.0 pl1.....	54
4.1 pl2.....	54
4.2 pl3.....	54
4.3 pl4.....	54
4.4 pl5.....	54
4.5 pl6.....	54
4.6 Gráfica de peso.....	55
4.7 Gráfica de interacciones dobles.....	58
4.8 Efecto del Nitrógeno.....	61
4.9 Interacción del potasio y Magnesio.....	61

4.10 Cubo de interacción L3.....	64
4.11 Cubo de interacción L3.....	67
4.12 Cubo de interacción L5.....	70
4.13 Cubo de interacción completo.....	74
4.14 Invernadero con modificación.....	75
4.15 Termómetro.....	76
4.16 sensor de almacenamiento.....	76
4.18 Segundo ciclo de producción.....	77
4.19 Producción final SC.....	78
4.20 Producción final SC.....	78
4.21 Báscula.....	78
4.22 Mediciones finales.....	78
4.24 Diámetro.....	79
4.23 vegetación.....	79
4.25 Gráfica de peso.....	79

ÍNDICE DE CUADROS

	Página.
2.0 Producción mundial de lechuga.....	10
2.1 Densidad.....	13
2.3 Materia para eliminar hiervas.....	16
2.4 Valor nutricional de la lechuga.....	17
2.5 Tratamiento para plagas.....	18
2.6 Tratamiento para Plagas.....	20
2.7 Tratamiento para Plagas.....	20
2.8 Tratamiento para enfermedades.....	21
2.9 Tratamiento para enfermedades.....	22
2.10 Tratamiento para enfermedades.....	22
2.11 Tratamiento para enfermedades.....	23
2.12 Tratamiento para enfermedades.....	23
2.13 Análisis de varianza, pruebas F.....	30
2.14 Solución nutritiva para la lechuga en ppm.....	31
2.15 Solución nutritiva para el jitomate.....	32
3.20 Tabla de tratamientos.....	49
3.21 Nivel codificado de Nitrógeno.....	49
3.22 Nivel codificado de Potasio.....	49
3.23 Nivel codificado de Magnesio.....	49
3.24 Tratamiento #1.....	50
3.25 Tratamiento #2.....	50
3.26 Tratamiento #3.....	50
3.27 Tratamiento #4.....	51
3.28 Tratamiento #5.....	51
3.29 Tratamiento #6.....	51
3.30 Tratamiento #7.....	52
3.31 Tratamiento #8.....	52
4.0 Cantidad de fertilizantes en PPM.....	77

I.- INTRODUCCIÓN.

La infraestructura de invernaderos ha tenido un crecimiento espectacular en México, el crecimiento de esta modalidad de producción ha crecido de manera muy importante, ya que mientras en 1999 se tenían en producción 721 hectáreas, para el año 2008, la extensión se incrementó a 9,068 hectáreas más sin embargo no es suficiente y en su implementación participan agricultores y empresarios convencidos de las ventajas de este tipo de producción como una alternativa para invertir.

Hoy en día ante un mundo globalizado con una implacable competencia, es necesario ser competitivo o de lo contrario se perecerá, debida a esta feroz competencia en cualquier ámbito de la industria llámese automotriz, aeronáutica, farmacéutica, agronómica etc. Las empresas han tenido que desarrollar diferentes técnicas de mejora continua con la finalidad de disminuir o eliminar los costos por mala calidad, disminuir la variación de un proceso e incrementar la productividad el cual es nuestro caso en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero. Algunas de estas herramientas existentes son; Red X, Seis sigma, Manufactura esbelta, Kaizen y Diseño de experimentos por mencionar algunas.

Diseño de experimentos es una metodología ampliamente utilizada y tiene sus orígenes en los trabajos de Ronald Fisher (1890-1962), desarrollados en la Estación Agrícola Experimental de Rothamsted en el Reino Unido donde introdujo el concepto de aleatorización y el análisis de varianza. A lo largo de varias décadas la teoría de diseño de experimentos y sus aplicaciones se consolidaron y expandieron, en años recientes recibieron un fuerte impulso por las contribuciones de Genichi Taguchi, un estadístico japonés ampliamente conocido en Occidente. El diseño experimental puede considerarse como un proceso de caja negra a la cual ingresan diversas variables que interactúan para producir un resultado. Las variables que ingresan al proceso se denominan variables de entrada, y el resultado variable de salida. El nivel de la variable de salida depende de los niveles que adopten las variables de entrada, gerentes y técnicos se benefician al saber qué combinación de variables de entrada produce la variable de salida óptima. La búsqueda de combinaciones óptimas de las variables de entrada da lugar al diseño experimental que es una prueba (o un conjunto de pruebas) durante la cual se realizan cambios sistemáticos y controlados a las variables de entrada para medir el efecto sobre la variable de salida. El diseño experimental utiliza técnicas como la regresión múltiple, la respuesta superficial y varias extensiones del análisis de varianza.

El diseño estadístico de experimentos se debe usar como una metodología que permite plantear distintas estrategias para seleccionar, controlar, analizar e interpretar diferentes condiciones de estudio en un fenómeno de una manera objetiva y sistemática. El diseño de experimentos tiene una enorme utilidad en la industria porque permite mejorar el rendimiento de los procesos y la calidad de sus

productos a nivel laboratorio o planta piloto, el diseño estadístico de experimentos desempeña un papel muy importante y múltiples ejemplos de aplicaciones se dan en biotecnología, química, veterinaria, educación entre otras siendo así esta metodología de mucha utilidad.

Gaia Franceschini y Sandro Macchieto (2007) presentaron un trabajo sobre un modelo basado en diseño de experimentos para parámetros de precisión. Debido al amplio uso y la importancia de modelos matemáticos en procesos de ingeniería el diseño de experimentos está llegando a ser una esencial herramienta como mecanismo para la rápida construcción y validación de estos modelos, muchas técnicas de diseño de experimentos han sido desarrolladas en el pasado y aplicadas exitosamente en un amplio rango de sistemas, debido a esto en el colegio imperial de Londres en el departamento de ingeniería química realizó una investigación con un enfoque en el modelo llamado diseño de experimentos y tuvo como objetivo presentar el estado del arte en este importante campo a fin de proporcionar un entorno adecuado y completo de esta técnica, una descripción detallada de los elementos clave de un modelo de identificación (el modelo del experimento y las herramientas estadísticas etc.), los principales pasos en la construcción de un modelo fueron introducidos antes de enfocarse en el diseño de experimentos para parámetros de precisión. Una vista general y un análisis crítico del estado del arte en este sector fue propuesto. La principal contribución al modelo basado en el diseño de experimentos fue destacada, con procedimientos en términos novedosos, formulaciones matemáticas e implementaciones numéricas. Una lista de las más recientes aplicaciones de estas técnicas en varios campos (desde la cinética química para el modelado biológico), fue presentada con puntos clave de un modelo basado en diseño de experimentos en los procesos de ingeniería.

Cristian R. Rojas, James S. Welsh, Graham C. Goodwin y Arie Feuer (2007) desarrollaron una metodología de diseño robusto óptimo para la identificación de sistemas. La escuela de ingeniería eléctrica y ciencia de la universidad de neocastel calajan Australia y el departamento de ingeniería eléctrica del instituto tecnológico de Israel desarrollaron un diseño robusto de mínimos y máximos para la identificación de sistemas dinámicos. La idea de mínimos y máximos en el diseño de experimentos ha sido explorada en la literatura de estadística, sin embargo la técnica es virtualmente desconocida por la comunidad de ingeniería y en consecuencia ha habido un pobre trabajo al examinar las propiedades cuando es aplicado en un sistema de identificación dinámica, el artículo inicia una exploración de ideas el cual considera sistemas lineales con entradas limitadas de energía, asumiendo que los parámetros se encuentran en un conjunto dado y optimizado en el peor de los casos. También se ofreció un análisis detallado de un parámetro de la solución como un ejemplo ilustrativo y se propuso un algoritmo de optimización que pueda ser aplicado generalmente para una aproximación discreta al problema del diseño. Examinaron diferentes roles desempeñados por diferentes criterios y presentan un ejemplo simulado que ilustra las ventajas del enfoque propuesto.

Eva Balsa Canto, Maria Rodriguez y Julio R. Banga (2007) presenta su trabajo de la estimación de parámetros para la degradación térmica con base en un diseño dinámico de experimentos. El proceso térmico es ampliamente usado para garantizar la seguridad de la comida y extender la vida útil, sin embargo los métodos estándar del proceso térmico tiene un impacto significativo en la calidad de la comida debido a la degradación de nutrientes y otros factores de calidad. Los modelos pueden ser exitosamente usados por procesos para el diseño de procesos técnicos, optimización y control, sin embargo para la construcción de modelos se necesita una estimación adecuada de parámetros simétricos que son desconocidos. El consejo español para la investigación científica desarrollo el diseño óptimo experimental (DOE) dinámico el cual permite calcular un esquema de control y medición que mejora la estimación de los parámetros. El DOE es formulado como una optimización dinámica donde el objetivo es encontrar las condiciones experimentales donde se pueda obtener la mayor información posible como la matriz de información de Fisher. La solución numérica del problema es una aproximación usando una combinación del vector de parámetros con la solución no lineal optimizada. Como una aplicación de prueba del DOE se utilizo en el proceso de térmico de enlatado del atún evaluando la degradación de la tiamina, los resultados obtenidos confirmaron que la aplicación del DOE reduce la región de confianza para los parámetros y redujo la cantidad de experimentos en un 40%.

Alan J. Kata (2003) analiza el tamaño mínimo de muestras para el análisis de diseño de experimentos. La Universidad del estado de Illinois en el departamento de ciencias biológicas estudio la probabilidad de recolectar suficientes datos para demostrar estadísticamente que un químico examinado es mutagénico. Una formula fue derivada con la cual se podría calcular la verosimilitud de un químico mutagénico basado en (1) El tamaño total de la muestra (2), El tamaño relativo de los grupos a experimentar (3), La espontanea mutación (4), La detección de los mínimos incrementos en la mutación y (5) Se mostro el tamaño mínimo de la muestra para asegurar una oportunidad razonable de éxito. Se encontró que los mejores diseños fueron aquellos que tuvieron la habilidad de recolectar un número suficiente de muestras para demostrar la mutagenicidad del químico a diferencia de los experimentos que mostraron haber recolectado una pobre cantidad de muestra con la cual no pudieron demostrar la mutagenicidad del químico.

En la revisión literaria de diseño de experimentos, se encontraron diferentes artículos que hablan acerca de la aplicación de esta metodología en rubros totalmente diferentes y con excelentes resultados y confiables, incluso se encontraron algunos artículos donde la investigación ya no se enfoca a validar su confiabilidad sino que están analizando nuevos métodos que ayuden a perfeccionar la técnica con la finalidad de obtener modelos más exactos y más rápidos para el cálculo de parámetros de precisión.

La lechuga (*Lactuca Sativa* L.) es la planta más importante del grupo de las hortalizas de hoja, se consume en ensaladas, es ampliamente conocida y se cultiva casi en todos los países del mundo. La lechuga presenta una gran diversidad dada principalmente por diferentes tipos de hojas y hábitos de crecimiento. Durante los últimos años la producción de hortalizas ha experimentado un significativo progreso en cuanto a rendimiento y calidad, dentro de ello la superficie cultivada de lechuga ha ido incrementándose, debido en parte a la introducción de nuevos cultivares y el aumento de su consumo. Es por ello que es importante determinar la producción y rendimiento de estos nuevos cultivos en diferentes épocas de siembra y sistemas de producción como el cultivo orgánico que cada día cobra mayor importancia, ya que representa una nueva tendencia que promueve el uso de insumos alternativos a fin de lograr el aprovechamiento adecuado de los recursos existentes localmente para llegar a una producción agropecuaria limpia y sostenida. Así mismo el mercado de hortalizas tipo sangría viene cobrando un notable incremento en nuestro medio y de un precio superior a la media de los otros tipos de lechugas, siendo esta lechuga una de las hortalizas que se producen bajo esta modalidad, de ahí el interés por realizar este tipo de producción.

Uno de los factores primordiales para el cultivo es el suministro de las sustancias nutritivas (fertilizantes) que requiere el cultivo. No obstante la contaminación por fertilizantes se produce cuando éstos se utilizan en mayor cantidad de la que pueden absorber los cultivos, o cuando se eliminan por acción del agua o del viento de la superficie del suelo antes de que puedan ser absorbidos. Los excesos de nitrógeno y fosfatos pueden infiltrarse en las aguas subterráneas o ser arrastrados a cursos de agua. Esta sobrecarga de nutrientes provoca la eutrofización de lagos, embalses y estanques y da lugar a una explosión de algas que suprimen otras plantas y animales acuáticos. La hidroponía permite garantizar de manera más confiable y segura el suministro de cada una de estas sustancias que mezcladas con el agua de riego se le conoce como solución nutritiva (SN). Otra cuestión no resuelta de los cultivos sin suelo (CSS) relacionada con su impacto medioambiental es que la mayoría de las técnicas de CSS actualmente utilizadas constituyen sistemas abiertos en los que los lixiviados de la SN se vierten al suelo y lo contaminan. En este sentido es cuestionable la agricultura sostenible de dicho sistema abierto, en lo que se refiere al uso del agua y los fertilizantes.

La preparación de soluciones nutritivas es un punto decisivo para el éxito de un cultivo hidropónico, estas soluciones deben cumplir con ciertos requerimientos de las plantas en función de las necesidades fisiológicas de estas, como la cantidad adecuada de macro y micro nutrientes, el pH aceptado por la planta, la presión osmótica, la época en que se implantara el cultivo; las propiedades del agua a utilizar, y la planta que se desea producir. Para la realización de la solución se debe tomar en cuenta las sales más solubles y con mejores características (menores impurezas, costos, y si estas se pueden adquirir en el lugar donde se va a establecer el cultivo). Algunos fertilizantes proporcionan dos o más nutrientes, lo cual facilita la elaboración de la solución y reduce su precio. Es importante tener

en cuenta que no haya limitación de nutrientes, problemas por precipitación de algunas sales y toxicidad de la solución nutritiva. Las soluciones deben contener todos los elementos necesarios para las plantas, en las debidas condiciones y en las dosis convenientes.

Las plantas requieren de dieciséis nutrientes para su crecimiento estos nutrientes pueden ser suministrados por el aire, agua y fertilizantes. Los dieciséis elementos son Carbono(C), Hidrogeno(H), Oxígeno(O), Fósforo(P), Potasio(K), Nitrógeno(N), Azufre(S), Calcio(Ca), Hierro(Fe), Magnesio(Mg), Boro(B), Manganeseo(Mn), Cobre(Cu), Zinc(Zn), Molibdeno(Mo), y Cloro(Cl). La clave del éxito en la administración de los fertilizantes es programar y asegurarse de utilizar la concentración necesaria de todos los nutrientes para las diferentes etapas de la cosecha tomando en cuenta otros factores como la temperatura. Una pobre concentración o exceso de nutrientes dará como resultados una pobre cosecha, pérdida de dinero, desperdicio de fertilizantes y la contaminación de los mantos acuíferos. Los elementos nutritivos indispensables para la vida de una planta se subdividen en dos categorías los macronutrientes y los micronutrientes.

Los macronutrientes se caracterizan por sus concentraciones superiores al 0.1% de la materia seca. Entre ellos se encuentran los principales elementos nutritivos necesarios para la nutrición de las plantas, que son; el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno. Estos cuatro elementos que constituyen la materia orgánica representan más de un 90% por término medio de la materia seca del vegetal. Al cual se añaden los elementos utilizados como abono y enmiendas que son: el potasio, el calcio, el magnesio, el fósforo, así como el azufre. Los tres primeros macronutrientes se encuentran en el aire y en el agua. El nitrógeno, aunque representando un 78% del aire atmosférico, no puede ser utilizado directamente por las plantas, a excepción de algunas bacterias y algas, asimilarlo más que bajo forma mineral, principalmente bajo la forma de ión nitrato (NO_3). Eso explica la importancia de la "nutrición añadida de nitrógeno" en la nutrición vegetal y su adición como abono por los productores. Los micronutrientes llamados también oligoelementos no sobrepasan el 0.01% de la materia seca algunos de estos son; Cloro, Hierro, Boro, Manganeseo, Zinc, Cobre, Níquel, Molibdeno, etc. El déficit de alguno de estos elementos puede determinar enfermedades de carencia. El nitrógeno es necesario para la construcción de los azúcares y por lo tanto para el crecimiento, procede del aire y del agua. El carbono es el constituyente principal de las plantas, se encuentra en el esqueleto de numerosas biomoléculas como el almidón o la celulosa que se fija gracias a la fotosíntesis a partir del dióxido de carbono procedente del aire para formar hidratos de carbono que sirven como almacenamiento de energía a la planta. El oxígeno es necesario para la respiración celular y los mecanismos de producción de energía de las células se encuentran en numerosos componentes celulares procedentes del aire. A continuación se redacta una pequeña síntesis de los problemas y síntomas que puede ocasionar en la planta el exceso o la deficiencia de nutrientes en la solución nutritiva.

Nitrógeno (N), deficiencia: Las hojas viejas están amarillas y el fruto es pequeño. Exceso: Planta tiene un color verde oscuro con abundante follaje pero un crecimiento pequeño de la raíz con caída de las flores y baja producción de fruto.

Fósforo (P), deficiencia: El crecimiento es lento y la fruta tarda en madurar, color morado por debajo de las hojas más jóvenes. Exceso: No hay ningún síntoma pero se presentan deficiencias de cobre (Cu) y zinc (Zn) cuando hay un exceso de fósforo.

Potasio (K), deficiencia: Hojas viejas amarillentas con puntos muertos, maduración del fruto desigual. Exceso: No se absorbe en la planta cuando hay exceso de este elemento pero los niveles altos genera deficiencia de Mg, Mn, Zn y Fe.

Azufre (S), deficiencia: La deficiencia de S es muy rara pero presenta amarillamiento de venas en hojas jóvenes y tallos púrpuras. Exceso: Las venas internas se ponen amarillas o las hojas se queman.

Magnesio (Mg), deficiencia: amarillamiento interno de las hojas viejas, (remedio usar en una solución en spray con 10% de sulfato de magnesio sobre las hojas), Exceso: No hay síntomas visuales.

Calcio (Ca), deficiencia: Fruta podrida, amarillamiento de los márgenes de las plantas más jóvenes. La parte baja genera tonos púrpuras, hojas curvadas, la punta más alta podrida o muerta. (Remedio usar una solución en spray de 0.75 a 1.0% de nitrato de calcio en solución o 0.4 % de cloruro de calcio sobre las hojas), Exceso: No hay síntomas visuales.

Hierro (Fe), deficiencia: Amarillamiento interna de las venas en hojas jóvenes, amarillamiento de los márgenes de las hojas extendiéndose a centro de las hojas. Abortos de flores. Cuando el pH es alto genera deficiencia de Fe. (Remedio es una solución en spray con 0.2% a 0.5% de quelato de hierro cada 3 o 4 días sobre las hojas), Exceso: No es problema.

Cloro (Cl), deficiencia: Hojas marchitas con amarillamiento color bronce. Crecimiento de raíz detenido. Exceso: Punta de las hojas quemadas o amarillentas, caída de hojas y crecimiento detenido.

Manganeso (Mn), deficiencia: Amarillamiento interno de hojas viejas, hojas de verde pálido con hojas muertas, pocas flores y frutos. Exceso: Amarillamiento y crecimiento detenido.

Boro (B), deficiencia: Puntos muertos, amarillamiento intervenal de hojas superiores, hojas frágiles, esta deficiencia genera deficiencia de calcio. (Remedio usar spray en las hojas con una solución de 0.1 a 0.25% de borax), Exceso: Amarillamiento de la punta de la hoja generando que tomen tonos cafés.

Zinc (Zn), Deficiencias: Puntos cafés, hojas pequeñas y algunas veces largas y angostas (remedio es un spray en la hojas de una solución de 0.1 a 0.5% de solución de sulfato de zinc), Exceso: Comúnmente acompañado con deficiencia de Fe presenta amarillamiento.

Cobre (Cu), deficiencias: Hojas jóvenes verdes oscuras y con formas extrañas, enroscadas en tubos, pocas o ninguna flor. Exceso: Crecimiento reducido con síntomas de deficiencia de Fe.

Molibdeno (Mo), deficiencias: Amarillamiento de la venas en hojas viejas y márgenes de las hojas curvadas hacia arriba. (Remedio una solución en spray de 0.07 a 0.1% de solución de molibdanato de amonio o sodio sobre las hojas). Exceso: Las hojas toman un color amarillo dorado.

Bajo las condiciones mostradas anteriormente, se entiende la necesidad de tener una solución nutritiva óptima para la eficaz producción de hortalizas bajo invernadero. Otro efecto sin lugar a duda no mencionado a causa de la carencia o deficiencia de uno o varios nutrientes será el bajo rendimiento o una pobre productividad de la cosecha, esto se debe a que, en la mayoría de los casos la solución nutritiva utilizada para la producción de hortalizas bajo invernadero en diferentes estados de la república mexicana es obtenida como si fuera una receta de otros países, sin considerar la relación del clima con la solución nutritiva y el efecto en el rendimiento de la planta.

El objetivo de la presente tesis busca incrementar la productividad en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero en la zona de Amazcala con base en la optimización de la solución nutritiva.

Así mismo hoy en día en nuestro país, México, en la implementación de producción de hortalizas hidropónicas bajo invernadero es muy frecuente que se utilice soluciones nutritivas que utilizan en otros países o estados. En la presente investigación se tiene como hipótesis inicial que se puede incrementar la productividad en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero aplicando una metodología de mejora continua, Diseño de experimentos (DOE).

A continuación se muestra el segundo capítulo donde se describe el estado del arte el cual abarca una temática acerca de la aplicación de una metodología de mejora continua, Diseño de Experimentos (DOE), obteniendo excelentes resultados en diferentes rubros de la industria mostrando las ventajas que ofrece el uso de esta metodología tales como rapidez y confiabilidad en diferentes modelos obtenidos para el ajuste de parámetros de una alta precisión y exactitud. Incluso existe investigación donde se busca complementar la metodología para mejorar aún más los resultados.

De igual forma se muestran diferentes artículos en los cuales muestran el uso de herramientas estadísticas o en algunos casos DOE para analizar la absorción de diferentes nutrientes en la planta o fruto. También se muestra la existencia de artículos sobre trabajos donde buscan incrementar la productividad en la producción de diferentes hortalizas hidropónicas bajo invernadero y algunas a cielo abierto con diferentes técnicas, mas sin embargo no se encontró evidencia de la existencia de la aplicación de DOE para optimizar la solución nutritiva incrementando la productividad.

En el tercer capítulo se tiene una breve descripción de la metodología aplicada comenzando desde el diseño de experimento donde se definieron diferentes puntos como; tipo de diseño, que elementos fertilizantes se evaluarían, número de niveles de cada fertilizante, tratamientos necesarios para el experimento, procedimiento de aleatorización, réplicas necesarias, variable de salida a evaluar, método de medición de variable de salida y variables de entrada y método de análisis entre otros. Una vez habiendo diseñado el experimento se continúa mostrando la parte de acondicionamiento del invernadero tales como, la instalación de tubería y tinacos que fueron necesarios para realizar modificaciones en el sistema de riego para la distribución aleatoria de la solución nutritiva en las siete líneas de producción. También se muestra otras actividades cruciales como la preparación del sustrato, producción de la plántula, transplante y distribución de la plántula, elaboración del programa para la frecuencia de riego y la duración de riego etc.

En el cuarto capítulo teniendo como variable de salida el peso de la producción de lechuga y utilizando diferentes herramientas estadísticas, se llevó a cabo un análisis por línea de producción, esto debido a que, en nuestro primer experimento fueron muy altas las diferencias de temperatura que existieron entre las mismas líneas del invernadero (ruido), obteniendo diferentes conclusiones entre líneas. También se realizó un análisis general obteniendo una conclusión general que dio paso para realizar el cálculo de los siguientes tratamientos para realizar el segundo experimento donde de igual forma se obtuvo una mezcla óptima. En este mismo capítulo se muestra las acciones tomadas para disminuir o eliminar el efecto del ruido que se tuvo en el primer experimento y poder realizar el segundo experimento obteniendo una solución nutritiva óptima para la lechuga.

Por último en el quinto capítulo se tienen diferentes conclusiones que se obtuvieron de ambos experimentos para incrementar la productividad en la producción de lechuga bajo invernadero, se muestra la combinación de niveles de una posible solución nutritiva óptima para la producción de lechuga tipo sangría en Amazcala, así como recomendaciones para futuros experimentos que busquen aplicar la metodología para incrementar la productividad en la producción de hortalizas bajo invernadero a través de la optimización de la solución nutritiva.

II.- REVISION DE LITERATURA.

2.1 ORIGEN.

El origen de la lechuga no parece estar muy claro, aunque algunos autores afirman que procede de la India (Alan D., 1999), hoy en día los botánicos no se ponen de acuerdo, por existir un seguro antecesor de la lechuga, *Lactuca scariola* L., que se encuentra en estado silvestre en la mayor parte de las zonas templadas. Siendo las variedades cultivadas actualmente una hibridación entre especies distintas.

El cultivo de la lechuga se remonta a una antigüedad de 2.500 años, siendo conocida por griegos y romanos. Las primeras lechugas de las que se tiene referencia son las de hoja suelta, aunque las acogolladas eran conocidas en Europa en el siglo XVI.

2.2 TAXONOMÍA Y MORFOLOGÍA.

La lechuga es una planta anual y autógama, perteneciente a la familia Compositae y cuyo nombre botánico es *Lactuca sativa* L.

- Raíz: La raíz no llega nunca a sobrepasar los 25 cm. de profundidad es pivotante, corta y con ramificaciones.
- Hojas: Las hojas están colocadas en roseta, desplegadas al principio; en unos casos siguen así durante todo su desarrollo (variedades romanas), y en otros se acogollan más tarde. El borde de las hojas puede ser liso, ondulado o aserrado.
- Tallo: Es cilíndrico y ramificado.
- Inflorescencia: Son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos.
- Semillas: están provistas de un vilano plumoso.

2.3 IMPORTANCIA ECONÓMICA Y DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA.

La importancia del cultivo de la lechuga ha ido incrementándose en los últimos años, debido tanto a la diversificación de tipos y al aumento de variedades así como la creciente en la demanda de la población. A continuación se muestra una tabla donde muestra la producción en diferentes países.

.PAÍSES	PRODUCCIÓN LECHUGAS AÑO 2002 (millones de toneladas)	PRODUCCIÓN LECHUGAS AÑO 2007 (millones de toneladas)
China	7.605	8.005
Estados Unidos	4.472	5.352
España	.972	.915
Italia	.965	.846
India	.790	.790
Japón	.553	.560
Francia	.490	.433
México	.213	.234
Egipto	.1796	.179
Bélgica-Luxemburgo	.170	.170
Alemania	.166	.195
Australia	.145	.150
Reino Unido	.139	.149
Portugal	.95	.95
Chile	.85	.86

Tabla 2.0 Producción mundial de lechuga. ¹

2.4 MATERIAL VEGETAL.

Las variedades de lechuga se pueden clasificar en los siguientes grupos botánicos:

Romanas: *Lactuca Sativa*, *Longifolia*, estas no forman un verdadero cogollo, las hojas son oblongas, con bordes enteros y nervio central ancho.

- Romana
- Baby

¹ www.agrocadenas.gov.co/inteligencia/int_lechuga.htm.

Acogolladas: *Lactuca sativa*, capitana, estas lechugas forman un cogollo apretado de hojas.

- Batavia
- Mantecosa o Trocadero
- Iceberg

De hojas sueltas: *Lactuca sativa* inybasea, son lechugas que poseen las hojas sueltas y dispersas.

- Lollo Rossa
- Red Salad Bowl
- Cracarelle

Lechuga espárrago: *Lactuca sativa* augustana, son aquellas que se aprovechan por sus tallos, teniendo las hojas puntiagudas. Se cultiva principalmente en China y la India.

2.5 MEJORA GENÉTICA.

Los objetivos de la mejora genética se basan en la obtención de nuevos tipos de lechuga y la reducción del tamaño. Además de la mejora en calidad: basada fundamentalmente en la formación de los cogollos, haciéndolos más compactos. Incluso de lo anteriormente citado destaca la tolerancia a la subida de la flor y la producción de semillas libres de virus.

2.6 REQUERIMIENTOS EDAFOCLIMÁTICOS.

2.6.1. Temperatura.

La temperatura óptima de germinación oscila entre 18-20°C. Durante la fase de crecimiento del cultivo se requieren temperaturas entre (14-18) °C por el día y (5-8) °C por la noche, pues la lechuga exige que haya diferencia de temperaturas entre el día y la noche. Durante el acogollado se requieren temperaturas en torno a los 12°C por el día y 3-5°C por la noche. Este cultivo soporta peor las temperaturas elevadas que las bajas, ya que como temperatura máxima puede soportar hasta los 30 °C y como mínima temperaturas de hasta -6 °C. Cuando la lechuga soporta temperaturas bajas durante algún tiempo, sus hojas toman una coloración rojiza, que se puede confundir con alguna carencia.

2.6.2. Humedad relativa.

El sistema radicular de la lechuga es muy reducido en comparación con la parte aérea, por lo que es muy sensible a la falta de humedad y soporta mal un periodo de sequía, aunque éste sea muy breve. La humedad relativa conveniente para la lechuga es del 60 al 80%, aunque en determinados momentos agradece menos del 60%. Los problemas que presenta este cultivo en invernadero es que se incrementa la humedad ambiental, por lo que se recomienda su cultivo al aire libre, cuando las condiciones climatológicas lo permitan.

2.6.3. Suelo.

Los suelos preferidos por la lechuga son los ligeros, arenoso-limosos, con buen drenaje, situando el pH óptimo entre 6,7 y 7,4. En los suelos húmidos, la lechuga vegeta bien, pero si son excesivamente ácidos será necesario encalar. Este cultivo, en ningún caso admite la sequía, aunque la superficie del suelo es conveniente que esté seca para evitar en todo lo posible la aparición de podredumbres de cuello.

En cultivos de primavera, se recomiendan los suelos arenosos, pues se calientan más rápidamente y permiten cosechas más tempranas.

En cultivos de otoño, se recomiendan los suelos francos, ya que se enfrían más despacio que los suelos arenosos.

En cultivos de verano, es preferible suelos ricos en materia orgánica, pues hay un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos y el crecimiento de las plantas es más rápido.



2.7 PARTICULARIDADES DEL CULTIVO.

La multiplicación de la lechuga suele hacerse con planta en cepellón obtenida en semillero. Se recomienda el uso de bandejas de poliestireno de 294 alveolos,

sembrando en cada alveolo una semilla a 5 mm de profundidad. Una vez transcurridos 30-40 días después de la siembra, la lechuga será plantada cuando tenga 5-6 hojas verdaderas y una altura de 8 cm. Desde el cuello del tallo hasta las puntas de las hojas. La siembra directa suele realizarse normalmente en E.E.U.U. para la producción de lechuga Iceberg.

2.7.2 Preparación del terreno.

En primer lugar se procede a la nivelación del terreno, especialmente en el caso de zonas encharcadizas, seguidamente se procederá al asurcado y por último la acaballadora, formará varios bancos, para marcar la ubicación de las plantas así como realizar pequeños surcos donde alojar la tubería portagotos.

Se recomienda cultivar lechuga después de leguminosas, cereal o barbecho, no deben cultivarse como precedentes crucíferas o compuestas, manteniendo las parcelas libre de malas hierbas y restos del cultivo anterior. No deberán utilizarse el mismo terreno para más de dos campañas con dos cultivos a lo largo de cuatro años, salvo que se realice una sola plantación por campaña, alternando el resto del año con barbecho, cereales o leguminosas.

La desinfección química del suelo no es recomendable, ya que se trata de un cultivo de ciclo corto y muy sensible a productos químicos, pero si se recomienda utilizar la solarización en verano.

Se recomienda el acolchado durante los meses invernales empleando láminas de polietileno negro o transparente. Además también se emplean en las lechugas de pequeño tamaño y las que no forman cogollos cuyas hojas permanecen muy abiertas, para evitar que se ensucien de tierra procedentes del agua de lluvia.

2.7.3 Plantación

La plantación se realiza en caballones o en banquetas a una altura de 25 cm. para que las plantas no estén en contacto con la humedad, además de evitar los ataques producidos por hongos.

La plantación debe hacerse de forma que la parte superior del cepellón quede a nivel del suelo, para evitar podredumbres al nivel del cuello y la desecación de las raíces. La densidad de plantación depende de la variedad:

Variedad	Nº plantas/ha
Romana	60.000
Iceberg	80.000
Baby	130.000

Tabla 2.1 Densidad. ²

² www.leafyvegetables.nl/download/06_025-030_Ryder.pdf

2.7.4 Riego.

Los mejores sistemas de riego, que actualmente se están utilizando para el cultivo de la lechuga son, el riego por goteo (cuando se cultiva en invernadero), y las cintas de exudación (cuando el cultivo se realiza al aire libre), como es el caso del sudeste de España.

Existen otras maneras de regar la lechuga como el riego por gravedad y el riego por aspersión, pero cada vez están más en recesión, aunque el riego por surcos permite incrementar el nitrógeno en un 20%.

Los riegos se darán de manera frecuente y con poca cantidad de agua, procurando que el suelo quede aparentemente seco en la parte superficial, para evitar podredumbres del cuello y de la vegetación que toma contacto con el suelo. Se recomienda el riego por aspersión en los primeros días post-trasplante, para conseguir que las plantas agarren bien.

2.7.5 Blanqueo.

Las técnicas de blanqueo empleadas en lechugas de hoja alargada (tipo Romana), consisten en atar el conjunto de hojas con una goma. Actualmente la mayoría de las variedades cultivadas acogollan por sí solas. En el caso de lechugas para hojas sueltas, el blanqueo se realiza con campanas de poliestireno invertidas. Si el cultivo es de invierno-primavera para evitar el espigado, se suele emplear la manta térmica, con el fin de que la planta se desarrolle más rápidamente, no se endurezca y no acumule horas de frío que le hagan subirse a flor. El blanqueo se realiza entre 5 y 7 días antes de la recolección.

2.7.6 Abonado.

El 60-65% de todos los nutrientes son absorbidos en el periodo de formación del cogollo y éstas se deben de suspender al menos una semana antes de la recolección.

El aporte de estiércol en el cultivo de lechuga se realiza a razón de 3 kg/m², cuando se trata de un cultivo principal desarrollado de forma independiente de otros. No obstante, cuando se cultiva en invernadero, puede no ser necesaria la estercoladura, si ya se aportó estiércol en los cultivos anteriores.

La lechuga es una planta exigente en potasio, debiendo cuidar los aportes de este elemento, especialmente en épocas de bajas temperaturas; y al consumir más potasio va a absorber más magnesio, por lo que habrá que tenerlo en cuenta a la hora de equilibrar esta posible carencia. Sin embargo, hay que evitar los excesos de abonado, especialmente el nitrogenado, con objeto de prevenir posibles

fitotoxicidades por exceso de sales y conseguir una buena calidad de hoja y una adecuada formación de los cogollos. También se trata de un cultivo bastante exigente en molibdeno durante las primeras fases de desarrollo, por lo que resulta conveniente la aplicación de este elemento vía foliar, tanto de forma preventiva como para la corrección de posibles carencias.

El abonado de fondo puede realizarse a base de complejo 8-15-15, a razón de 50 g/m². Posteriormente, en sistema de riego tradicional por gravedad, un abonado de cobertera orientado consistiría en el aporte de unos 10 g/m² de nitrato amónico. En suelos de carácter ácido, el nitrato amónico puede ser sustituido por nitrato de cal a razón de unos 30 g/m², aportados en cada riego, sin superar el total de 50 g/m². También son comunes las aplicaciones de nitrógeno vía foliar, en forma de urea, cuando los riegos son interrumpidos y las necesidades de nitrógeno elevadas.

En fertilización, la programación puede realizarse de la siguiente forma:

En caso necesario, aportar unos 25 g/m² de abono complejo 8-15-15, como abonado de fondo. Tras la plantación, regar diariamente durante 4-5 días sin aporte de abono, para facilitar el enraizamiento de las plantas. Durante el primer mes, regar tres veces por semana, aportando las siguientes cantidades de abono en cada riego:

- 0.30 g/m² de nitrógeno (N).
- 0.10 g/m² de anhídrido fosfórico (P₂O₅).
- 0.20 g/m² de óxido de potasio (K₂O).

Al mes siguiente, regar tres veces por semana, aplicando en cada riego:

- 0.50 g/m² de nitrógeno (N).
- 0.10 g/m² de anhídrido fosfórico (P₂O₅).
- 0.10 g/m² de óxido de potasio (K₂O).

2.7.7 Malas hiervas.

Siempre que las malas hierbas estén presentes será necesaria su eliminación, pues este cultivo no admite competencia con ellas. Este control debe realizarse de manera integrada, procurando minimizar el impacto ambiental de las operaciones de escarda.

Se debe tener en cuenta en el periodo próximo a la recolección, las malas hierbas pueden sofocar a la lechuga, creando un ambiente propicio al desarrollo de enfermedades que invalida el cultivo. Además las virosis se pueden ver favorecidas por la presencia de algunas malas hierbas.

Las materias activas recomendadas en el cultivo de la lechuga contra hierbas anuales son:

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Benfluralina 18%	6.50-9.50 l/ha	Concentrado emulsionable
Pendimetalina 33%	3-5 l/ha	Concentrado emulsionable
Propizamida 40%	1.75-3.75 l/ha	Suspensión concentrada

Tabla 2.3 Materia para eliminar hiervas. ³

2.7.8 Recolección.

La madurez está basada en la compactación de la cabeza. Una cabeza compacta es la que requiere de una fuerza manual moderada para ser comprimida, es considerada apta para ser cosechada. Una cabeza muy suelta está inmadura y una muy firme o extremadamente dura es considerada sobremadura. Las cabezas inmaduras y maduras tienen mucho mejor sabor que las sobremaduras y también tienen menos problemas en poscosecha. Lo más frecuente es el empleo de sistemas de recolección mixtos que racionalizan la recolección a través de los cuales solamente se cortan y acarrear las lechugas en campo, para ser confeccionadas posteriormente en almacén.



³ www.ncbi.nlm.nih.gov/ICTVdb/ICTVdB/57010038.htm

2.8 ALMACENAMIENTO.

Una temperatura de 0°C y una humedad relativa mayor del 95% se requiere para optimizar la vida de almacenaje de la lechuga. El enfriamiento por vacío (vacuum cooling) es generalmente utilizado para la lechuga tipo Iceberg, sin embargo el enfriamiento por aire forzado también puede ser usado exitosamente. El daño por congelamiento puede ocurrir si la lechuga es almacenada a menos de -0.2°C. La apariencia del daño es un oscurecimiento translúcido o un área embebida en agua, la cual se torna legamosa y se deteriora rápidamente o después de descongelarse. Durante el almacenamiento pueden producirse pudriciones blandas bacterianas (bacterial soft-rots), causadas por numerosas especies de bacterias, dando lugar a una destrucción legamosa del tejido infectado. Las pudriciones blandas pueden dar pie a infecciones por hongos. La eliminación de las hojas exteriores, enfriamiento rápido y una baja temperatura de almacenamiento reducen el desarrollo de las pudriciones blandas bacterianas.

Los hongos pueden producir una desorganización acuosa de la lechuga (ablandamiento acuoso) causado por Sclerotinia o por Botritis cinerea, estas se distinguen de las pudriciones blandas bacterianas por el desarrollo de esporas negras y grises. La eliminación de las hojas y la baja temperatura también pueden reducir la severidad de estas pudriciones.

2.9 VALOR NUTRICIONAL.

La lechuga es una hortaliza pobre en calorías, aunque las hojas exteriores son más ricas en vitamina C que las interiores.

Valor nutricional de la lechuga en 100 g de sustancia	
Carbohidratos (g)	20.1
Proteínas (g)	8.4
Grasas (g)	1.3
Calcio (g)	0.4
Fósforo (mg)	138.9
Vitamina C (mg)	125.7
Hierro (mg)	7.5
Niacina (mg)	1.3
Riboflavina (mg)	0.6
Tiamina (mg)	0.3
Vitamina A (U.I.)	1155
Calorías (cal)	18

Tabla 2.4 Valor nutricional de la lechuga. ⁴

⁴ www.ncbi.nlm.nih.gov/ICTVdb/ICTVdB/57010038.htm

2.10 PLAGAS Y ENFERMEDADES.

2.10.1 Plagas.

-TRIPS (*Frankliniella occidentalis*)

Se trata de una de las plagas que causa mayor daño al cultivo de la lechuga, pues es transmisora del virus del bronceado del tomate (TSWV). La importancia de estos daños directos (ocasionados por las picaduras y las hendiduras de puestas) depende del nivel poblacional del insecto (aumentando desde mediada la primavera hasta bien entrado el otoño).

Normalmente el principal daño que ocasiona al cultivo no es el directo sino el indirecto transmitiendo el virus TSWV. La presencia de este virus en las plantas empieza por provocar grandes necrosis foliares, y rápidamente éstas acaban muriendo.

El adulto de *Frankliniella occidentalis* mide de 1-1.5 mm. de longitud, es alargado y con color variable desde blanco-amarillento a marrón, siendo más oscuro en invierno y más claro en verano. Los huevos de 0.2 mm. de tamaño se localizan debajo del tejido vegetal, por tanto no son visibles a simple vista. Las larvas son ápteras y las ninfas no se alimentan y son poco móviles. Esta plaga se encuentra también en las malas hierbas localizadas en los márgenes del cultivo.

Lucha biológica.

Sobre diferentes cultivos se localizan de manera espontánea algunos artrópodos depredadores de *F. occidentalis*, destacando un insecto del género *Orius* y los ácaros del grupo de los Fitoseidos. Resulta efectivo plantar en los márgenes de la parcela algunas plantas por la que estos insectos muestran una especial predilección, como es el caso de las habas o alcachofas.

Métodos culturales.

Evitar el uso de material vegetal contaminado, desplazar los cultivos de lechuga en el tiempo para no coincidir, fundamentalmente en las primeras fases vegetativas, con poblaciones altas de trips y eliminar las malas hierbas y restos vegetales antes de la plantación.

En invernaderos colocar mallas para evitar la entrada de trips y colocar también trampas para detectar la presencia de los primeros individuos.

Lucha química.

Una vez superado el nivel poblacional de trips tolerado por el cultivo se procederá a la lucha química, teniendo en cuenta los residuos sobre el cultivo y la aparición de resistencias en la plaga.

Las formas de aplicación de los productos (espolvoreo y pulverización) se deberán alternar para lograr mayor eficacia. En invernadero se recomienda la termonebulización.

Si las poblaciones de trips son muy elevadas, será necesario realizar dos tratamientos en el plazo de 5 días para romper el ciclo, teniendo en cuenta que las fases de huevo y ninfa no van a ser afectadas por el primer tratamiento y necesitan unos días para emerger.

Entre las materias activas recomendadas destacan: Metiocarb, Formetanato, Fenitrotion y Lindano.

Minadores (*Liriomyza trifolii* y *Liriomyza huidobrensis*)

Forman galerías en las hojas y si el ataque de la plaga es muy fuerte la planta queda debilitada. Los tratamientos comenzarán cuando se observen los primeros síntomas, procurando mojar bien toda la superficie de la planta; siendo las siguientes materias activas las recomendadas:

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Abamectina 1.8%	0.05-0.10%	Concentrado emulsionable
Abamectina 3.37%	0.03-0.05%	Concentrado emulsionable
Metidation 30% + Piridafention 20%	0.02-0.04%	Concentrado emulsionable

Tabla 2.5 Tratamiento para plagas. ⁵

Mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*).

Produce una melaza que deteriora las hojas, dando lugar a un debilitamiento general de la planta. Los tratamientos químicos comenzarán una vez que la población de mosca blanca vaya incrementándose, siendo recomendables las siguientes materias activas:

⁵ www.vegetablemdonline.ppath.cornell.edu/factsheets/Viruses_LeafyVege.htm

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Alfa cipermetrin 5%	0.06-0.08%	Concentrado emulsionable
Imidacloprid 20%	0.05-0.08%	Concentrado soluble

Tabla 2.6 Tratamiento para Plagas. ⁶

Pulgones (*Myzus persicae*, *Macrosiphum solani* y *Narsonovia ribisnigri*)

Se trata de una plaga sistemática en el cultivo de la lechuga, siendo su incidencia variable según las condiciones climáticas. El ataque de los pulgones suele ocurrir cuando el cultivo está próximo a la recolección. Aunque si la planta es joven, y el ataque es considerable, puede arrasar el cultivo, además de ser entrada de alguna virosis que haga inviable el cultivo.

Los pulgones colonizan las plantas desde las hojas exteriores y avanzando hasta el interior, excepto la especie *Narsonovia ribisnigri*, cuya difusión es centrífuga, es decir, su colonización comienza en las hojas interiores, multiplicándose progresivamente y trasladándose después a las partes exteriores. A continuación se muestran las materias activas recomendadas para el control de pulgones:

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Acefato 75%	0.05%	Polvo soluble en agua
Alfa cipermetrin 4%	0.08-0.10%	Concentrado emulsionable
Cipermetrin 2% + Metil pirifos 25%	0.20-0.25%	Concentrado emulsionable
Deltametrin 2.5% + Heptenofos 40%	0.05%	Concentrado emulsionable
Imidacloprid 20%	0.05-0.08%	Concentrado soluble
Lambda cihalotrin 2.5%	0.04-0.08%	Concentrado emulsionable
Permetrin 25%	0.02-0.04%	Concentrado emulsionable
Tau-fluvalinato 24%	0.02-0.04%	Suspensión concentrada

Tabla 2.7 Tratamiento para plagas. ⁷

^{6, 7} www.vegetablemndonline.ppath.cornell.edu/factsheets/Viruses_LeafyVege.htm

2.10.2 Enfermedades.

Antracnosis (*Marssonina panattoniana*)

Los daños se inician con lesiones de tamaño de punta de alfiler, éstas aumentan de tamaño hasta formar manchas angulosas-circulares, de color rojo oscuro, que llegan a tener un diámetro de hasta 4 cm. Para su control se recomienda la desinfección del suelo y de la semilla, además de tratar con alguna de las materias activas recomendadas:

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Captan 47.5%	0.25-0.30%	Suspensión concentrada
Folpet 10% + Oxiclورو de cobre 11.2% + Sulfato cuprocálcico 10.4%	0.25-0.35%	Polvo mojable
Folpet 50%	0.25-0.30%	Microgránulo
Mancozeb 40% + Sulfato de cobre 11%	0.30%	Polvo mojable

Tabla 2.8 Tratamiento para enfermedades. ⁸

Botritis (*Botrytis cinerea*)

Los síntomas comienzan en las hojas más viejas con unas manchas de aspecto húmedo que se tornan amarillas, y seguidamente se cubren de moho gris que genera enorme cantidad de esporas. Si la humedad relativa aumenta las plantas quedan cubiertas por un micelio blanco; pero si el ambiente está seco se produce una putrefacción de color pardo o negro. Esta enfermedad se puede controlar a partir de medidas preventivas basadas en la disminución de la profundidad y densidad de plantación, además de reducir los excesos de humedad.

A continuación se muestra las diferentes materias activas eficaces y autorizadas actualmente:

⁸ www.dpvweb.net/dpv/showadpv.php?dpvno=346

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN
Cimoxanilo 4% + Folpet 40%	0.30%	Polvo mojable
Iprodiona 50%	0.10-0.15%	Suspensión concentrada
Procimidona 3%	20-30 kg/ha	Polvo para espolvoreo
Vinclozolina 50%	0.10-0.15%	Polvo mojable

Tabla 2.9 Tratamiento para enfermedades. ⁹

Mildiu Velloso (*Bremia lactucae*)

En el haz de las hojas aparecen unas manchas de un centímetro de diámetro, y en el envés aparece un micelio velloso; las manchas llegan a unirse unas con otras y se tornan de color pardo. Los ataques más importantes de esta plaga se suelen dar en otoño y primavera, que es cuando suelen presentarse periodos de humedad prolongada, además las conidias del hongo son transportadas por el viento dando lugar a nuevas infecciones. Para combatir esta enfermedad se recomiendan las siguientes materias activas, teniendo en cuenta que dichas aplicaciones sobre infecciones cuyo desarrollo foliar cubre completamente el suelo tiene una eficacia limitada.

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Benalaxil 6% + Cimoxanilo 3.2% + Folpet 35%	0.23-0.33%	Polvo mojable
Benalaxil 8% + Mancozeb 65%	0.20-0.30%	Polvo mojable
Captan 40% + Tiabendazol 17%	0.15-0.25%	Polvo mojable
Captan 85%	0.15-0.25%	Polvo mojable
Cimoxamilo 4% + Folpet 40%	0.30%	Polvo mojable
Etirimol 6% + Maneb 40%	0.30-0.60%	Suspensión concentrada
Mancozeb 60% + Metil tiofanato 14%	2-4 l/ha	Polvo mojable
Zineb 50%	0.40%	Suspensión concentrada

Tabla 2.10 Tratamiento para enfermedades. ¹⁰

^{9, 10} www.dpvweb.net/dpv/showadpv.php?dpvno=346

Esclerotinia (Sclerotinia sclerotiorum)

Se trata de una enfermedad principalmente de suelo, por tanto las tierras nuevas están exentas de este parásito o con infecciones muy leves. La infección se empieza a desarrollar sobre los tejidos cercanos al suelo, pues la zona del cuello de la planta es donde se inician y permanecen los ataques. Sobre la planta produce un marchitamiento lento en las hojas, iniciándose en las más viejas, y continúa hasta que toda la planta queda afectada. En el tallo aparece un micelio algodonoso que se extiende hacia arriba en el tallo principal.

Para el control de esta enfermedad se recomiendan las siguientes materias activas.

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Captan 40% + Tiabendazol 17%	0.15- 0.25%	Polvo mojable
Folpet 40% + Tiabendazol 17%	0.15- 0.25%	Suspensión concentrada
Procimidona 3%	20-30 kg/ha	Polvo para espolvoreo
Vinclozolina 50%	0.10- 0.15%	Suspensión concentrada

Tabla 2.11 Tratamiento para enfermedades. ¹¹

Septoriosis (Septoria lactucae)

Esta enfermedad produce manchas en las hojas inferiores.

Se combate empleando algunas de las siguientes materias activas.

MATERIA ACTIVA	DOSIS	PRESENTACIÓN DEL PRODUCTO
Cimoxanilo 3% + Folpet 32%+ Ofurace 6%	0.20- 0.30%	Polvo mojable
Folpet 10% + Oxiclورو de cobre 11.2% + Sulfato cuprocálcico 10.4%	0.25- 0.35%	Polvo mojable

Tabla 2.12 Tratamiento para enfermedades. ¹²

¹¹ www.dpvweb.net/dpv/showadpv.php?dpvno=346

¹² <http://plantdisease.ippc.orst.edu/disease.cfm?RecordID=681>

Virus del mosaico de lechuga (LMV).

Es una de las principales virosis que afectan al cultivo de la lechuga, debido a los importantes daños causados. Se transmite por semilla y pulgones.

Los síntomas producidos pueden empezar incluso en semillero, presentando moteados y mosaicos verdosos que se van acentuando al crecer las plantas, dando lugar a una clorosis generalizada, en algunas variedades pueden presentar clorosis foliares.

Virus del bronceado del tomate (TSWV).

Las infecciones causadas por este virus están caracterizadas por manchas foliares, inicialmente cloróticas, y posteriormente, necróticas e irregulares, a veces tan extensas que afectan a casi toda la planta que, en general, queda enana y se marchita en poco tiempo. En los campos de lechuga la incidencia de la virosis no supera el 20-50%.

Se transmite por el trips *Frankliniella occidentalis*, este se nutre de las hojas, mediante un mecanismo de inyección de saliva en los tejidos vegetales seguida de vaciado por succión del contenido celular predigerido. Además de provocar heridas a las plantas con los pinchazos de alimentación.

Las relaciones del TSWV con el vector son de tipo persistente propagativo, pues la concentración del virus en el cuerpo del vector aumenta con la edad del insecto y la fecundidad disminuye en los insectos virulíferos.

2.11 FISIOPATÍAS.

Latencia de la semilla y mala germinación, para romper la latencia se recomienda:

- Prerrefrigeración en cámara fría (2°C, 48 horas).
- Prerrefrigeración con agua (48 horas a remojo).
- Prerrefrigeración en cámara oscura.
- Tratamientos con solución de giberelinas (24 horas).

Tip burn: se manifiesta como una quemadura de las puntas de las hojas más jóvenes y se origina fundamentalmente por la falta de calcio, en los órganos en los que aparece y además por un excesivo calor, salinidad, exceso de nitrógeno y defecto de potasio, desequilibrio de riegos y escasa humedad relativa. Las hojas con las puntas quemadas dan una apariencia desagradable y el margen de la hoja dañada es más débil y susceptible a pudriciones.

Espigado o subida de la flor: diversos factores influyen en el desarrollo del espigado: características genéticas, endurecimiento de la planta en primeros periodos de cultivo, fotoperiodos largos, elevadas temperaturas, sequía en el suelo y exceso de nitrógeno. Esta fisiopatía afecta negativamente al acogollado de la lechuga.

Antocianos en las hojas: en época de bajas temperaturas durante el ciclo del cultivo algunas variedades son muy sensibles al enrojecimiento de sus hojas, sobre todo la lechuga tipo Trocadero.

Escarchas en primavera: pueden dar lugar a diversas alteraciones como descamaciones epidérmicas y desecaciones. Como medida preventiva se colocan campanas de poliestireno sobre las plantas.

Granizo: afecta negativamente tanto por el daño directo como por el indirecto, ya que sobre las heridas pueden desarrollarse patógenos secundarios, afectando a la comercialización del producto.

Punteado pardo: es una fisiopatía común debido a la exposición a bajas concentraciones de etileno que produce depresiones oscuras especialmente en la nervadura media de las hojas. Secundariamente, el etileno estimula la producción de compuestos fenólicos que conduce a la síntesis de pigmentos pardos. Bajo condiciones severas, las manchas pueden ser encontradas en el tejido verde de las hojas y en todo el cogollo. Esta fisiopatía hace a la lechuga no comercial. La contaminación por etileno puede originarse por montacargas que trabajan o funcionan con propano, transporte de cargas mixtas, o almacenaje con frutas generadoras de etileno tales como manzanas y peras.

Mancha parda (brown stain): los síntomas de esta fisiopatía son grandes manchas deprimidas de color amarillo rojizo principalmente en la nervadura media de las hojas. Estas pueden oscurecerse o agrandarse con el tiempo. La mancha parda en algunos casos se observa como un veteado pardo rojizo. La mancha parda es causada por la exposición a atmósferas con CO₂ sobre 3%, especialmente a bajas temperaturas.

Costilla rosada (pink rib): es una fisiopatía en la cual la nervadura de la hoja adquiere una coloración rojiza. La sobremadurez de los cogollos y el almacenaje a altas temperaturas incrementan este desorden. Las exposiciones al etileno no incrementan esta fisiopatía y atmósferas con bajo oxígeno no lo controlan.

2.12 INCREMENTO DE PRODUCTIVIDAD CON DIFERENTES TÉCNICAS.

A continuación se muestran algunos artículos que contienen suficiente información obtenida de diferentes investigaciones, que tienen como objetivo incrementar la productividad en la producción de diferentes hortalizas. Se han explorado diferentes técnicas, de las que más adelante se hace mención, sin embargo cabe señalar que no se encontró información acerca de incrementar la productividad en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero a través de optimizar la solución nutritiva con la aplicación de la metodología (DOE).

M.M. Peet (1984) evalúa el enriquecimiento de CO₂ y con diferentes niveles de nitrógeno para el jitomate bajo invernadero. En cultivos de jitomate bajo invernadero en suelo, adicionaron tres niveles de nitrógeno, con adición y sin adición de CO₂, usando un sistema de lazo de cerrado de recolección y almacenamiento de calor las cosechas pudieron ser enriquecidas con CO₂ un (76-77) % durante el día. El enriquecimiento de CO₂ incremento el peso del fruto en un (14 y 27) % en ambos cultivos de 1981 y 1982 respectivamente. Los niveles de nitrógeno a pesar que fueron diferentes métodos de aplicación entre 1981 y 1982, observaron que los niveles bajos de nitrógeno producen una mejor respuesta al enriquecimiento de CO₂ que los niveles altos de nitrógeno. También observaron en los niveles bajos de nitrógeno, una tendencia a la baja en el rendimiento y calidad del cultivo que en los invernaderos que no se enriquecieron con CO₂, esta tendencia también la observaron en el vigor vegetativo a diferencia de los invernaderos enriquecidos con CO₂ que observaron con mayor vigor vegetativo.

Johannes F.J. (2009) evaluaron el rendimiento y calidad del jitomate bajo invernadero con un método de enfriamiento en un clima tropical. Diferentes cosechas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) fueron producidas en cuatro invernaderos durante la temporada 2005/2006 en el centro de Tailandia. En dos de los invernaderos las paredes laterales y el techo estaban cubiertos por redes sombra y estos fueron ventilados cuando la temperatura excedía los 30 °C (NET). Los otros dos están cubiertos por una película de polietileno y equipados con un sistema de enfriamiento el cual consta de un ventilador y una almohadilla (EVAP). Con el sistema EVAP la temperatura fue reducida en 3.2 °C durante el día y 2.3 °C durante la noche, esto con respecto al sistema NET. La temperatura máxima promedio en EVAP fue 4 grados menos que en NET y la humedad relativa en EVAP fue más alta aproximadamente en 30% durante el día y 15% durante la noche. El consumo de agua fue significativamente menor en EVAP (1.2Litros/planta) contra NET (1.8Litros/planta) que se atribuye a la reducción de transpiración. El rendimiento total fue similar en EVAP (6.4 Kg/planta) y NET (6.3Kg/planta) sin embargo el rendimiento del fruto comercializable fue significativamente mayor en NET (4.5 Kg/planta) y EVAP (3.8 Kg/planta) concluyeron que en las regiones con alta humedad atmosférica el enfriamiento por evaporación sin modificaciones técnicas que permitan la deshumidificación no va a mejorar la producción de jitomates.

Bishnu P. Chapagain (2004) estudió el efecto del remplazo parcial del KCl por KCl MgCl₂, utilizaron tres diferentes soluciones en un sistema hidropónico y evaluaron el efecto en el crecimiento, rendimiento y calidad del jitomate bajo invernadero con la substitución parcial del KCl por KCl MgCl₂. 45 días después del trasplante usaron 3 diferentes soluciones nutritivas con diferentes fuentes de potasio; (1) KNO₃, (2) KCl, y (3) KCl·MgCl₂+KCl. En los tratamientos 2 y 3 utilizaron como fuente de nitrógeno NH₄NO₃, Ca (NO₃)₂ y HNO₃, la altura de la planta y la clorofila fueron más altas en KCl+KCl·MgCl₂. El contenido de Mg en las hojas fue significativamente menor en el tratamiento de KCl mientras que más altas en KCl+KCl·MgCl₂. En las soluciones con KCl y KCl+KCl·MgCl₂ encontraron mayor contenido de Cl en comparación con el tratamiento KNO₃. No observaron toxicidad de Cl en ninguno de los tratamientos. El rendimiento total no fue diferente entre los tratamientos. La firmeza de la fruta y la frescura del cáliz lo mejoraron significativamente por KCl y KCl+KCl·MgCl₂ el número de frutos podridos y manchas se redujeron significativamente en ambos tratamientos. KCl+KCl·MgCl₂ que también dio lugar a niveles significativamente más altos de la glucosa, Mg. El contenido de materia seca medido en ambos tratamientos 2 y 3 respecto a la fruta fue baja en NO₃ y alto en contenido de Fe, aunque KCl como fuente de K ha mostro menor nivel de Mg en área foliar en comparación con KNO₃. El uso de la fertirrigación en KCl mejoró la apariencia del fruto de jitomate y sus cualidades. Sin embargo el 25% de reemplazo de KCl por KCl+KCl·MgCl₂ aumento el nivel de Mg en áreas foliares y la calidad de la fruta mejoró aún más.

Alberto Pardossi y col. (2002) compararon dos métodos de entrega de nutrientes en los lixiviados de la solución nutritiva para el melón bajo invernadero, un sistema de control convencional que ajusta el subministro basado en la conductividad eléctrica (CE) de la recirculación del lixiviado y otro sistema basado en el subministro de nutrientes (N,P y K) programados semanalmente. El método de subministro de nutrientes no influyo en el rendimiento o calidad del fruto más sin embargo el subministro programado redujo significativamente el consumo de agua en un 40% respecto al método de CE.

Dominique-André Demers (1998) estudió el efecto en el rendimiento de la planta y fruto de jitomate bajo invernadero con periodos de luz extendidos. Un cultivo de jitomate fue producido bajo luz natural y otro con un periodo de luz artificial extendido a 14, 16, 20 y 24h. En comparación con los tratamientos de luz natural los tratamientos de luz extendida incremento notablemente el rendimiento del fruto y de la planta en un (40-57)% respectivamente más sin embargo los periodos extendidos a más de 14 horas no mejoraron el rendimiento. Se realizo un segundo experimento y se la cosecha se expuso a 14 y 24 horas podando los racimos a un solo fruto, al final del experimento las plantas expuestas al periodo de luz continua no mejoraron el rendimiento de la planta y tampoco el del fruto con respecto al periodo de 14 horas, la poda del fruto disminuye el rendimiento del fruto y da mayor vigor al crecimiento vegetativo. Los datos sugieren que disminución de crecimiento y rendimiento en el tratamiento de luz continua se debe a la acumulación de almidón y azúcar.

Juárez Hernández Ma. De Jesús (2006) proponen una solución nutritiva basada en aniones y cationes para evaluar el efecto de uno o más nutrientes de las soluciones nutritivas en el crecimiento, desarrollo, rendimiento, calidad del producto y absorción de los nutrientes. En los cultivos se han llevado a cabo numerosas investigaciones, sin que exista una técnica con aceptación general. Lo más común es que se modifique la concentración del nutriente en cuestión (anión o catión) y en el mejor de los casos que se controle los demás nutrientes restantes manteniendo una concentración constante. El uso de soluciones nutritivas que contienen N-NH_4^+ y N-NO_3^- son un buen ejemplo de soluciones con cambios simultáneos en los nutrientes del tipo anión y catión. Por otra parte, con base en algunos estudios sistemáticos acerca de las características químicas de las soluciones nutritivas, y cómo éstas afectan a su vez dichas características de los cultivos, se analizó un número de estudios acerca del uso del N-NH_4^+ y/o del N-NO_3^- . Se encontró que dichos estudios no permiten hacer inferencias sobre los efectos directos del N-NH_4^+ , o del N-NO_3^- , así como de su interacción.

Proponen el empleo de soluciones nutritivas que correspondan, por su estructura, al diseño experimental factorial completo; con combinaciones de soluciones nutritivas (tratamientos) de un grupo de relaciones de concentración NH_4^+ : cationes, con otro grupo de relaciones similares NO_3^- : aniones. Dichos tratamientos permiten evaluar los efectos directos del N-NH_4^+ y el N-NO_3^- y de su interacción, sin interferencias de otra índole (eg., presión osmótica y pH de la solución nutritiva). En la revisión y análisis de los estudios realizados sobre la respuesta de las plantas a las relaciones $\text{N-NH}_4^+/\text{N-NO}_3^-$ se encontró en todos los casos, que los tratamientos para investigar los efectos de las formas químicas: N-NH_4^+ y/o N-NO_3^- no permiten hacer inferencias reales sobre el efecto directo de cada una de las formas nitrogenadas en las variables-respuesta, ni tampoco acerca de la interacción de ambas formas. Además, no tuvieron cuidado de que todas las presiones osmóticas de las soluciones nutritivas fueran similares.

Con base en la metodología propuesta por Steiner, fundamentada en el estudio de las relaciones verdaderas generadas con cationes y aniones ($\text{NH}_4^+:\text{K}^{++}\text{Ca}_2^{++}\text{Mg}_2^{++}\text{NH}_4^+$ y $\text{NO}_3^-:\text{H}_2\text{PO}_4^{--}\text{SO}_4^{2--}\text{NO}_3^-$) se plantearon un ejemplo de un conjunto de soluciones nutritivas en un arreglo estructural de diseño factorial completo, que permite determinar mediante las variables de respuesta, los efectos directos e interacciones de dichas formas químicas del nitrógeno, cuidando además que todas las soluciones presenten igual presión osmótica y pH.

DO Huett y EB Dettmann (1988) cultivaron plántula de jitomate a diferentes concentraciones de nitrógeno evaluando su impacto en la planta. Trabajaron con plantas de jitomate bola (*Lycopersicon esculentum*) "que sometieron a diferentes concentraciones de nitrógeno para su germinación, desarrollo y obtención de explantes. Algunos tejidos que se cultivaron y se volvieron a subcultivar con reguladores de crecimiento para obtener brotes y callos. Los resultados de germinación fueron diferentes a las tres concentraciones, baja a los cinco días, alta a los siete días y estándar a los nueve días. La viabilidad de las semillas fue idéntica en la concentración estándar y alta con un 87.5%. En el caso del

desarrollo la concentración alta obtuvo mejores resultados al alcanzar una altura promedio de 8.4 cm de crecimiento en las plantas, mientras en las concentración estándar y baja fueron muy parecidos con un promedio de 4.6 y 5.1cm respectivamente

Para los procesos de la desdiferenciación, en la formación de callo los explantes procedentes de hipocotilo y nudo fue mayor a concentración estándar y baja (86% para ambos casos). En cuanto a la formación de brotes en los explantes procedentes de nudo se obtuvo un 70% a una concentración alta de nitrógeno Para el diseño experimental se seleccionaron concentraciones de nitrógeno muy cercanas al valor estándar o normal. Por lo que era de esperarse que los resultados experimentales obtenidos no presenten gran diferencia entre si. Sin embargo en el desarrollo de las plántulas con mayor concentración de nitrógeno, el promedio alcanzado es casi el doble de lo observado en la concentración normal. Para el diseño del experimento las concentraciones experimentales de nitrógeno, se seleccionaron muy cercanas al valor estándar o normal que es de 0.84, mientras que las experimentales fueron para baja de 0.67 y la alta de 1.0 g por 1000 ml. Considerando lo anterior, es de esperarse que los resultados experimentales obtenidos no presenten gran diferencia entre si. Sin embargo, en el desarrollo de las plántulas con mayor concentración de nitrógeno el promedio alcanzado es casi el doble de lo observado en la concentración normal (6.9 para la concentración alta y 3.7 para la normal). En el proceso de formación de los brotes resulta importante señalar que los explantes más exitosos en todos los casos fueron los desarrollados con altas concentraciones nitrógeno.

Kosobrukhov A. A. (1988) estudiaron la relación del nitrógeno y potasio con la absorción de nutrientes. El tema más importante para el éxito en la producción de vegetales es una planta fuerte y saludable. En ocasiones la planta crece débil a pesar de tener las condiciones ecológicas necesarias esto es debido a que la planta por algunas causas no es capaz de tomar los nutrientes necesarios del medio. Hay una fuerte relación entre los nutrientes que la planta absorbe y el crecimiento de la planta es por eso la importancia de los fertilizantes en el medio ambiente de crecimiento de la planta. Entre los más esenciales nutrientes se encuentra el nitrógeno y el fósforo. El nitrógeno mostró tener una vital importancia sobre el crecimiento de la planta ya que la mayoría de materia seca consiste en moléculas de nitrógeno. El fósforo debe ser abundante ya que la planta disminuye su absorción en condiciones de baja temperatura y poca luz.

Este estudio fue llevado con un diseño factorial con tres replicas en el invernadero de la facultad de agricultura en el departamento de Horticultura de la universidad de of Yüzüncü Yıl. Diferentes dosis de nitrógeno y fósforo fueron estudiadas. Los niveles analizados de potasio fueron 0, 400, 800, 1200, 1600 y los niveles de fósforo fueron 0, 250, 600, 1200 y 1800. Estos fueron utilizados en 1m³ de agua. Se analizo la cantidad de moléculas de nitrógeno en la materia seca a través del método de Kjeldah. El fósforo fue medido a través del método de color amarillo. El Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, y Mn fueron medidos por espectrómetro de la absorción atómica (Kacar, 1984).

	sd	N	P	K	Ca	Mg	Zn	Mn
P	3	1.10 n.s	5.70 **	2.86 n.s	3.71 *	5.30**	1.76	3.32*
N	4	10.9 ***	0.66 n.s	1.63 n.s	22.3 ***	2.36 n.s	0.88 n.s	5.75***
P*N	12	1.22 n.s	1.77 n.s	3.83 ***	6.12 ***	2.00 n.s	0.88 n.s	2.96**
Error	39							

Tabla 2.13 Análisis de varianza, pruebas F. ¹³

n.s: No significativa.....No es significativo estadísticamente.

*: Significativa en (0.05).....La probabilidad de error es de 5%.

** : Significativa en (0.01)..... La probabilidad de error es de 1%.

***: Significativa en (0.001) La probabilidad de error es de .1%.

En la tabla 2.13 tenemos el análisis de varianza donde se concluye estadísticamente el efecto de los diferentes niveles de nitrógeno fueron significantes en la planta de lechuga. El incremento de fósforo no se encontró significativo para la absorción de nitrógeno sin embargo el fósforo respondió de manera significativa a diferentes niveles de fósforo. Los efectos de interacción entre el nitrógeno y el potasio no fueron significativos en la absorción de los mismos elementos pero resultado de manera significativa la absorción de los nutrientes potasio, calcio y manganeso.

Angel Hernández et al. (1990) elaboraron una formulación para el cultivo de lechuga basado en tres etapas. Para la producción de lechuga es vital tomar en cuenta la temperatura durante el día y la noche, el clima este debe ser favorable para el desarrollo del cultivo de lechuga que requiere temperaturas nocturnas ligeramente frías (5 y 8° C) para el desarrollo y crecimiento, y alta luminosidad en el día para estimular la fotosíntesis, crecimiento y desarrollo del cultivo. Una densidad alta no desfavorece el rendimiento entre las plantas de lechuga a menos que sea excesiva: La densidad recomendada es de (5 a 8) plantas/m².

¹³ <https://qir.kyushuu.ac.jp/dspace/bitstream/2324/8140/1/KJ00004506744.pdf>

El sodio no es un elemento esencial para plantas con fotosíntesis C3 o plantas C3 como el tomate. El cloro si es esencial, generalmente el agua contiene cloro, y también es aportado por algunos fertilizantes que se emplean para preparar la solución nutritiva. El exceso de potasio puede inducir deficiencia de calcio y magnesio. De preferencia usar como fuente de calcio el nitrato de calcio y no cloruro de calcio. De varios experimentos que se han realizado, se han logrado muy buenos resultados con las siguientes concentraciones (mg/L), mostradas en la tabla 2.14.

Etapa	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe
Veinte días.	200	40	200	180	40	100	2
Treinta días.	180	50	250	180	40	100	2
Diez días.	200	55	350	180	45	100	2

Tabla 2.14 Solución nutritiva para la lechuga en ppm. ¹⁴

La germinación de la semilla de lechuga demora 7-12 días aproximadamente; las plántulas se transplantan a las camas definitivas a los 18 días. En esta primera etapa de crecimiento es importante la relación N:K, en la etapa de crecimiento debe estar en 1:1 y posteriormente se debe reducir, incrementándose la concentración de potasio y nitrógeno. El rendimiento dependerá de varios factores: variedad, nutrición, clima, etc. En invernaderos sofisticados de China con alta tecnología, se alcanzan rendimientos de (6 a 8) plantas/m² con un peso en promedio de 200 gramos por pieza, pero a costos muy altos. En invernaderos más sencillos con malla antiáfido se alcanzan rendimientos de (6 a 8) plantas/m² con un peso promedio de 160 gramos, pero con costos más bajos. Las variedades indeterminadas que se han probado con muy buenos resultados son: Radicio. Escarola, Romana, Iceberg. Todas ellas con pesos de más de 140g en promedio.

Horst Marschner (1995) en Florida la producción de jitomate bajo invernadero se enfoca en la administración de todos los nutrientes excepto el oxígeno, hidrógeno y carbono, estos son suministrados de forma óptima a través del aire y el agua. Las cosechas de Florida no se pueden ver beneficiadas por el enriquecimiento de carbono a través de la aportación de CO₂, ya que estas deben ser continuamente ventiladas. La solución nutriente para el jitomate debe ser ajustada de acuerdo a las diferentes etapas de crecimiento ya que hay nutrientes que la planta demanda en menor cantidad en algunas etapas de desarrollo y viceversa la planta requiere en mayor cantidad algunos nutrientes en diferentes etapas de desarrollo como se muestra en la tabla 2.15.

¹⁴http://www.sra.gob.mx/internet/informacion_general/programas/fondo_tierras/manuales/Cultivo_lechuga__Hidroponia.pdf

	Fase de crecimiento.				
	1	2	3	4	5
Nutriente	Transplante 1 ^{er} racimo.	1 ^{er} racimo a 2 ^{do} racimo.	2 ^{do} racimo a 3 ^{er} racimo.	3 ^{er} racimo a 5 ^{to} racimo.	5 ^{to} racimo a cosecha.
N	70	80	100	120	150
P	50	50	50	50	50
K	120	120	150	150	200
Ca	150	150	150	150	150
Mg	40	40	40	50	50
S	50	50	50	60	60
Fe	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8
Cu	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Mn	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Zn	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
B	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Mo	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

NOTA: La concentración de Ca, Mg, y S podrían depender de la calidad de agua en el pozo.

Tabla 2.15 Solución nutritiva para el jitomate.¹⁵

Zhao-Hui Liu (2008) analizaron el efecto del nitrógeno y potasio en el rendimiento y calidad de en diferentes cultivos de hortalizas. La aplicación de grandes cantidades de fertilizantes es una práctica tradicional en el norte de China para la producción de hortalizas por lo general esto lleva a una considerable acumulación de nutrientes en el suelo en un período relativamente corto. Un experimento de campo fue diseñado para estudiar los efectos del nitrógeno (N) y potasio (K), fertilizantes aplicados para optimizar el rendimiento y la calidad de los vegetales. La aplicación de N y K aumentó significativamente los rendimientos del frijol, los mayores rendimientos se obtuvieron en los dos primeros años después de la aplicación de (1500kg de N y 300kg K₂O) por hectárea, en el tercer año hubo una disminución general del rendimiento.

¹⁵ [Hhttp://www.edis.ifas.ufl.edu/document_cv216](http://www.edis.ifas.ufl.edu/document_cv216). Publication Hs796.

Los rendimientos máximos se produjeron cuando los niveles intermedios de N y K (750kg de N y 300kg K₂O por hectárea) se subministraron. Sin embargo no se observaron diferencias significativas en las concentraciones de vitamina C (VC) en el frijol entre los diferentes tratamientos de fertilizantes. El rendimiento del jitomate cultivado después del frijol mostro respuestas significativas a la aplicación de N y K en el primer año. En el segundo año el rendimiento de tomate fue mucho más bajo. Esto sugirió que la aplicación de fertilizante nitrogenado no tuvo ningún efecto sobre el rendimiento del jitomate mientras que la aplicación de K hizo aumentar el rendimiento. La aplicación de K fue asociada a menudo con las concentraciones de azúcar que aumentaron.

Gy. Heltai, Gy. Füleky (1992) analizo la relación y capacidad del suelo con la solución nutritiva. Las condiciones de nutrición para las plantas son determinadas por complejos sistemas químicos, biológicos y microbiológicos del suelo-planta. La capacidad de nutrientes de un suelo es una característica dinámica que está fuertemente influenciado por los parámetros ambientales. La capacidad agroquímica en el campo se caracteriza por el análisis de los suelos, una aproximación más relevante es el modelado del proceso de transformación de nutrientes que a su vez requiere de técnicas adecuadas para el análisis. Los isótopos estables de algunos elementos (¹⁵N, ¹³C, ¹⁸O, ³⁴S) ofrecen herramientas muy eficaces con los que se lleva a cabo estudios sin ningún tipo de riesgo ambiental por la radiactividad. Una encuesta sobre el uso de isótopos estables en la nutrición vegetal, fertilidad del suelo y estudios ambientales presta especial atención a los problemas de relevancia ambiental de la fertilización nitrogenada y métodos analíticos de separación de materiales ¹⁵N-etiquetados que discute en detalle las posibilidades de detección de múltiples componentes para la fertilidad del suelo y que impacten en el rendimiento del fruto.

Edward P. Glenn (1884) desarrollo un modelo del crecimiento de la lechuga bajo invernadero basado en radiación y la temperatura. Estudiaron diferentes cultivos de lechuga bajo invernadero en un ambiente desértico de alta radiación solar, el crecimiento de los cultivos lo correlacionaron positivamente con la radiación ya que los cultivos producidos en otoño utilizaron la luz de forma más eficiente que los cultivos producidos en primavera. La temperatura del aire durante el día también se correlaciono positivamente con el crecimiento y consideraron que el mejor predictor del crecimiento de la lechuga fue la interacción de la temperatura y la radiación solar está variable explica en gran parte la diferencia entre el crecimiento del cultivo de otoño y primavera. Los cultivos de otoño fueron producidos bajo temperaturas más altas y por lo tanto mostraron mayor respuesta a las radiaciones que los cultivos de primavera. Con base en el estudio construyeron una curva general para predecir la duración del ciclo del cultivo a partir de los datos de radiación obtenidos de las cosechas de Arizona, la literatura para los cultivos en gran Bretaña y la región de los Grandes Lagos de los Estados Unidos.

A. R. De Pinheiro Henriques, L. F. M. Marcelis (2000) analizaron la Interacción del nitrógeno y la radiación solar en el crecimiento de la lechuga bajo invernadero. Fue analizada la adaptación morfológica y fisiológica de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) a diferentes niveles de irradiación y suministro de nitrógeno de manera que los efectos de la irradiación se distinguían claramente de los efectos del nitrógeno. La lechuga fue cultivada bajo invernadero con todos los nutrientes necesarios excepto el nitrógeno el cual se suministró en exceso y limitado en relación con el crecimiento de las plantas para proporcionar la nutrición en un estado estacionario, se sombrearon las plantas para generar el nivel bajo de radiación. Los efectos de suministro de nitrógeno y la radiación mostró una interacción con respecto al crecimiento y la producción de materia seca la cual disminuyó fuertemente con la disminución del suministro de nitrógeno y alta irradiación, pero sólo disminuyó ligeramente en baja radiación. El nitrógeno no tuvo ningún efecto sobre la eficiencia de la radiación excepto para el tratamiento de más bajo nitrógeno a alta irradiación. El efecto del nitrógeno en el crecimiento se debió principalmente por su efecto sobre el desarrollo del área foliar y por ende, en la intercepción de luz. La concentración de nitratos está estrechamente relacionada con la concentración de nitrógeno, y la radiación no afecta esta relación. La demanda de nitrógeno orgánico por unidad de área foliar fue menor a menor radiación, el nitrógeno orgánico por unidad de área foliar parecía ajustarse al nivel de radiación independientemente de la cantidad de nitrógeno lo que indica prioridad en la utilización de nitrógeno para la fotosíntesis.

III.- Metodología.

3.1 PASOS DE UN DISEÑO EXPERIMENTAL.

El enfoque sistemático, es importante, para el éxito del experimento y consta de los siguientes pasos:

3.1.1 Reconocimiento y/o planteamiento del problema.

Actualmente los costos de producción de lechuga con hidroponía bajo invernadero equivalen a cuatro pesos por pieza aproximadamente, donde el 50% de estos costos son por el uso de fertilizantes lo cual es vital para la producción de la hortícola, por lo tanto la optimización en el uso de los fertilizantes impactara directamente en los costos de producción.

La mayoría de los fertilizantes son importados, esto debido a que en nuestro país no son producidos y considerando que son derivados del petróleo los precios son muy elevados, todo esto sin contar con la devaluación del peso y el alza del precio del petróleo lo cual ocasiona que impacten fuertemente en los costos de producción de la lechuga con hidroponía bajo invernadero.

Otro problema que se tiene es que el exceso de nutrientes afecta el sustrato (saliniza) lo cual también impactara en los costos y un déficit del nutriente impacta en el crecimiento de la planta. El problema raíz es que se usa la misma solución nutritiva utilizada en otros países donde las condiciones climatológicas son diferentes afectando el rendimiento y crecimiento de la planta.

La falta de investigación acerca de la optimización en la cantidad de ingredientes nutritivos para la solución nutriente de la lechuga con hidroponía bajo invernadero a diferentes condiciones de clima no nos permite ser competitivos en este ámbito en el cual muchos países ya están muy adelantados en sus investigaciones. La gente usa fórmulas nutricionales de otros países, donde las situaciones climatológicas son diferentes, por lo tanto el impacto en la planta es diferente, ocasionando la contaminación en el sustrato o evitando el máximo crecimiento posible en la planta.

Existe una vasta información de los ingredientes que se deben utilizar en la solución nutriente y cantidad, pero no existe información de la cantidad óptima. Tampoco hay información acerca de la cantidad de solución nutriente que se debe utilizar para las diferentes condiciones de clima, todo esto redundando en costos lo que en muchas ocasiones impide que se invierta más en este rubro.

La lechuga (*Lactuca Sativa L*) es la principal especie hortícola más difundida en todo el mundo, en él coexisten diferentes formas y tamaños de lechuga mismos que se consumen en su gran mayoría en estado fresco y el resto en otras presentaciones.

A causa de la creciente demanda de esta hortícola muchos países han desarrollado su producción bajo invernaderos con hidroponía, lo cual ha incrementado su productividad, la mayoría coincide en los diferentes elementos nutrientes que utilizan para elaborar la solución nutriente para la lechuga.

Sin embargo, poco se ha hecho para optimizar la cantidad de nutrientes macros en la solución nutriente para la lechuga con hidroponía. Estos equivalen al 85% de los costos en la solución nutriente para la mayoría de los cultivos con hidroponía y al 40% del costo total del cultivo de lechuga con hidroponía bajo invernadero. Existe una vasta información acerca de los ingredientes que se deben utilizar, pero no existe información acerca de posibles cantidades óptimas de macro nutrientes para las diferentes situaciones de clima. Dada la importancia que han tomado los invernaderos en nuestro país, es importante optimizar la solución nutriente de este cultivo, para favorecer la producción y reducir los costos por uso de fertilizantes cabe hacer notar que en el nuestro país no existe investigación acerca del impacto de los diferentes nutrientes en la planta de lechuga a diferentes condiciones climatológicas.

3.1.2 Selección de factores de estudio y determinación de niveles.

Factor. Una variable de interés controlada hasta cierto punto por el experimentador, de la que se desea estudiar sus efectos en una o varias respuestas. Ejemplo: se desea medir la dimensión de un cilindro para evaluar su efecto sobre la fricción en un sistema mecánico. Los factores pueden ser concebidos como cualitativos o cuantitativos. En nuestro experimento los factores que se estudiaron de los cuales se tiene control sobre estos en cantidad a utilizar pero se desconocía el impacto de estos en el crecimiento de la planta a diferentes condiciones climatológicas: Nitrógeno, Magnesio y Potasio estos son nutrientes utilizados en la solución nutriente para la hortaliza bajo invernadero. También se necesita diferenciar entre factores de control y factores de ruido ya que la diferencia entre estos es que ambos son influyentes en nuestra variable pero unos son controlables y otros no, en nuestro experimento realizado se tomaron lecturas de temperatura para evaluar el efecto de la solución nutritiva en el rendimiento de la lechuga.

Niveles a estudiar. Modalidad específica dentro de un factor; ejemplo, si el factor, es el tiempo de operación, el interés pueden ser estudiar la respuesta del proceso durante tres periodos diferentes, a saber (10, 30 y 50) segundos en este caso se dice que el factor tiene tres niveles. Los niveles para los factores (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) utilizados en nuestro experimento fueron dos y a continuación se muestran en partes por millón (PPM).

	Nitrógeno	Magnesio	Potasio
Nivel bajo	134 ppm	218 ppm	36 ppm
Nivel alto	202 ppm	324 ppm	50 ppm

3.1.3 Estructura de tratamientos.

Estructura de tratamientos de un diseño experimental: consiste del conjunto de tratamientos que el experimentador ha seleccionado para estudiar y/o comparar. Pueden haber estructuras con uno o varios factores; pueden considerarse todos los tratamientos (diseño factorial) o un subconjunto de tratamientos según el interés (diseño factorial incompleto). En el experimento llevado a cabo será un diseño factorial completo ya que se utilizaran y analizaran todas las combinaciones posibles de tres nutrientes con dos niveles cada uno, en caso de que se quisiera analizar todos nutrientes de la solución nutritiva y existan limitaciones de espacio y dinero se podría utilizar un diseño factorial incompleto.

Tratamiento. Se refiere a los distintos niveles de un factor o a la combinación de los niveles de varios factores. En nuestro experimento derivado de que se

analizaran tres factores con dos niveles cada uno, esto en consecuencia nos arroja ocho diferentes posibles combinaciones.

Efecto principal. Indica la contribución que cada factor tiene sobre las variables respuestas. Esta se mide evaluando el cambio que se produce en la respuesta en cada nivel del factor. Este se obtendrá del análisis de las observaciones obtenidas en el experimento donde se buscara que nutriente tiene el mayor impacto en el crecimiento de la planta de lechuga bajo invernadero a diferentes condiciones climatológicas.

Interacción. Considerando los efectos sobre las variables respuestas bajo estudio, la interacción implica una relación o dependencia entre dos o más factores.

3.1.4 Selección de la variable respuesta.

Reconociendo los objetivos de la experimentación. Estudie e identifique los mecanismos fundamentales que afecten a los objetivos y finalmente seleccione las respuestas que incrementaron la posibilidad de entender los mecanismos. Al haber sido bien seleccionada la variable respuesta, se obtuvo mayores posibilidades de que la relación con los factores bajo estudio sea simple y de bajo orden, posibilitando que la información obtenida por el experimento sea clara respecto a los efectos principales a través de métodos simples de análisis. En general se recomienda que la variable respuesta sea:

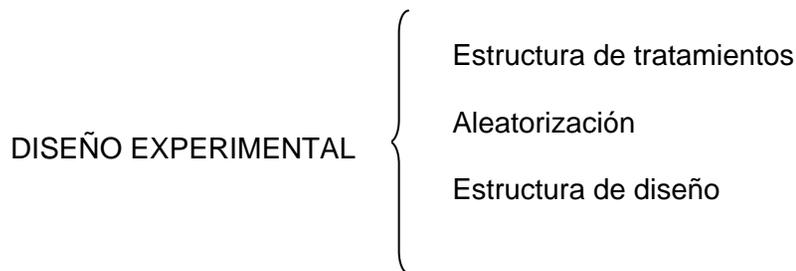
- ✓ Numérica, ya que aporta mayor información.
- ✓ Completa en el sentido que provea toda la información requerida para entender los mecanismos básicos que conlleven al cumplimiento de las metas del experimento. Por ejemplo, si el problema es eliminar el bajo peso de barras de jabón y como variable respuesta se selecciona peso del jabón, no se identificarán los mecanismos y leyes físicas para controlar el peso durante el proceso de jabón. Ya que el peso del jabón depende de la densidad y las coordenadas de corte.
- ✓ Práctica en el sentido de que sea fácil de medir y con una frecuencia razonable.
- ✓ Elemental, que no se influya por otros factores que estén fuera del proceso.
- ✓ Independientes de valores impuestos, como % de productos defectuosos ya se tiene que definir que es defectuoso.

En nuestro modelo la variable respuesta es el peso y para garantizar la confiabilidad de las mediciones y el equipo se realizó un estudio R & R.

3.1.5 Plantear y efectuar un diseño experimental.

Por limitaciones de espacio y costos del experimento el primer paso a seguir fue investigar que nutrientes tienen mayor impacto en el costo de la solución nutritiva para la planta de lechuga teniendo en cuenta que no hay información de alguna investigación acerca de incremento de productividad utilizando herramientas estadísticas (DOE) o de una solución nutritiva óptima. Con base en esta investigación se obtuvo información que avala que los nutrientes con más impacto en el crecimiento de la planta en general son: El nitrógeno, Potasio y Magnesio, siendo estos los de mayor impacto en el costo de solución nutritiva para el crecimiento de la planta.

Una vez que las estructuras de un diseño experimental fueron seleccionadas, se realizaron ajustes para que el experimentador pudiera realizar un experimento eficiente y eficaz. Finalmente el diseño experimental fue especificado por la descripción operativa del método de asignación aleatoria de tratamientos. En resumen el diseño experimental está compuesto por:



Otro objetivo de suma importancia fue identificar qué condiciones hacen que la variable respuesta estimada alcance un valor óptimo. Para el cumplimiento de este objetivo es necesario un enfoque metodológico que combine el uso de los diseños experimentales antes vistos y las técnicas de modelaje del análisis de regresión, pero adicionando técnicas matemáticas de optimización. A esta combinación se le conoce con el nombre general de Metodología de Superficie de Respuesta (MSR).

La MRS es una herramienta que se ha utilizado ampliamente en el desarrollo de procesos industriales y el desarrollo tecnológico, por ejemplo, en la elaboración de alimentos, Beetner (1974) emplea un diseño 2^3 en el estudio de la degradación en el cocinado de extrusión de tiamina y riboflavina. Con el objetivo de optimizar la producción de jamón, Motycka et al. (1984) aplican en una etapa inicial un diseño 2^3 con aplicaciones al centro, y en la etapa de optimización emplean un diseño central compuesto.

3.2 MODELO ESTADÍSTICO DE DATOS.

Modelo estadístico.

En el experimento y análisis se considerara $K=2$ tratamientos; dentro de cada tratamiento se tienen n_i réplicas, cada replica resulta en una medición denotada por y_{ij} , donde i es el índice que identifica al tratamiento y j el que representa las replicas de cada tratamiento, $i=1,2,\dots,k$, $j=1,2,\dots,n_i$. El modelo estadístico que describe a las y_{ij} , con sus suposiciones es:

$$y_{ij} = \mu_i + e_{ij}, \quad e_{ij} \sim N(0, \sigma^2) \quad (3.1)$$

$$i = 1, \dots, k; \quad j = 1, \dots, n_i \quad (e_{ij}) \text{ independientes.}$$

Siendo $\mu_i = \mu + S_i$, recordando que μ denota a una media general de la respuesta y antes de cualquier tratamiento y S_i el efecto esperado del tratamiento.

Las suposiciones implicadas por el modelo estadístico no deben ser rutinariamente aceptadas; la verificación de éstas se traduce en la validación del modelo estadístico. Como todo modelo es sólo una aproximación a lo real y como tal siempre debe diagnosticarse el ajuste del modelo de los datos; para el diagnostico de manera esencial se computan los residuales.

$$E_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}, \quad i = 1, \dots, k; \quad j = 1, \dots, n_i \dots \dots \dots (3.2)$$

Los residuales E_{ij} representan buenas estimaciones de los errores e_{ij} , si el modelo se ajusta a los datos observados experimentalmente. Entonces se analizan los residuales para observar si se parecen o no a los errores teóricos, o dicho de otra manera, para comprobar si los supuestos en el modelo se cumplen de manera adecuada.

En general mediante el análisis de residuales se busca detectar:

1. Si existen dentro del conjunto de datos, datos atípicos (valores muy pequeños o valores muy grandes) respecto al patrón general sugerido por el modelo.
2. Si la variabilidad de los errores se muestra no constante.
3. Si hay evidencia de que la distribución de los errores se desvíe con respecto a la normalidad.
4. Con la utilización de gráficas se buscan tendencias.

El modelo clásico de regresión lineal de primer orden (Castaño, 2007) que describe una relación entre una variable respuesta y y con un factor x está dado por:

$$y = B_0 + B_1x + e, \quad e \sim N(0, \sigma^2) \dots \dots \dots (3.3)$$

Donde B_0 y B_1 B_0 son parámetros que dan forma a la relación entre y y x , e representa al término de error experimental del que se supone que en promedio es cero y que tiene una varianza que no depende del valor de y o x . De la misma manera un modelo de regresión lineal de y en x^2 es:

$$y = B_0 + B_1x + B_{11}x^2 + e, \quad e \sim N(0, \sigma^2) \dots \dots \dots (3.4)$$

Hay que notar que a ambos modelos se les llama lineales porque los parámetros entran sin transformación alguna al modelo; así, para evidenciar, un ejemplo de un modelo no lineal en los parámetros es:

$$Y = 1/B_0 + B_1x + e, \quad e \sim N(0, \sigma^2) \dots \dots \dots (3.5)$$

Cuando se tienen dos factores en el experimento los modelos de regresión lineales de primer orden y segundo orden son:

$$y_i = B_0 + B_1x_{1i} + B_2x_{2i} + e_i, \quad e_i \sim N(0, \sigma^2), \quad i = 1, \dots, \text{independientes} \dots \dots \dots (3.6)$$

$$y_i = B_0 + B_1x_{1i} + B_2x_{2i} + B_{11}x_{1i}^2 + B_{22}x_{2i}^2 + B_{12}x_{1i}x_{2i} + e_i, \quad e_i \sim N(0, \sigma^2), \quad i = 1, \dots, n, \text{ independientes} \dots \dots \dots (3.7)$$

Suponiendo un modelo, una vez realizado el experimento, los objetivos que se plantean son:

1. Estimar los parámetros en el modelo.
2. Evaluar si el modelo representa de manera significativa a la variabilidad observada en la variable respuesta.
3. Evaluar si existen desviaciones en los datos que invaliden algunos de los supuestos del modelo.
4. Realizar predicciones de interpolación y/o extrapolación del comportamiento de Y como función de valores no experimentados de los factores.
5. Encontrar los niveles de los factores en que se optimice el valor de la variable respuesta.

3.3 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Una vez diseñado el experimento el primer paso fue obtener y definir el lugar donde se llevo a cabo el experimento. El experimento se desarrolló en el Campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. El poblado de Amazcala pertenece al municipio del Marqués, Qro. (Figura 3.0 a), el cual se localiza en el sector Suroeste del estado, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud Norte. Su longitud se encuentra entre los 100° 09' y los 100° 24' del Oeste a 1850 m sobre el nivel del mar. Colinda al Oeste con el municipio de Querétaro, al Norte con el estado de Guanajuato, al Este con el municipio de Colón y al Sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. Las carreteras disponibles para llegar el poblado de Amazcala son la carretera 57, la carretera a Chichimequillas y la México libre (Figura 3.0 b). La temperatura media oscila entre los 18 y los 24°C, con un clima predominante subtropical, templadosemiseco (INEGI, 2005).

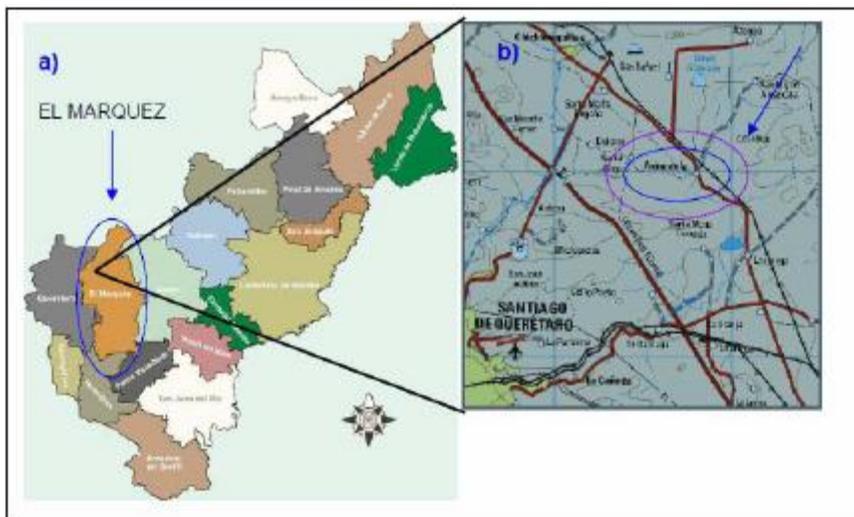


Figura 3.0 Ubicación geográfica de Amazcala.

Ubicación geográfica del Campus Amazcala en el estado de Querétaro,

a) Municipio El Marqués

b) Poblado de Amazcala.



Figura 3.1 Invernadero experimental ubicado en el campus Amazcala.

En la figura 3.1 se muestra el invernadero donde se llevo a cabo el experimento el cual dispone de un área de 108 mts.² teniendo 9mts de frente por 12mts. de largo.

3.4 MODIFICACIÓN DE INSTALACIONES.

Se acondicionaron las instalaciones tomando en cuenta que se utilizaron 8 tratamientos. En la figura 3.2 se muestra la instalación del primer depósito que, abastece, una solución nutritiva (S.N).



Figura 3.2 Primer depósito instalado.



Figura 3.3 Acondicionando instalaciones.



Figura 3.4 Depósitos de riego.



Figura 3.5 Protección solar de depósitos.

Se instaló el sistema de riego para la distribución de los diferentes tratamientos a experimentar como se muestra en la figura 3.4 y 3.5. El sistema de riego consta de ocho depósitos de una capacidad de 1000 litros, ocho bombas las cuales proporcionaron la presión necesaria a lo largo del sistema de riego, una plancha de concreto que funcionara como plataforma para el sistema, una estructura de lámina galvanizada con techo para evitar la degradación de la tubería por el sol y ocho filtros los cuales evitan el paso de impurezas que pudieran taponar los goteros afectando el goteo en alguna planta.



Figura 3.6 Cepa interna



Figura 3.7 Cepa para tubería.



Figura 3.8 Tubería en cepa.



Figura 3.9 Distribución de SN.

Dentro del invernadero también se realizaron diferentes modificaciones para acondicionar el sistema de riego a las necesidades del diseño de experimentos. En la figura 3.6 y 3.7 se muestra la zanja donde se colocó la tubería que distribuirá las diferentes soluciones nutritivas en el invernadero. En la figura 3.8 y 3.9 se muestra la tubería instalada la cual quedó oculta bajo tierra.



Figura 3.10 Distribución de sustrato.



Figura 3.11 Medición de separación

Así mismo se inició la colocación y distribución del sustrato el cual se formó de 7 líneas de 24 bolsas cada una con un espacio de 1.40mts entre línea y línea con la finalidad de permitir el paso de personal para realizar las diferentes actividades que se deben efectuar durante el ciclo de la planta.

3.5 PRODUCCIÓN DE PLÁNTULA.



Figura 3.12 Semillero.



Figura 3.13 Producción de plántula.

En la figura 3.12 se muestra el semillero donde se llevo a cabo la germinación y producción de la plántula de lechuga proceso el cual lleva un ciclo de 12 a 14 días.

En la figura 3.13 se muestra el semillero con diferentes charolas germinadoras, Las charolas que se utilizaron para la producción de plántula de lechuga consta de 200 cavidades las cuales se rellenan de composta insertando una semilla por cada cavidad así tenemos la posibilidad de producir 200 plántulas por charola recordando que para nuestro experimento se utilizaron 168 plántulas donde se evaluó las diferentes soluciones nutritivas. También se observa el sistema de riego el cual es por medio de aspersion a diferencia del nuestro invernadero donde el riego fue por goteo.



Figura 3.14 Plántula.



Figura 3.15 Plántula T.

En la fig. 3.14 se muestra la semilla germinada (plántula) a los seis días desde su siembra la cual se llevo a cabo el 08/12/2009. En la figura 3.15 se puede observar la cantidad de hojas que tiene la plántula en el momento de su transplante el 23/12/2009 a 15 días haber sembrado la semilla obsérvese también la coloración que tiene en algunas de sus hojas.

3.6 SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO.

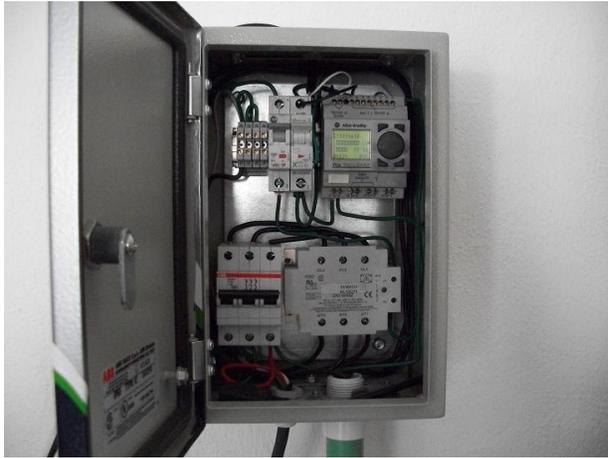


Figura 3.16 Control.

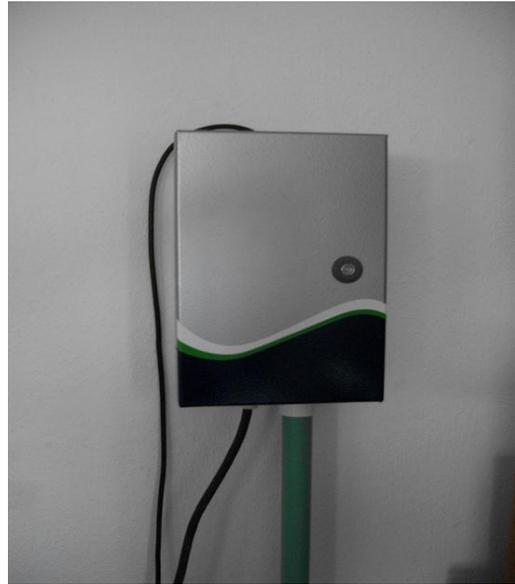


Figura 3.17 Caja de control.

Como parte del sistema de riego se diseño y elaboro el control de riego. En la figura 3.16 y 3.17 se muestra elaborado el sistema de control para el riego, así como los elementos que fueron utilizados. El control el cual se utilizo fue de tipo on-off y para su construcción se uso:

- Un PLC (controlador lógico programable) marca Allen bradlley.

El PLC que se utilizo consta de ocho entradas analógicas de 120 volts cada una y cuatro salidas, cada salida puede conmutar una señal analógica o digital a través de un relevador. Para nuestro sistema sólo se utilizaron 2 entradas analógicas, la entrada I: 1 se utilizo para activar o desactivar el sistema de riego en automático y la entrada I: 2 se utilizo para activar el sistema de riego en forma manual activándose el sistema mientras este activada la señal. En el caso de las salidas solo se utilizo una salida O: 1 para controlar el arranque y paro de las bombas a través del relevador de estado sólido.

- Un relevador de estado sólido.

El relevador de estado sólido tiene la característica de trabajar con grandes intensidades y conmutar altas velocidades con una señal de control de 220 volts sin que se dañe el dispositivo, en nuestro caso la velocidad de conmutación no represento problema alguno pero la intensidad a manejar podría representar un problema si utilizáramos otro tipo de relevador o contactor.

- Un breaker de 30 A y dos de 1 A.

Un breaker de 30 A se utilizó como elemento de seguridad para todo el sistema de control, se utilizó un breaker de 1 A como dispositivo de seguridad para la señal de control y otro de 1 A para proteger el PLC (controlador lógico programable) de variaciones de voltaje.

- Un regulador de 110.volt.

Este se utilizó para atenuar los picos de voltaje ya que la zona de Amazcala es muy inestable en la caída de tensión.

- Una caja de control.

En esta se fijaron todos los elementos de control y a su vez se empotraron en un muro para evitar posibles falsos contactos por movimiento.

3.7 PRODUCCIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS.

Tratamiento.	Nutrientes		
	Nitrógeno	Potasio	Magnesio
1	0	0	0
2	0	0	1
3	0	1	0
4	0	1	1
5	1	0	0
6	1	0	1
7	1	1	0
8	1	1	1

Tabla 3.20 Tabla de tratamientos.

En la tabla 3.20 se muestra todas las combinaciones posibles de sus diferentes niveles (0= bajo y 1=alto) resultando 8 diferentes tratamientos con los que se experimento.

	Nivel codificado alto=1	Nivel codificado bajo=0
Nitrógeno	202 ppm	134 ppm

Tabla 3.21 Nivel codificado de nitrógeno.

En la tabla 3.21 se muestra el nivel codificado y su equivalente en partes por millón.

	Nivel codificado alto=1	Nivel codificado bajo=0
Potasio	325 ppm	218 ppm

Tabla 3.22 Nivel codificado de potasio.

En la tabla 3.22 se muestra el nivel codificado y su equivalente en partes por millón.

	Nivel codificado alto=1	Nivel codificado bajo=0
Magnesio	50 ppm	36 ppm

Tabla 3.23 Nivel codificado de magnesio.

En la tabla 3.23 se muestra el nivel codificado y su equivalente en partes por millón.

Tratamiento # 1.

Acido sulfúrico.	32 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	287 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	369 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.24

Tratamiento # 2.

Acido sulfúrico.	32 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	287 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	517 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.25

Tratamiento # 3.

Acido sulfúrico.	32 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	522 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	369 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.26

Tratamiento # 4.

Acido sulfúrico.	32 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	522 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	517 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.27

Tratamiento # 5

Acido nítrico.	304 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	287 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	517 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.28

Tratamiento # 6.

Acido nítrico.	304 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	287 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	517 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.29

Tratamiento # 7.

Acido nítrico.	304 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	522 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	369 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.30

Tratamiento # 8.

Acido nítrico.	304 ml/m ³
Nitrato de calcio.	820 gr/m ³
Nitrato de potasio.	141 gr/m ³
Sulfato de potasio.	522 gr/m ³
Sulfato de magnesio.	517 gr/m ³
Fosfato monopotásico.	122 gr/m ³
Quelatao de fierro.	8 gr/m ³
Acido bórico.	3 gr/m ³
Quelatao de manganeso.	4 gr/m ³
Quelatao de zinc.	1 gr/m ³
Quelatao de cobre.	1 gr/m ³

Tabla 3.31

De la Tabla 3.24 a la tabla 3.31 se muestra la cantidad usada en gramos de los diferentes fertilizantes usados para general los diferentes niveles de ppm en los diferentes factores (Nitrógeno, Potasio y Magnesio) a estudiar.

3. 6 PRODUCCIÓN DE LECHUGA.



Figura 3.18 En producción.



Figura 3.19 Distribución de SN.

En la figura 3.18 se muestra las 168 plántulas distribuidas en 7 filas, cada fila se compone de 24 plántulas esto nos dará como resultado tres replicas por fila para cada tratamiento tal y como se diseñó el experimento para evaluar el impacto de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y potasio) en el peso de la planta. Una vez transplantada la plántula se comienza a alimentar la planta con los diferentes tratamientos (solución nutriente).

En la figura 3.19 se observa parte del sistema de riego en las 7 filas para la distribución de los 8 tratamientos a lo largo de la fila. Los 8 tratamientos alimentarán de forma aleatoria las 24 plantas que hay por cada fila, cada tratamiento (solución nutritiva) alimenta 3 plantas por fila.

IV.- Análisis.



Figura 4.0 pl1



Figura 4.1 pl2



Figura 4.2 pl3



Figura 4.3 pl4



Figura 4.4 pl5



Figura 4.5 pl6

Las figuras 4.0, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 muestran algunas lechugas que estuvieron bajo diferentes tratamientos. Las fotografías fueron tomadas a la misma altura el 10/02/2010 de algunas plantas después de 45 días, contando a partir del día del transplante (23/12/09), Obsérvese el perímetro de la bolsa como punto de apoyo para notar algunas diferencias a simple vista muy evidentes, como el tamaño de la planta incluso la pigmentación de la misma.

En las figuras 4.0, 4.1, y 4.2 se observa como la biomasa es mayor a las de las figuras 4.3, 4.4 y 4.5, obsérvese la pigmentación de las figuras 4.2 y 4.5 es mucho más alta a las de las otras.

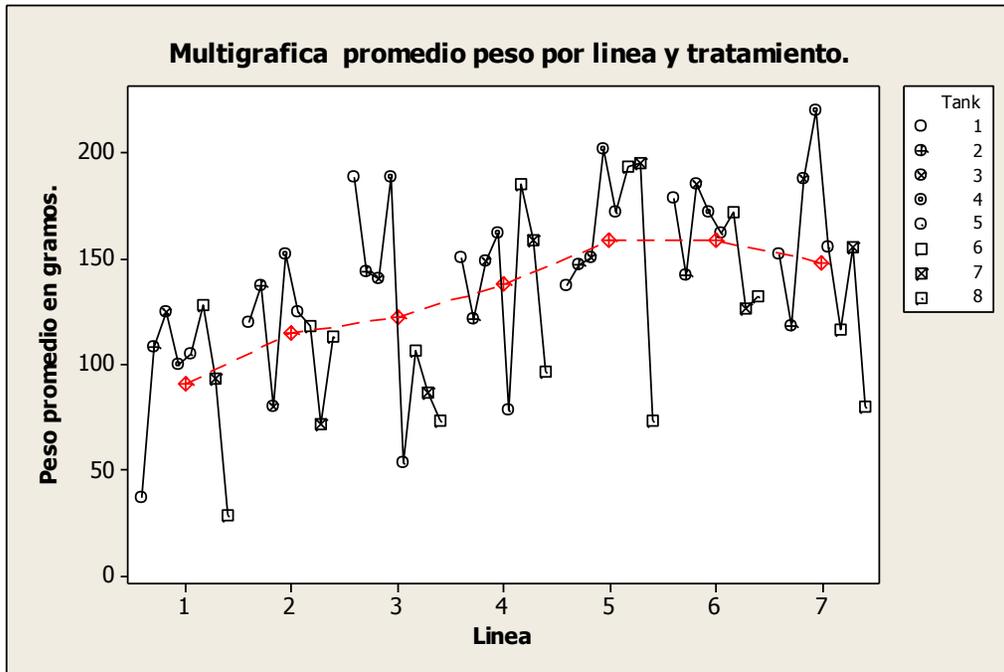


Figura 4.6 Gráfica de peso

En la gráfica 4.6 se muestra un promedio del peso obtenido en la lechuga por línea y un promedio del peso obtenido por cada tratamiento (tank) en las diferentes líneas.

En la gráfica 4.6 se puede observar claramente una tendencia de la línea 1 hacia la línea 6, mostrando los promedios más bajos en la línea 1 que obtuvo un promedio de 90 gramos en contraste a los promedios más altos que fue en las líneas 5 y 6 con un promedio aproximado a 158 gramos existiendo una diferencia de un 70% más respecto a la fila numero 1. Esta tendencia sin lugar a duda es debido al ruido en desarrollo de nuestro experimento y una forma de disminuir la probabilidad de obtener un resultado o una conclusión equivocada fue el diseño aleatorio.

Se tiene un registro con la temperatura más alta en la línea 1 con un rango promedio de (2.5 y 44.9) °C a diferencia de las líneas 5 y 6 donde el rango de temperatura oscila en rangos de (2.6 y 32.5) °C este incremento de temperatura en la línea 1 es debido a que después de las 3pm el sol impacta directamente en dicha línea a través de las ventanas de ventilación.

Con la gráfica 4.6 podríamos empezar aceptar que nuestra hipótesis inicial es correcta y que la solución nutritiva para la lechuga bajo invernadero o incluso de cualquier otra planta se debe elaborar tomando en cuenta las condiciones de clima y necesidades de la planta.

Análisis de fila 1.

Factorial Fit: peso versus Mg, K, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Términos	Efectos	Coef	SE Coef	T	P
Constantes		87.50	4.702	18.61	0.000
Mg	-15.00	-7.50	4.702	-1.60	0.135
K	2.08	1.04	4.702	0.22	0.828
N	-13.75	-6.87	4.702	-1.46	0.167
Mg*K	-78.75	-39.38	4.702	-8.37	0.000
Mg*N	10.42	5.21	4.702	1.11	0.288
K*N	-41.67	-20.83	4.702	-4.43	0.001
Mg*K*N	18.33	9.17	4.702	1.95	0.073

En el análisis de la estimación de efectos de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales, de acuerdo a la prueba "T" se puede rechazar la hipótesis inicial y decir que al menos una de las medias es diferente. La interacción de (magnesio, nitrógeno) y la interacción (Potasio, nitrógeno) son estadísticamente significativas, lo que significa que la relación de estos fertilizantes impactara de forma importante en el peso de la lechuga.

S = 21.1375 PRESS = 14425
R-Sq = 88.18% R-Sq(pred) = 70.65% R-Sq(adj) = 81.82%

En el análisis de R-Sq(adj) tenemos un porcentaje superior al 80% lo que significa que nuestro modelo es estadísticamente predecible.

Análisis de varianza para peso (unidades codificadas)

Source	Gl	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Princi efectos	3	678.9	2210	736.6	1.65	0.227
Interacción doble	3	40959.8	41968	13989.2	31.31	0.000
Interacción triple	1	1698.2	1698	1698.2	3.80	0.073
Residual Error	13	5808.3	5808	446.8		
Error puro	13	5808.3	5808	446.8		
Total	20	49145.2				

Estimación de coeficientes para peso usando datos sin codificar

Term	Coef
Constant	36.6667
Mg	71.6667
K	140.8333
N	35.8333
Mg*K	-194.167
Mg*N	-15.8333
K*N	-120.000
Mg*K*N	73.3333

En el análisis de varianza para peso de acuerdo a la prueba "F" podemos afirmar que estadísticamente en las interacciones dobles una de nuestras betas es diferente de cero. Así mismo se obtienen los coeficientes sin codificar para generar nuestro modelo.

Análisis de Regresión: peso versus Mg, K, N

La ecuación de la regresión es:

$$\text{Peso} = 94.8 - 6.6 \text{ Mg} - 3.9 \text{ K} - 7.8 \text{ N}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF
Constant	94.83	22.86	4.15	0.001	
Mg	-6.55	23.39	-0.28	0.783	1.005
K	-3.89	23.61	-0.16	0.871	1.024
N	-7.77	23.61	-0.33	0.746	1.024

S = 53.3944 R-Sq = 1.4% R-Sq(adj) = 0.0%

PRESS = 74495.9 R-Sq(pred) = 0.00%

Análisis de varianza

Fuente	Gl	SS	MS	F	P
Regresión	3	679	226	0.08	0.970
Error residual	17	48466	2851		
Total	20	49145			

Fuente	Gl	Seq SS
Mg	1	237
K	1	133
N	1	309

En el análisis de la varianza respecto a nuestra ecuación de regresión no tenemos evidencia estadística para afirmar que alguna de nuestras betas es diferente de cero lo que significa que nuestro modelo obtenido no es confiable esto puede ser debido a las diferencias obtenidas en las replicas de los diferentes tratamientos.

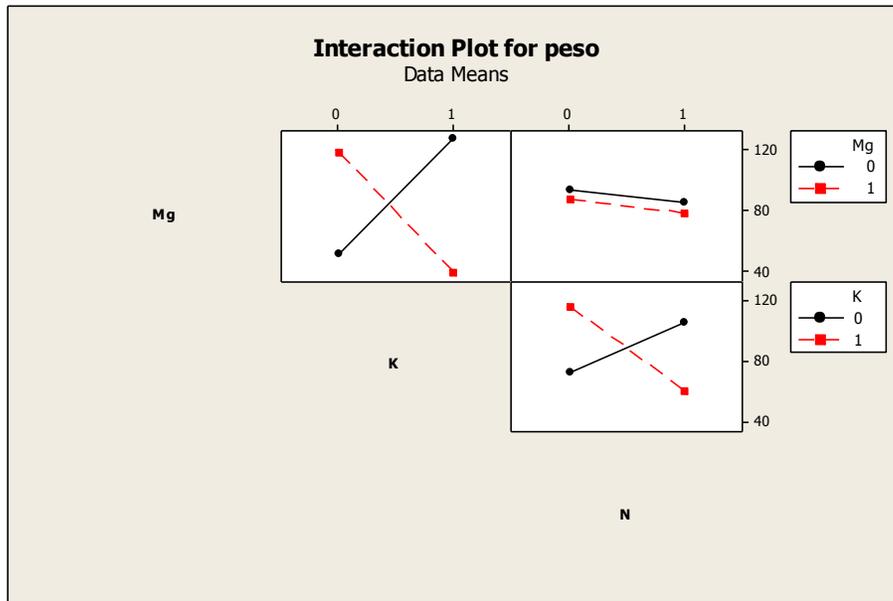


Figura 4.7 Gráfica de interacciones dobles.

En el análisis de la línea #1 se puede afirmar que con un rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (2.5, 44.9) °C la interacción entre magnesio y potasio es estadísticamente significativa y mantener un bajo el nivel de magnesio, un nivel alto el potasio impactara de forma importante en el peso de la lechuga como se muestra en la gráfica 4.7 donde se observa las combinaciones de los nutrientes para obtener el nivel de peso más alto en la lechuga.

Análisis de fila 2.

Factorial Fit: peso versus Mg, k, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Term	Efectos	Coef	SE Coef	T	P
Constant		113.23	9.867	11.48	0.000
Mg	3.13	1.56	9.867	0.16	0.876
k	-18.12	-9.06	9.867	-0.92	0.374
N	-42.71	-21.35	9.867	-2.16	0.048
Mg*k	53.54	26.77	9.867	2.71	0.017
Mg*N	-16.04	-8.02	9.867	-0.81	0.430
k*N	19.38	9.69	9.867	0.98	0.343
Mg*k*N	1.04	0.52	9.867	0.05	0.959

En el análisis de la estimación de efectos de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales, de acuerdo a la prueba "T" se puede rechazar la hipótesis inicial y decir que al menos una de las medias es diferente. La interacción de(magnesio y nitrógeno) y el efecto simple del nitrógeno son estadísticamente significativos, lo que significa que la relación de estos fertilizantes impactara de forma importante en el peso de la lechuga.

S = 45.5750 PRESS = 68425
R-Sq = 48.74% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 23.11%

En el análisis de R-Sq(adj) tenemos un porcentaje inferior al 80% lo que significa que nuestro modelo es estadísticamente no predecible.

Análisis de varianza para peso (unidades codificadas)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efecto principal	3	10010.2	11814.6	3938.19	1.90	0.177
Interacción doble	3	17632.1	17635.0	5878.32	2.83	0.077
Interacción triple	1	5.8	5.8	5.79	0.00	0.959
Error residual	14	29079.2	29079.2	2077.08		
Error puro	14	29079.2	29079.2	2077.08		
Total	21	56727.3				

Estimación de coeficientes para peso usando datos sin codificar

Term	Coef
Constant	170.000
Mg	-33.3333
k	-90.0000
N	-45.0000
Mg*k	105.000
Mg*N	-34.1667
k*N	36.6667
Mg*k*N	4.1667

Análisis de Regresión: peso versus Mg, k, N

La ecuación de la regresión es:

$$\text{Peso} = 117 + 30.8 \text{ Mg} - 20.8 \text{ k} - 15.0 \text{ N}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	117.08	24.46	4.79	0.000
Mg	30.83	24.46	1.26	0.222
k	-20.83	24.46	-0.85	0.404
N	-15.00	24.46	-0.61	0.547

S = 59.9114 R-Sq = 11.9% R-Sq(adj) = 0.0%

Análisis de varianza.

Fuente	Gl	SS	MS	F	P
Regresión	3	9658	3219	0.90	0.460
Error residual	20	71787	3589		
Total	23	81446			

Fuente	Gl	Seq SS
Mg	1	5704
k	1	2604
N	1	1350

En el análisis de la varianza respecto a nuestra ecuación de regresión no tenemos evidencia estadística para afirmar que alguna de nuestras betas es diferente de cero lo que significa que nuestro modelo obtenido no es confiable esto puede ser debido a las diferencias obtenidas en las replicas de los diferentes tratamientos.

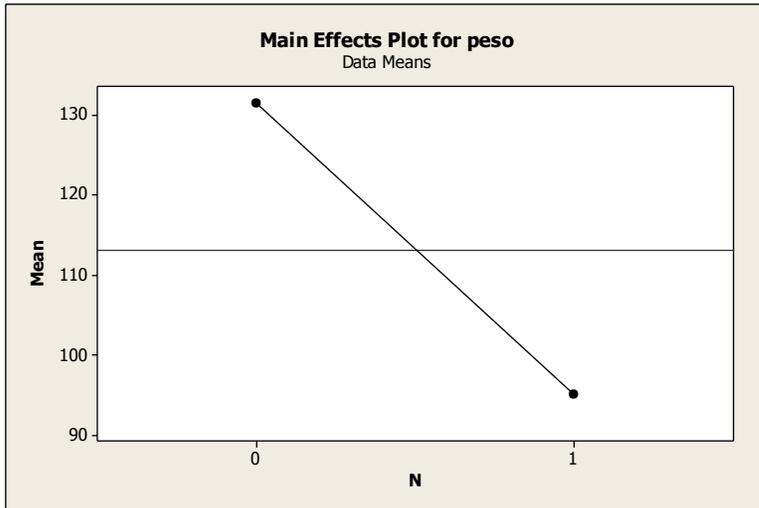


Figura 4.8 Efecto del nitrógeno.

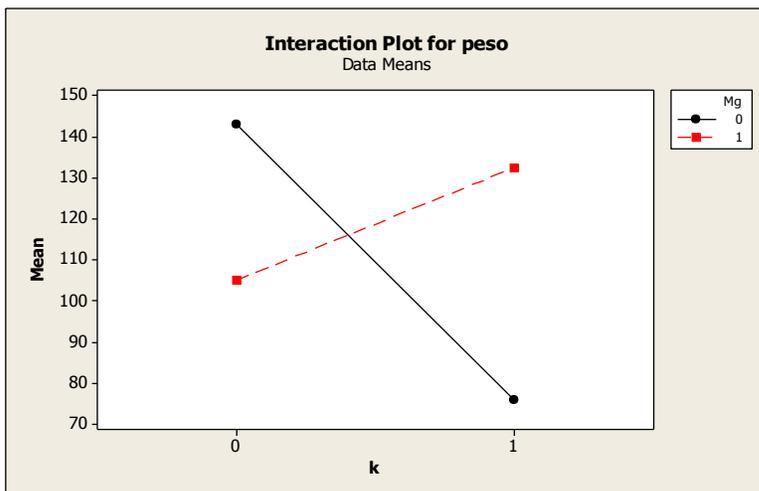


Figura 4.9 Interacción del potasio y magnesio.

En el análisis de la línea 2 con rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (2.7, 39.7) °C se encuentra estadísticamente significativo un nivel bajo de nitrógeno como se muestra en el grafico (4.8) así mismo la interacción doble de magnesio con el potasio se encuentra estadísticamente significativa y en el grafico (4.9) se observa donde se encuentra los mejores niveles de peso, un nivel bajo de potasio y un nivel bajo de magnesio. En las gráficas (4.8 y 4.9) se puede observar en que niveles de nutrientes se obtiene mayor peso.

Análisis de fila 3.

Factorial Fit: Peso versus Mg, K, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Term	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constant		118.96	6.474	18.38	0.000
Mg	3.75	1.88	6.474	0.29	0.776
K	6.25	3.12	6.474	0.48	0.636
N	-77.92	-38.96	6.474	-6.02	0.000
Mg*K	13.75	6.87	6.474	1.06	0.305
Mg*N	16.25	8.13	6.474	1.26	0.229
K*N	-6.25	-3.13	6.474	-0.48	0.636
Mg*K*N	-47.08	-23.54	6.474	-3.64	0.002

En el análisis de la estimación de efectos de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales, de acuerdo a la prueba "T" se puede rechazar la hipótesis inicial y decir que al menos una de las medias es diferente. La interacción triple (magnesio, nitrógeno y potasio) y el factor simple del nitrógeno son estadísticamente significativos, lo que significa que la relación de estos fertilizantes impactara de forma importante en el peso de la lechuga. Cabe mencionar que por el principio de jerarquía se ignora el efecto simple y se trabaja con la triple interacción.

S = 30.7679 PRESS = 32037.5
R-Sq = 78.86% R-Sq(pred) = 52.31% R-Sq(adj) = 69.00%

Análisis de varianza para peso (unidades codificadas)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efectos principales	3	38812	34949	11649.6	12.31	0.000
Interacción doble	3	1652	2538	846.1	0.89	0.467
Interacción triple	1	12519	12519	12518.6	13.22	0.002
Error residual	15	14200	14200	946.7		
Error puro	15	14200	14200	946.7		
Total	22	67183				

Estimación de coeficientes para peso usando datos sin codificar

Term	Coef
Constant	188.333
Mg	-73.3333
K	-48.3333
N	-135.000
Mg*K	121.667
Mg*N	126.667
K*N	81.6667
Mg*K*N	-188.333

Análisis de regresión: Peso versus Mg, K, N

La ecuación de regresión es:

$$\text{Peso} = 157 + 7.9 \text{ Mg} + 2.1 \text{ K} - 82.1 \text{ N}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	157.08	16.17	9.72	0.000
Mg	7.92	16.17	0.49	0.630
K	2.08	16.17	0.13	0.899
N	-82.08	16.17	-5.08	0.000

S = 38.6420 R-Sq = 57.8% R-Sq(adj) = 51.1%

Análisis de varianza

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	3	38812	12937	8.66	0.001
Error residual	19	28371	1493		
Total	22	67183			

Fuente	DF	Seq SS
Mg	1	105
K	1	206
N	1	38501

En el análisis de la varianza respecto a nuestra ecuación de regresión tenemos evidencia estadística para afirmar que alguna de nuestras betas es diferente de cero lo que significa que nuestro modelo obtenido es confiable.

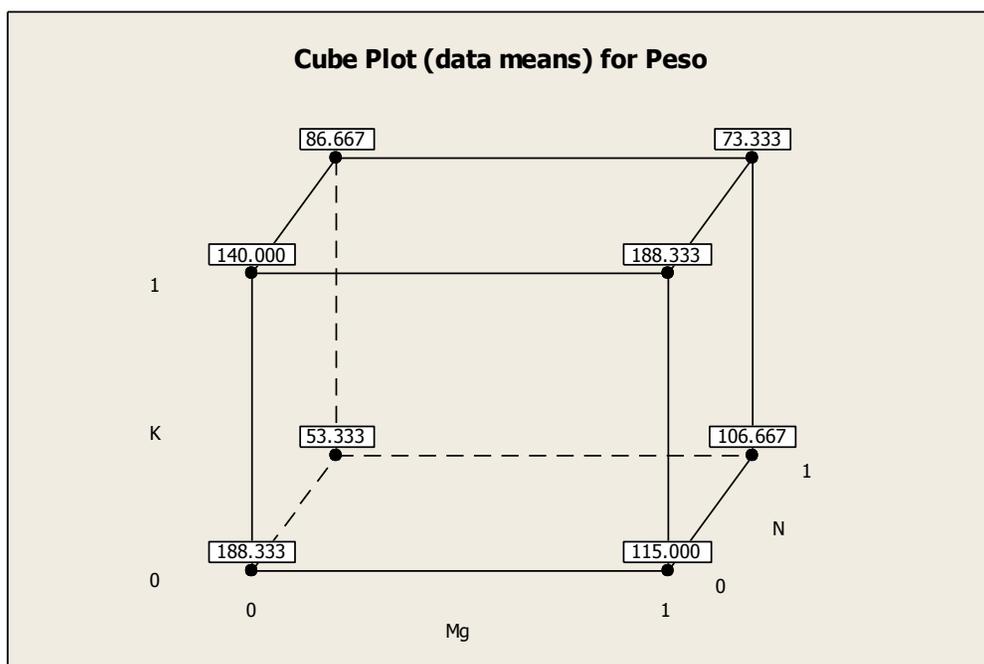


Figura 4.10 Cubo de interacción L3.

En el análisis de la línea 3 con rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (2.6, 35.2) °C se encuentra estadísticamente significativo la interacción de los tres nutrientes obteniendo los más altos niveles de peso en la lechuga en los tres niveles bajos de los nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) como se muestra en el grafico (4.10). Además a diferencia de las otras líneas el modelo obtenido se encuentra estadísticamente significativo, como se puede observar en la gráfica mostrada.

Análisis de fila 4.

Factorial Fit: peso versus Mg, K, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Term	Efectos	Coef	SE Coef	T	P
Constant		143.02	9.074	15.76	0.000
Mg	-3.54	-1.77	9.074	-0.20	0.848
K	18.54	9.27	9.074	1.02	0.323
N	-4.79	-2.40	9.074	-0.26	0.795
Mg*K	-42.71	-21.35	9.074	-2.35	0.033
Mg*N	3.96	1.98	9.074	0.22	0.830
K*N	-0.62	-0.31	9.074	-0.03	0.973
Mg*K*N	-63.54	-31.77	9.074	-3.50	0.003

En el análisis de la estimación de efectos de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales, de acuerdo a la prueba "T" se puede rechazar la hipótesis inicial y decir que al menos una de las medias es diferente. La interacción triple de (magnesio, nitrógeno y potasio) y la interacción doble de (magnesio y potasio) son estadísticamente significativos, lo que significa que la relación de estos fertilizantes impactara de forma importante en el peso de la lechuga. Cabe mencionar que por el principio de jerarquía se ignora las interacciones dobles y se trabaja con la triple interacción.

S = 43.1245 PRESS = 64537.5
R-Sq = 54.82% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 33.74%

Análisis de varianza para peso (unidades codificadas)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efectos principales	3	1685.0	2181.4	727.1	0.39	0.761
Interacción doble	3	9364.5	10581.4	3527.1	1.90	0.174
Interacción triple	1	22800.2	22800.2	22800.2	12.26	0.003
Error residual	15	27895.8	27895.8	1859.7		
Error puro	15	27895.8	27895.8	1859.7		
Total	22	61745.7				

Estimación de coeficientes para peso usando datos sin codificar

Term	Coef
Constant	150.000
Mg	-28.3333
K	-1.6667
N	-71.6667
Mg*K	41.6667
Mg*N	135.000
K*N	125.833
Mg*K*N	-254.167

Análisis de Regresión: peso versus Mg, K, N

La ecuación de la regresión es:

$$\text{Peso} = 138 + 1.5 \text{ Mg} + 13.5 \text{ K} - 9.9 \text{ N}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	137.92	22.95	6.01	0.000
Mg	1.54	23.52	0.07	0.948
K	13.46	23.52	0.57	0.574
N	-9.88	23.52	-0.42	0.679

S = 56.2235 R-Sq = 2.7% R-Sq(adj) = 0.0%

Análisis de varianza

Fuente	Gl	SS	MS	F	P
Regresión	3	1685	562	0.18	0.910
Error residual	19	60061	3161		
Total	22	61746			

Fuente	Gl	Seq SS
Mg	1	17
K	1	1111
N	1	557

En el análisis de la varianza respecto a nuestra ecuación de regresión no tenemos evidencia estadística suficiente para afirmar que alguna de nuestras betas es diferente de cero lo que significa que nuestro modelo obtenido no es confiable.

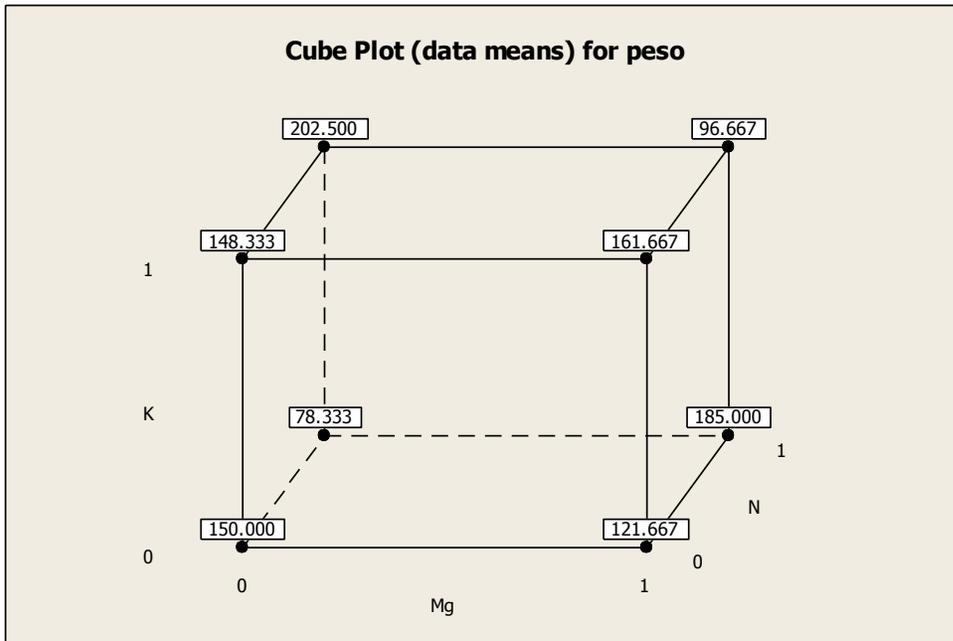


Figura 4.11 Cubo de interacción L3

En el análisis de la línea #4 con rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (2.9, 30.9) °C en la estimación del efecto de los nutrientes sobre el peso se encuentra estadísticamente significativo la interacción triple de los nutrientes (Mg, N, y P) y la interacción doble de los nutrientes (N, K), obteniendo los mejores niveles de peso para la lechuga en el nivel alto de nitrógeno y potasio en combinación con un nivel bajo de magnesio como se muestra en la gráfica (4.11).

Análisis de fila 5.

Factorial Fit: Peso versus Mg, K, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Term	Efectos	Coef	SE Coef	T	P
Constant		171.88	9.619	17.87	0.000
Mg	-15.42	-7.71	9.619	-0.80	0.436
K	-1.25	-0.63	9.619	-0.06	0.949
N	26.25	13.13	9.619	1.36	0.194
Mg*K	-52.08	-26.04	9.619	-2.71	0.017
Mg*N	-46.25	-23.12	9.619	-2.40	0.031
K*N	-35.42	-17.71	9.619	-1.84	0.087
Mg*K*N	-72.92	-36.46	9.619	-3.79	0.002

En el análisis de la estimación de efectos de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales, de acuerdo a la prueba "T" se puede rechazar la hipótesis inicial y decir que al menos una de las medias es diferente. La interacción triple de (magnesio, nitrógeno y potasio), la interacción doble de (magnesio y potasio) y la interacción doble de (magnesio y nitrógeno) son estadísticamente significativas, lo que significa que la relación de estos fertilizantes impactara de forma importante en el peso de la lechuga. Cabe mencionar que por el principio de jerarquía se ignora las interacciones dobles y se trabaja con la triple interacción.

S = 44.4276 PRESS = 66812.5
R-Sq = 68.93% R-Sq(pred) = 24.89% R-Sq(adj) = 53.40%

Análisis de varianza para peso (unidades codificadas)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efectos principales	3	2225	4990	1663	0.84	0.493
Interacción doble	3	30736	34758	11586	5.87	0.008
Interacción triple	1	28356	28356	28356	14.37	0.002
Error residual	14	27633	27633	1974		
Error puro	14	27633	27633	1974		
Total	21	88950				

Estimación de coeficientes para peso usando datos sin codificar

Term	Coef
Constant	136.667
Mg	10.0000
K	13.3333
N	35.0000
Mg*K	41.6667
Mg*N	53.3333
K*N	75.0000
Mg*K*N	-291.667

Análisis de regresión: Peso versus Mg, K, N

La ecuación de regresión es:

$$\text{Peso} = 167 - 14.3 \text{ Mg} - 2.3 \text{ K} + 13.7 \text{ N}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	167.08	28.34	5.90	0.000
Mg	-14.33	29.72	-0.48	0.635
K	-2.33	29.72	-0.08	0.938
N	13.75	29.72	0.46	0.649

S = 69.4124 R-Sq = 2.5% R-Sq(adj) = 0.0%

Análisis de Varianza

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	3	2225	742	0.15	0.926
Error residual	18	86725	4818		
Total	21	88950			

Fuente	DF	Seq SS
Mg	1	1164
K	1	30
N	1	1031

En el análisis de la varianza respecto a nuestra ecuación de regresión no tenemos evidencia estadística suficiente para afirmar que alguna de nuestras betas es diferente de cero lo que significa que nuestro modelo obtenido no es confiable.

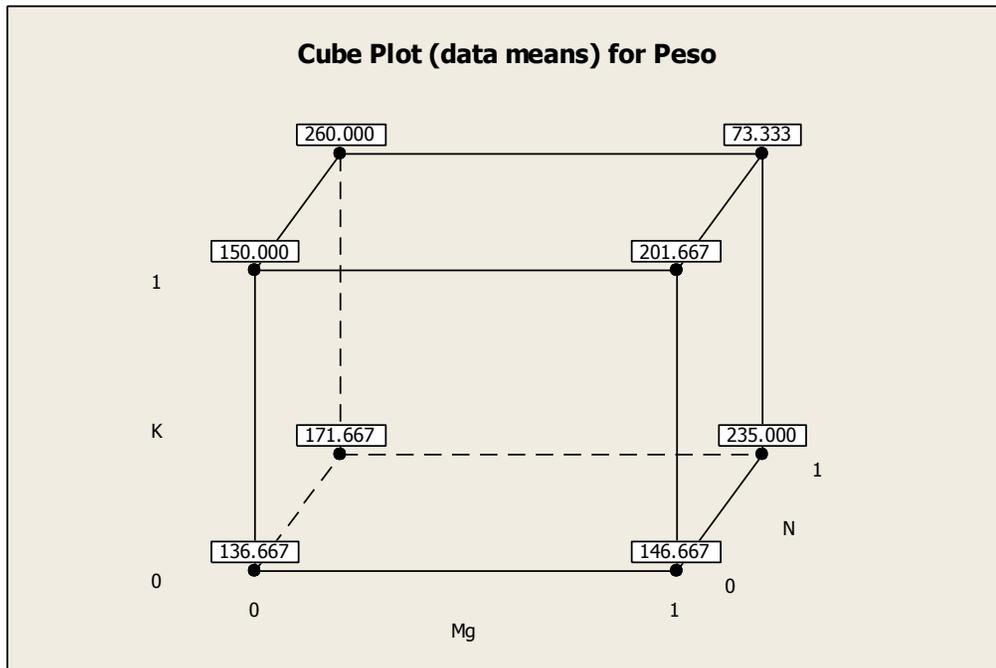


Figura 4.12 Cubo de interacción L5

En el análisis de la línea #5 con rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (2.6, 30.5) °C en la estimación del efecto de los nutrientes sobre el peso de la lechuga se encuentra estadísticamente significativo la interacción triple de los nutrientes(Mg, N, y P) obteniendo los mejores niveles de peso para la lechuga en el nivel alto de nitrógeno, un nivel alto de potasio en combinación con un nivel bajo de magnesio como se muestra en la gráfica (4.12).

Análisis de fila 6.

Factorial Fit: peso versus Mg, K, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		158.33	14.70	10.77	0.000
Mg	-9.17	-4.58	14.70	-0.31	0.759
K	-10.00	-5.00	14.70	-0.34	0.738
N	-21.67	-10.83	14.70	-0.74	0.472
Mg*K	4.17	2.08	14.70	0.14	0.889
Mg*N	15.83	7.92	14.70	0.54	0.598
K*N	-28.33	-14.17	14.70	-0.96	0.350
Mg*K*N	-7.50	-3.75	14.70	-0.26	0.802

En el análisis de la estimación del efecto de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales de acuerdo a la prueba "T" no se puede rechazar la hipótesis inicial y aceptamos que todas las medias son iguales, lo que significa que la relación de estos fertilizantes no impactara de forma importante en el nivel de peso de la lechuga.

Como no se encontró significancia en el subministro de los diferentes niveles de nutrientes ya no se utilizó otras herramientas estadísticas. Sólo se hace notar que en el análisis, la interacción doble del (Potasio y Nitrógeno) fue la que tuvo mayor éxito en la prueba "T".

En el análisis de la línea #6 con rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (2.1, 32.3) °C en la estimación del efecto de los nutrientes sobre el peso de la lechuga no se encontró evidencia estadísticamente significativa para suponer diferencia alguna por parte de los diferentes fertilizantes que se estudiaron.

Análisis de fila 7.

Factorial Fit: peso versus Mg, K, N

Estimación de efectos y coeficientes para peso (unidades codificadas)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		148.00	12.48	11.86	0.000
Mg	-28.50	-14.25	12.48	-1.14	0.270
K	25.17	12.58	12.48	1.01	0.328
N	-42.67	-21.33	12.48	-1.71	0.107
Mg*K	7.33	3.67	12.48	0.29	0.773
Mg*N	-28.17	-14.08	12.48	-1.13	0.276
K*N	-43.50	-21.75	12.48	-1.74	0.100
Mg*K*N	-25.67	-12.83	12.48	-1.03	0.319

En el análisis de la estimación del efecto de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales de acuerdo a la prueba "T" no se puede rechazar la hipótesis inicial y aceptamos que todas las medias son iguales, lo que significa que la relación de estos fertilizantes no impactara de forma importante en el nivel de peso de la lechuga.

Como no se encontró significancia en el subministro de los diferentes niveles de nutrientes ya no se utilizo otras herramientas estadísticas. Sólo se hace notar que en el análisis, la interacción doble del (Potasio y Nitrógeno) fue la que tuvo mayor éxito en la prueba "T".

En el análisis de la línea #7 con rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de la lechuga de (1.2, 27.9) °C en la estimación del efecto de los nutrientes sobre el peso de la lechuga no se encontró evidencia estadísticamente significativa para suponer diferencia alguna por parte de los diferentes fertilizantes que se estudiaron.

Análisis general.

Factorial Fit: Peso versus Mg, K, N

Estimación de coeficientes y efectos.

Terminos	Efect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		197.29	7.224	27.31	0.000
Mg	-1.25	-0.63	7.224	-0.09	0.932
K	-58.75	29.37	7.224	-4.07	0.001
N	28.75	14.37	7.224	1.99	0.065
Mg*K	-6.25	-3.13	7.224	-0.43	0.671
Mg*N	-67.08	-33.54	7.224	-4.64	0.000
K*N	-17.92	-8.96	7.224	-1.24	0.234
Mg*K*N	-75.42	-37.71	7.224	-5.22	0.000

En el análisis de la estimación de efectos de los diferentes nutrientes (Nitrógeno, Magnesio y Potasio) y teniendo como hipótesis inicial que las medias son iguales, de acuerdo a la prueba "T" se puede rechazar la hipótesis inicial y decir que al menos una de las medias es diferente. La interacción triple de (magnesio, nitrógeno y potasio), y la interacción doble de (magnesio y nitrógeno) son estadísticamente significativas, lo que significa que la relación de estos fertilizantes impactara de forma importante en el peso de la lechuga. Cabe mencionar que por el principio de jerarquía se ignora la interacción doble y se trabaja con la triple interacción.

S = 34.3350 PRESS = 40575
R-Sq = 81.53% R-Sq(pred) = 57.62% R-Sq(adj) = 72.91%

Análisis de varianza para Peso (unidades codificada)

Fuente	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Efectos principales	3	18960	23329	7776	6.60	0.005
Interacción doble	3	26968	28580	9527	8.08	0.002
Interacción triple	1	32119	32119	32119	27.24	0.000
Error residual	15	17683	17683	1179		
Error puro	15	17683	17683	1179		
Total	22	95730				

Análisis de la regresión para peso & Mg, K, N

La ecuación de regresión es

$$\text{Peso} = 218 - 18.2 \text{ Mg} + 6.3 \text{ K} + 36.3 \text{ N}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	217.61	23.95	9.09	0.000
Mg	-18.18	24.41	-0.74	0.466
K	6.30	24.63	-2.69	0.015
N	36.30	24.63	1.47	0.158

Análisis de varianza

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Regresión	3	30353	10118	3.09	0.053
Error residual	18	58974	3276		
Total	21	89327			

En el análisis de la varianza respecto a nuestra ecuación de regresión se obtuvo evidencia estadística suficiente para afirmar que alguna de nuestras betas es diferente de cero lo que significa que nuestro modelo obtenido es confiable.

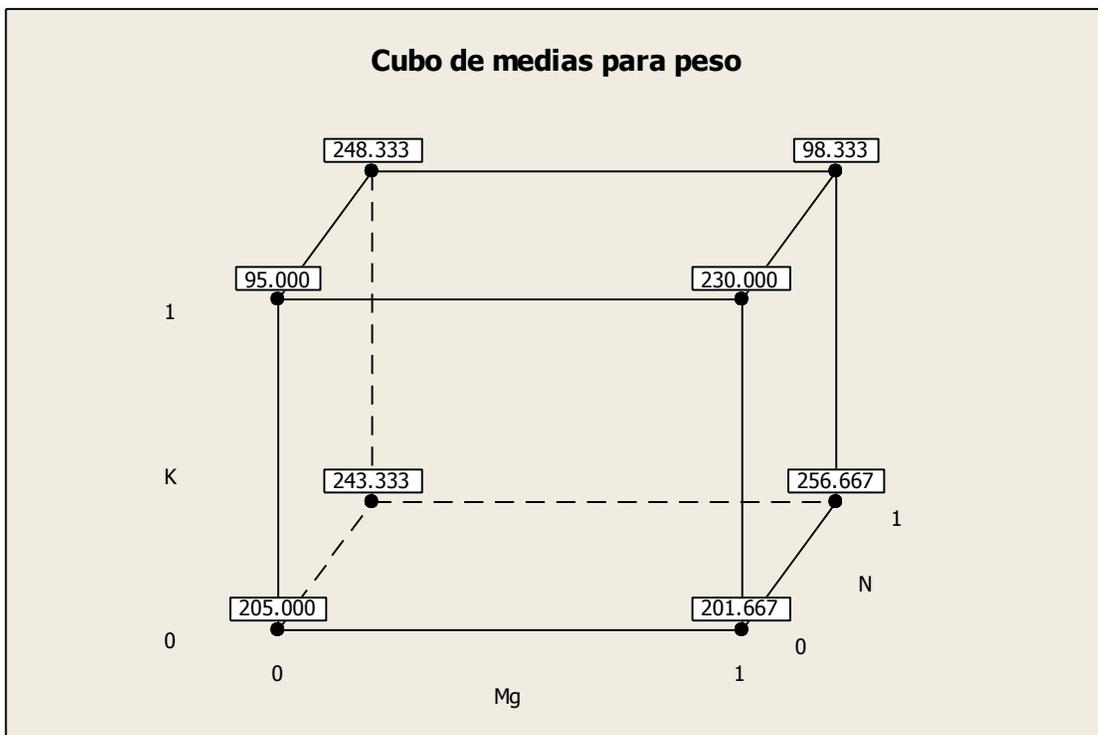


Figura 4.13 Cubo de interacción completo.

En el gráfico 4.13 se muestra la dos posibles combinaciones para obtener los niveles de peso más altos, esto sirvió como base para nuestro siguiente experimento en la búsqueda de optimizar la solución nutriente para la lechuga bajo invernadero.

Con base en los resultados obtenido en el análisis del primer experimento, se realizo otro experimento buscando optimizar la solución nutritive para la lechuga bajo invernadero. Se partió del nivel alto de nitrógeno, el nivel bajo de magnesio y nivel alto de potasio.

El nivel de potasio sólo se conservo en un nivel alto y no se busco incrementar su nivel a diferencia del nitrógeno que se incremento su nivel y del magnesio que se decremento su nivel.

Se tomaron acciones para homogeneizar en lo posible la temperatura en el invernadero y así disminuir su afectación en los niveles del peso de la lechuga.



Figura 4.14 Invernadero con modificación.

En la figura 4.14 se muestra la acción tomada en el invernadero para homogeneizar y atenuar los efectos de la temperatura en los niveles de peso de la lechuga, ya que se demostró en el primer experimento que con los altos niveles de temperatura (45°C) se tuvo un impacto negativo en la lechuga. Este sombreado logro disminuir la temperatura máxima promedio en 10°C en las líneas afectadas por la radiación solar después de la 1pm.



Figura 4.15 Termómetro



Figura 4.16 Sensor de almacenamiento

En la figura 4.15 y 4.16 se muestran los aparatos usados para monitorear la temperatura en 5 diferentes puntos del invernadero.

- **Cálculo de las deltas para los nuevos tratamientos**

$$\text{Peso} = 218 - 18.2 \text{ Mg} + 6.3 \text{ K} + 36.3 \text{ N}$$

$$\Delta_{0N} = \underline{\underline{5 \text{ ppm}}}$$

$$\Delta_{xN} = (2 * \Delta_0) / (N_{SN} - N_{iN}) = (2 * 5) / (202 - 134) = 10 / 68 = \mathbf{6.8}$$

$$\Delta_{xMg} = (\Delta_{xN} * \beta_{Mg}) / (\beta_N) = (0.68 * -18.2) / (36.3) = 12.54 / 36.3 = \mathbf{- 0.34}$$

$$\Delta_{0Mg} = ((\Delta_{xMg}) * (N_{SMg} - N_{iMg})) / 2 = (-0.34) * (50 - 36) = (-0.34 / 14) / 2 = \underline{\underline{- 2.38 \text{ ppm}}}$$

N_s = Nivel superior del fertilizante
 N_i = Nivel inferior del fertilizante
 β_{Mg} = Beta del Magnesio
 β_N = Beta del Nitrógeno

Δ_{0N} = Incremento de ppm en el Nitrógeno.
 Δ_{0Mg} = Incremento de ppm en el Magnesio.

Cantidad de fertilizantes en PPM.

Nitrógeno	Potasio	Magnesio
207 ppm	320 ppm	33.6 ppm
212 ppm	320 ppm	31.24 ppm
217 ppm	320 ppm	28.86 ppm
222 ppm	320 ppm	26.48 ppm
227 ppm	320 ppm	24.10 ppm
232 ppm	320 ppm	21.72 ppm
237 ppm	320 ppm	19.34 ppm
242 ppm	320 ppm	16.96 ppm

Tabla 4.0

En la tabla 4.0 se muestra los nuevos tratamientos calculados con las deltas obtenidas se puede observar como el nivel de ppm en el nitrógeno aumenta en 5ppm y el decremento del nivel de magnesio en -2.38 ppm.

Una vez obtenidos los nuevos niveles de estudio, se realizó el mismo procedimiento de producción de lechuga bajo invernadero; germinado de semilla, transplante de plántula el cual se llevo a cabo el 27/02/2010, tratamiento de fitozanación y la cosecha de la lechuga realizada el 09/04/2010 realizado en el primer experimento.



Figura 4.18 Segundo ciclo de producción.

En la figura 4.18 se muestra una fotografía tomada el 20/03/2010 a 20 días del transplante.



Figura 4.19 Producción final SC.



Figura 4.20 Producción final SC.

En la figura 4.19 y 4.20 se muestran dos fotografías tomadas el 09/04/2010, obsérvese el alto nivel vegetativo en todas las líneas de producción.



Figura 4.21 Báscula



Figura 4.22 Mediciones.

En la figura 4.21 se muestra la bascula utilizada con un rango de (0 a 1)Kg con escalas de .1 gramo, 1 gramo, 10 gramos y 100 gramos. En la figura 4.22 se muestra pesando una de las lechugas.



Figura 4.23 vegetación



Figura 4.24 Diámetro vegetativo

En la figura 4.23 y 4.24 se observa una medición del diámetro vegetativo que en promedio se obtuvo niveles de 40 cm.

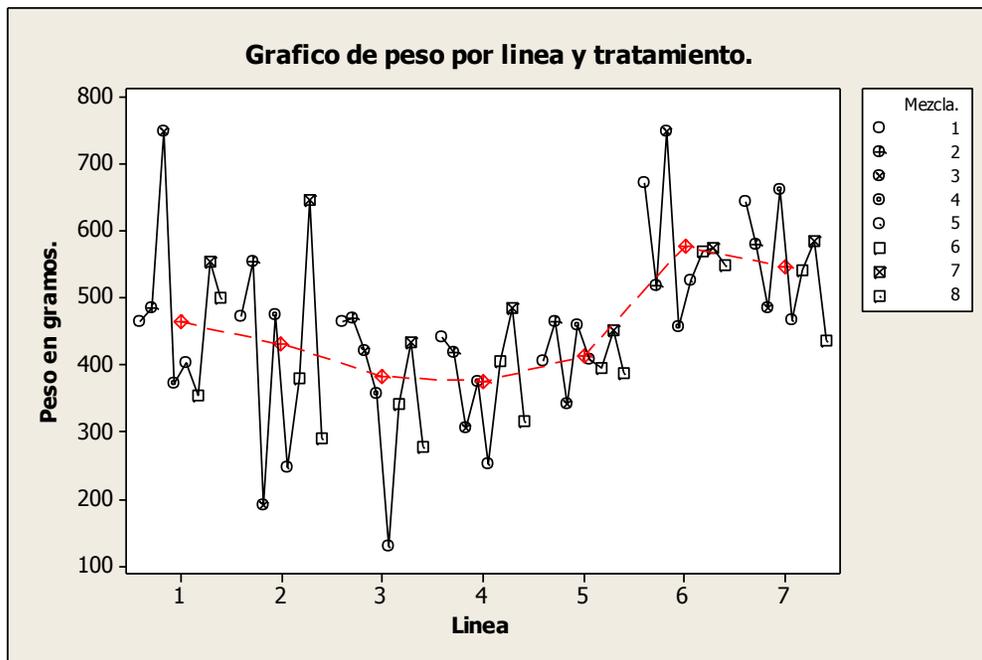


Figura 4.25 Gráfica de peso

En la figura 4.25 se muestra un gráfico de los resultados obtenidos se puede observar que ya no existe la tendencia mostrada en el primer experimento. También se observa los rendimientos obtenidos, el menor rendimiento se obtuvo en la línea #4 con un promedio de 380 gramos y el máximo rendimiento se obtuvo en la línea #6 con un promedio de 578 gramos.

En el primer experimento el promedio de la producción fue de 134.899 gramos y mientras que el promedio de la producción del segundo experimento fue de 455.7 gramos logrando incrementar la productividad en 337%.

V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La aplicación e interpretación de una metodología de mejora continua a través del uso de herramientas estadísticas (Diseño de experimentos) con la finalidad de incrementar la productividad en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero, demostró ser de gran utilidad como herramienta de mejora continua, ya que los resultados obtenidos superaron las expectativas al incrementar la productividad aproximadamente en un 150% dentro de un invernadero con un área de 108 m² ubicado en Amazcala. Con esto podríamos suponer que dicha herramienta no es sólo útil en la industria automotriz, aeronáutica, química o en la industria de acero sino también en la agropecuaria y puede ser usada como una metodología de mejora continua para incrementar la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero.

De igual forma aún existe la posibilidad de incrementar la productividad de la producción de lechuga bajo invernadero, en el proyecto que se llevó a cabo, sólo se analizaron tres fertilizantes los cuales son considerados, los que generan el mayor costo de la solución nutritiva para la lechuga bajo invernadero. Esto también fue debido a ciertas limitaciones de infraestructura, en un futuro se puede llevar a cabo un diseño fraccionado y evaluar el resto de los nutrientes. Existen otros factores que no se tomaron en cuenta como la frecuencia del riego, duración de riego o los diferentes tipos de goteros y sin lugar a duda se puede evaluar la temperatura a pesar de no tener un sistema de enfriamiento o un control de temperatura en este tipo de invernaderos por los costos que representaría pero se podría usar una malla sombra para cubrir todo el invernadero disminuyendo la temperatura máxima promedio en 6°C aproximadamente o más, de esta forma podríamos analizar y evaluar el efecto de la temperatura en un sentido más específico. Estos factores también pueden y deben ser evaluados.

En caso de llevar a cabo un experimento dentro de un invernadero se recomienda evaluar el invernadero antes de realizar el experimento para localizar o encontrar diferentes factores de ruido que puedan alterar el resultado del experimento o las mediciones, por ejemplo; La temperatura, la presión en el sistema de riego, el funcionamiento apropiado de los diferentes goteros, el funcionamiento del control de arranque y paro del sistema de riego, la cantidad y recipiente del sustrato, termómetros etc. La variación de cualquiera de estos factores puede conducir a conclusiones equivocadas. Una forma de evaluar el invernadero podría ser poniendo en operación el invernadero durante al menos cinco días sin transplantar

y medir diferentes factores como; la temperatura en diferentes puntos buscando que las mediciones sean aproximadamente homogéneas en caso de existir una diferencia de más de 8°C se debe buscar la causa y tomar acciones para minimizar el efecto. Al mismo tiempo se puede verificar la operación de los diferentes goteros evaluando la humedad en el sustrato, también se puede verificar el control del sistema de riego que esté trabajando en forma y tiempo los diferentes elementos que lo componen; Plc, relevador de estado sólido, conexiones, etc.

Así mismo se confirma la hipótesis inicial y se afirma que se puede incrementar la productividad en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero, utilizando o aplicando herramientas estadísticas como “Diseño de experimentos” el cual fue aplicado para incrementar la productividad de forma rápida y practica elaborando una solución nutritiva óptima. El ignorar la utilidad de esta metodología provocara un desperdicio de los diferentes fertilizantes incrementando los costos de producción, además se verá afectado el rendimiento de la producción de la hortaliza por la falta de una óptima solución o erróneas condiciones de operación.

Durante el análisis se encontró que el nivel de ppm del Potasio con respecto al nivel de ppm del Magnesio debe ser mayor en una proporción de diez veces a uno como mínima diferencia y el nivel de ppm del magnesio se recomienda que no sea mayor de 20 ppm. Esto es debido a que, el nivel de ppm en el magnesio superior a 20 ppm analizado en diferentes rangos de temperatura afecta y disminuyen el rendimiento en la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero.

Se obtuvo un modelo lineal a partir del primer experimento que genera una aproximación del comportamiento de la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero, este modelo está sujeto a un rango de temperatura promedio durante los 45 días del ciclo de producción de la lechuga a partir de su transplante de 2°C como temperatura mínima y 35°C como máxima temperatura. En caso de no cumplir con el rango promedio de temperatura, el modelo presentado no será confiable ya que cuando la producción de hortaliza se somete a temperaturas superiores a los 40°C la respuesta de la lechuga es casi nula a los diferentes nutrientes y en el caso del Magnesio dependiendo de los ppm utilizados puede ser aún más perjudicial.

$$\text{Peso} = 218 - 18.2 \text{ Mg} + 6.3 \text{ K} + 36.3 \text{ N} \quad (5.0)$$

En el modelo lineal obtenido (5.0) se muestra claramente que el peso de la lechuga se incrementara con unidades de Potasio y Nitrógeno pero también se observa que las unidades en el magnesio mermaran el peso de la lechuga. Como segunda observación se puede ver que las unidades de Nitrógeno tienen un mayor potencial de incrementar el peso de la lechuga que el del Potasio. Aclarando que el modelo describe de forma breve el comportamiento de la producción de lechuga, es un modelo representativo.

Por último los niveles óptimos recomendados para la producción de lechuga hidropónica bajo invernadero en la zona de Amazcala con una temperatura promedio durante el ciclo de lechuga de 2°C como mínimo y 35°C como máximo el nivel de Nitrógeno recomendable es de 207 ppm, el nivel de Potasio recomendable es de 320 ppm y el nivel de Magnesio recomendable es de 20ppm con estos niveles de nutrientes y con los rangos de temperaturas se lograra obtener niveles superiores en promedio a los 400 gramos. Esta misma formulación de igual forma nos puede servir para acortar el ciclo de producción de la lechuga hidropónica bajo invernadero ya que durante el último experimento se observo que entre los 25 y 30 días de la producción la lechuga ya había alcanzado niveles de más de 180 gramos aproximadamente peso superior al del mercado, con esto se disminuirá el tiempo ciclo de la producción de la hortaliza en un 25% aproximadamente.

BIBLIOGRAFÍA.

- Alan D., 1999, *The Oxford Companion to Food*, Oxford University Press.
- Aguilera, J.M. y Kosikowski, 1976 , F., Sorben Extruded Product: A response Análisis, *Journal of Food Science*, Vol. 41, p.p. 647-651.
- Alan J. Katz , 1978, Design and analysis of experiments on mutagenicity : I. Minimal sample sizes *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, Volume 50, Pages 301-307.
- Atkinson, A.C. y Riani, 2000, M. *Robust Diagnostic Regresion Análisis*. Springer Verlag.
- A. R. De Pinheiro Henriques, L. F. M. Marcelis, 2000, Regulation of Growth at Steady-state Nitrogen Nutrition in Lettuce (*Lactuca sativa* L.): Interactive Effects of Nitrogen and Irradiance, *Annals of Botany*, Volume 86, Pages 1073-1080
- Bates, D.M Y Watts, D.G. 1998, *Nonlinear Regresión Analysis and its Aplications*, Wiley, New York.
- Beetner, G., Tasao, T. Frey, A. y Harper., 1974, Degradation of thiamine and Riboflavin During Extrusion Processing. *Journal food of food science*, 39, 207-208.
- Bishnu P. Chapagain, Zeev Wiesman, 2004, Effect of potassium magnesium chloride in the fertigation solution as partial source of potassium on growth, yield and quality of greenhouse tomato, *Scientia Horticulturae* , Pages 279-

288.

- Box, G.E.P. y Draper, N.R. 1987, *Empirical Model Building and Response Surface*, John Wiley & Sons, New York.
- Box, G.E.P., y Hunter, W.G y Hunter, 1978, *J.S. Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, New York.
- Box, G.P.E. y Meyer, R.D. 1986, *Dispersión Effects from fraccional Desing. Technometrics*.
- Castaño Tostado Eduardo, Domínguez Domínguez Jorge, 2007, *Diseño de Experimentos*, Universidad Autonoma de Queretaro.
- Derringer, G.C. y Suich, R., 1980, *Simultaneous optimizacion of several response variables*, *Journal of Quality Technology*.
- Derringer, G.C, 1994, *Optimizing a product's Properties*. *Quality Progress*.
- Do Huett and Eb Dettmann, 2004, *Australian Journal of Experimental Agriculture* 28(3) 391 - 399 (1988) doi:10.1071/EA9880391
- Dominique-André Demers, Martine Dorais, Chris H. Wien, André Gosselin, 1998, *Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) plants and fruit yields*, *Scientia Horticulturae*, Volume 74, Pages 295-306.
- Draper, N.R y Smith H. 1998, *Applied Regression Analysis*, John Wiley & Sons, New York.
- Edward P. Glenn, 1984, *Seasonal effects of radiation and temperature on growth of greenhouse lettuce in a high insolation desert environment*, *Scientia Horticulturae*, Volume 22, Pages 9-21
- Eva Balsa-Canto, Maria Rodriguez-Fernandez, Julio R. Banga, 2007, *Optimal design of dynamic experiments for improved estimation of kinetic parameters of thermal degradation*, *Journal of Food Engineering*, Volume 82, Pages 178-188
- Fabian, V. 1993, *On the problem of the interactions in the analysis of variance*. *Journal of the American Statistical Association*, 86, No. 414, 362-367.
- Fisher R. A., & Mackenzie, W. A. (1923). *Studies in Crop Variation. II. The Manurial Response of Different Potato Varieties*. *Journal of Agricultural Science*, 13, 311-320.

- Gaia Franceschini, Sandro Macchietto, 2008, Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art Chemical Engineering Science, Volume 63, Pages 4846-4872.
- Gy. Heltai, Gy. Füleky, 1992, Soil analysis and nutrition capacity, Microchemical Journal, Volume 46, Pages 4-19
- Haaland, P.D. 1989, Experimental Design of experiment, Marcel Dekker, New York.
- Harrington, E.C. 1965. The desirability function, Industrial Quality Control.
- Hernandez Angel, Lorens H. P. and Wiebe H. I., 1990, Effect of temperature on photosynthesis of lettuce adapted to different light and temperature conditions. Sci. Hortic. 13, 115-123.
- Horst Marschner , 1995, Mineral Nutrition of Higher Plants (Second Edition), Pages 681-861.
- Johannes F.J. Max, Walter J. Horst, Urbanus N. Mutwiwa, Hans-Jürgen Tantau, 2009, Effects of greenhouse cooling method on growth, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in a tropical climate, Scientia Horticulturae, Volume 122, Pages 179-186.
- Juarez Hernandez, Ma. de Jesús, Baca Bastillo, Gustavo A., Lorenzo, 2006, Propuesta para la formulación de soluciones nutritivas en estudios de nutrición vegetal. INCI, vol.31, no.4, p.246-253. ISSN 0378-1844.
- Kosobrukhov A. A., Bagnavets E. A., Semenova N. A. and Chermnykh L. N., 1988, Photosynthesis and absorption of mineral nutrients in tomato plants under various root zone temperature and light conditions. biotronics 17, 21-28.
- Khuri, A. y Colon, M. S, 1987, Response Surface Design and Analysis, Marcel Dekker, New York.
- M.M. Peet, D.H. Willits, 1984, CO₂ enrichment of greenhouse tomatoes using a closed-loop heat storage: Effects of cultivar and nitrogen Scientia Horticulturae, Volume 24, Pages 21-32
- Montgomery, D. 1984, Design and Analysis of Experiment, John Wiley & Sons, New York.
- Montgomery, D. y Peck, E.A. 1982, Introduction to linear Regression Analysis. John Wiley & Sons, New York.

- Motycka R., Richards D., and Bechtel p.,1984, Response Surface Methodology. Approach to the optimization of Boneless Ham yiel. Journal of food science, 1386-1389.
- Myres, R.H. Response Surface Methodology, 1971, Allyn and Bacon, Boston.
- Myres, R.H. y Montgomery, D. Response Surface Methodology, John Wiley & Sons, New York.
- R. Rojas Cristian, James S. Welsh, Graham C. Goodwin, Arie Feuer , 2007, Robust optimal experiment design for system identification Automatica, Volume 43, Issue 6, Pages 993-1008.
- Pardossi Alberto, Malorgio Fernando, L. Incrocci, Campiotti Carlo Alberto, Franco Tognoni, 2002, A comparison between two methods to control nutrient delivery to greenhouse melons grown in recirculating nutrient solution culture, Scientia Horticulturae, Volume 92, Pages 89-95.
- Seber G.A.F. 1978, Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons New York.
- Sprott, D.A. Statistical Inference in Science, 2000, Springer Verlag. New York.
- Taguchi, G. 1986, Introduction to Quality Enginnering. Asian Productivity Organization.
- Taguchi, G. System of Experimental Design, 1987, Vols. 1 and 2 Traducción publicada por UNIPUB.
- Urretarazu, M. 1997. Manual De Cultivo Sin Suelo. Ed. Servicio de Publicaciones Universidad de A-Imería. Almería.
- Wu, C.F.J. Hamada, M. 2000, Experiments: Planning, Analysis and Parameter Design Optimization. John Wiley & Sons.
- Zhao-Hui Liu, Li-Hua Jiang, Xiao-Lin LI, R. Hardter, Wen-Jun Zhang, Yu-Lan Zhang, Dong-Feng Zheng, 2008, Effect of N and K Fertilizers on Yield and Quality of Greenhouse, Pedosphere, Volume 18, Pages 496-502.