



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

CULTIVO HIDROPÓNICO EN MANGAS VERTICALES DE DOS VARIEDADES DE
ACELGA Y LECHUGA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

BIÓLOGO

PRESENTA

JUÁREZ SIFUENTES HUMBERTO

DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARÍA SOCORRO OROZCO ALMANZA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN EN ECOLOGÍA VEGETAL

INVESTIGACIÓN FINANCIADA POR PAPIME PE202111

MÉXICO, D.F. JUNIO, 2014



AGRADECIMIENTOS

Un eterno agradecimiento a mi madre María Guadalupe Sifuentes Quiñones, a mi padre Humberto Juárez Gamboa, al educarme y sacrificarse para ser una mejor persona cada día. Mis hermanas Laura Concepción, Susana Adelina y María Guadalupe, al estar en los momentos difíciles y apoyarme cuando más lo necesito. Y a mis hermanos Leonardo y Alejandro por su apoyo, comprensión y cuidado,

Un inmenso agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo incondicional, así como la inolvidable etapa de mi vida universitaria.

A mi directora de tesis Dra. María Socorro Orozco Almazán por su apoyo, dedicación, esfuerzo, tiempo y por ser una excelente tutora en mi estadía en el vivero, motivándome en las peores situaciones y confiar en mí.

Al jurado integrado por la Dra. Esther García Amador, Dr. Arcadio Monroy Ata, Dra. Ana María Soriano Martínez y al M. en C. Juan Manuel Valderrábano Gómez, por su apoyo, tiempo y aportaciones por mejorar este trabajo.

A mis mejores amigos, Luis Fernando “El Patriarca”, Néstor Rubén “El Druida”, Luis Fernando “Keichi” y a Eduardo “El Enano” por su tiempo, apoyo, dedicación, ánimos y confianza.

Un agradecimiento a Eduardo Chimal Sánchez por su asesoría en el área estadística en este trabajo.

Y por último, pero no menos importante a todos mis amigos, compañeros y profesores de la facultad por dedicarme un momento en conocerme. A todos y cada uno les doy mis más sinceros agradecimientos.

Contenido

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN.....	2
II. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Historia	3
2.2 Hidroponía vertical	5
2.3 Ventajas de la Hidroponía.....	6
2.4 Solución Nutritiva	6
2.5 pH y Conductividad Eléctrica	8
2.5.1 Potencial de Hidrógeniones.....	8
2.5.2 Conductividad Eléctrica.....	9
2.6 Sustrato	9
2.6.1 Propiedades físicas del medio de cultivo.....	10
2.6.1.1 Espacio poroso total	10
2.6.1.2 Distribución del tamaño de las partículas.....	11
2.6.1.3 Densidad aparente.....	12
2.6.1.4 Capacidad de retención de agua.....	12
2.6.2 Propiedades químicas del medio de cultivo	13
2.6.2.1 Capacidad de intercambio catiónico	13
2.6.2.2 Disponibilidad de nutrientes	14
2.6.2.3 Salinidad.....	15
2.6.3 Características de los sustratos utilizados en hidroponía.....	15
2.6.4 Sustratos comúnmente utilizados en cultivos hidropónicos.....	16



2.7 Luz como factor determinante en el crecimiento vegetal.....	17
2.8 Fotosíntesis	19
2.8.1 Fototropismo	20
2.8.2 Gravitropismo.....	20
2.8.3 Fotoperiodismo	21
2.9 Características generales de las especies cultivadas	22
2.9.1 <i>Lactuca sativa</i> L.....	22
2.9.2 <i>Beta vulgaris</i> var. <i>Ford hook</i> y <i>Beta vulgaris</i> var. <i>Bresanne</i>	24
IV. JUSTIFICACIÓN	28
IV. OBJETIVOS	29
4.1 Objetivo general	29
4.2 Objetivos específicos	29
4.3 Hipótesis.....	29
V. METODOLOGÍA	30
5.1 Construcción de mangas verticales	31
5.2 Siembra en almácigo.....	32
5.3 Trasplante.....	32
5.4 Trasplante de plántulas a las mangas verticales	32
5.5 Riego	33
5.6 Medición de la radiación fotosintéticamente Activa (PAR)	33
5.7 Variables de respuesta.....	34
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
6.1 Efecto del sustrato, variedad y orientación para la lechuga.	36
6.2 Análisis de los tratamientos sustrato, variedad y orientación para la acelga	42
6.4 Supervivencia	47



6.5 Costos para la producción de lechuga y acelga en un sistema hidropónico mangas verticales	49
6.5.1 Construcción del sistema Hidropónico Mangas verticales.....	49
6.5.2 Índice Costo/Beneficio	50
VII. CONCLUSIONES	52
REFERENCIAS.....	53
ANEXOS	60

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. MACRO Y MICROELEMENTOS NECESARIOS PARA EL DESARROLLO DE LAS PLANTAS....	
.....	7
CUADRO 2. SOLUCIÓN HIDROPÓNICA MÁS TECNIFICADA	7
CUADRO 3. PLAGAS PRESENTES EN LECHUGA	24
CUADRO 4. PLAGAS DE LA ACELGA	27
CUADRO 5. CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES ESTUDIADAS	27
CUADRO 6. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	31
CUADRO 7. CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE TEZONTLE Y PIEDRA PÓMEZ.....	46
CUADRO 8. COSTOS DE PRODUCCIÓN.....	49
CUADRO 9. PRESUPUESTO DE INSUMOS PARA EL CULTIVO DE LECHUGA Y ACELGA	50
CUADRO 10. RELACIÓN COSTO/BENEFICIO DEL SISTEMA HIDROPÓNICO DE MANGAS VERTICALES	
.....	51



ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE LA METODOLOGÍA APLICADA.	30
FIGURA 2. ALTURA PARA LAS PLANTAS DE LECHUGA OREJONA EN AGROLITA Y TEZONTLE	38
FIGURA 3. PAR POR ORIENTACIÓN DE INCIDENCIA DE LUZ	39
FIGURA 4. COBERTURA PARA LAS VARIEDADES DE LECHUGA	39
FIGURA 5. BIOMASA PARA LAS VARIEDADES DE LECHUGA	40
FIGURA 6. ÍNDICE DE DICKSON PARA LAS VARIEDADES DE LECHUGA	41
FIGURA 7. ALTURA PARA LAS PLANTAS DE ACELGA RUGOSA Y LISA	42
FIGURA 8. NÚMERO DE HOJAS PARA LAS VARIEDADES DE ACELGA	44
FIGURA 9. ÍNDICE DE DICKSON PARA LAS VARIEDADES DE ACELGA	45
FIGURA 10. TCR PARA LAS VARIEDADES DE ACELGA.....	45
FIGURA 11. SUPERVIVENCIA EN LOS DOS SUSTRATOS DURANTE EL TRANCURSO DEL CULTIVO	47



Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo, evaluar el efecto de dos sustratos (tezontle y agrolita) y cuatro incidencias de luz, en el rendimiento de dos variedades de acelga y dos de lechuga, en un sistema hidropónico de mangas verticales. Para esto se instaló un sistema hidropónico, con cuatro mangas por sustrato y variedad, teniendo un total de 12 bolsas. El sistema fue irrigado con mangueras a través de las cuales se hizo pasar una solución nutritiva marca Hydroenvironment®. La solución se aplicó diariamente durante media hora, para mantener el cultivo completamente saturado y así evitar las deficiencias hídricas y nutrimentales. Quincenalmente se registraron en las variedades de las dos especies: altura, cobertura, supervivencia, biomasa peso fresco y con estos datos se calculó la tasa de crecimiento relativo (TCR) y el índice de Dickson, para determinar la calidad de planta.

Los resultados muestran, en general, que para las variables altura, cobertura, biomasa, número de hojas, TCR e índice de Dickson, se obtuvieron mejores resultados con tezontle que permitió un mejor desarrollo, crecimiento y rendimiento de las dos especies de hortalizas. En relación a la orientación del sustrato, el lado noroeste es el que presentó los mejores resultados en cuanto a calidad de la planta, sin embargo las otras orientaciones no restringieron el crecimiento, por debajo de las condiciones necesarias del producto para el consumo y comercialización. Se concluye que el sistema resultó rentable, a partir del segundo ciclo de producción. El sistema de mangas verticales para la producción de lechuga y acelga representa una alternativa para la producción de hortalizas en espacios reducidos, con fines tanto de autoconsumo, como para comercialización. En general se recomienda la utilización de tezontle con tamaño de partícula 5-10 mm para el cultivo hidropónico de acelga y lechuga bajo un sistema de mangas verticales en relación a la orientación el lado noroeste presenta los mejores resultados, resaltando que el 25% de los individuos de cada especie y variedad alcanzaron el tamaño comercial, 12.5% alcanzaron la talla más pequeña de cerca de 25% la talla de las más grandes y el 62.5% presentaron tallas intermedias.



I. Introducción

La hidroponía es una rama de la ciencia agronómica, que ayuda a la alimentación de millones de personas desde los desiertos de Israel, Líbano y Kuwait, hasta Sri Lanka, Filipinas, Calcuta, y en los pueblos desérticos de Bengala Oriental, en Pakistán. En las Islas Canarias (España insular) hay grandes extensiones de tierra cubiertas con polietileno apoyado en postes para formar una sola estructura continua donde se cultivan tomates hidropónicos. Estas estructuras similares se usan en el Caribe, Canadá y Rusia (Barbado, 2005). La hidroponía se ha vuelto una alternativa real para cultivar en invernaderos o invernáculos en todos los climas ya que existen grandes instalaciones hidropónicas a lo largo del mundo para cultivar flores y verduras. Por ejemplo, existen grandes invernaderos hidropónicos en funcionamiento en Tucson, Phoenix (Arizona, Estados Unidos) y Abu Dhabi (instalación con agua desalinizadora del Golfo Pérsico). Entre los cultivos más importantes bajo este sistema se encuentran: jitomates, pepinos, coles y rábanos.

Comparada con la agricultura tradicional, la hidroponía promueve el uso eficiente del agua y nutrientes, ya que usa una fracción insignificante de agua, además de permitir el uso de agua de baja calidad moderadamente salina o alcalina (Mondragón, 2003).

La hidroponía de mangas verticales es una técnica apropiada para practicar la horticultura en las ciudades, dado que permite cultivar hortalizas y flores en espacios reducidos, tal como los que se presentan en gran parte de las residencias de los habitantes del Distrito Federal.

A pesar de que el sistema de mangas verticales es eficiente en la producción, actualmente se carece de evaluaciones cuantitativas que justifiquen su uso desde el punto de vista rentable. Por otro lado el sistema presenta una desventaja y es que la luz solar no incide del mismo modo sobre todas las plantas en él instaladas, provocando diferencias en el crecimiento y rendimiento, que tampoco han sido cuantificadas (Juárez, 2010).



El objetivo de esta investigación fue evaluar el crecimiento y rendimiento de dos variedades de lechuga y acelga en un sistema de hidroponía vertical, bajo el efecto de diferentes incidencias de luz.

Como antecedente, Juárez (2010) observó en un sistema hidropónico de mangas verticales con cultivos de lechuga orejona y acelga de hoja rugosa, que la incidencia de luz en ciertos puntos cardinales de las mangas, es muy heterogénea y, por lo tanto el crecimiento de las plantas presenta diferencias en cuanto al tamaño y tiempo de maduración; por lo que se consideró necesario determinar las condiciones de luz requeridas para estas dos especies, que permitan la obtención de plantas de tamaño uniforme sobre las mangas.

II. Antecedentes

El desarrollo de hortalizas de hojas ha dado excelentes resultados en este sistema hidropónico. Por ejemplo la lechuga, es una especie de ciclo de vida corto (3 – 4 meses), por lo tanto es muy rentable para la venta o autoconsumo; así mismo, la acelga ofrece más rentabilidad que la lechuga en el sistema, ya que se puede mantener en él por un periodo de un año o más sin necesidad de remplazar la planta. La fresa es otro cultivo que se produce por la técnica de hidroponía con bastante éxito (Alpízar, 2006).

2.1 Historia

La palabra hidroponía significa literalmente “trabajo en agua” e incluye todos los métodos y sistemas para cultivar plantas sin suelo (Stainer, 1977; Douglas, 1985). De acuerdo con Durany (1982), los sistemas hidropónicos más comunes son:



- ✎ Cultivo en medio líquido. En este sistema las plantas tienen sus raíces inmersas en la solución nutritiva y el tipo de soporte depende del cultivo.
- ✎ Cultivo en sustrato sólido, inerte y poroso. En este caso la planta se ancla al sustrato y adquiere los nutrientes por percolación.
- ✎ La sub-irrigación pertenece al segundo tipo; la solución nutritiva es provista y drenada a través de la misma entrada (Stainer, 1977). El sistema es cerrado y recicla la solución nutritiva de dos a seis semanas (Resh, 1987).

La hidroponía es una técnica ancestral; en la antigüedad hubo civilizaciones que la usaron como medio de subsistencia. Por ejemplo, los aztecas construyeron una ciudad en el lago de Texcoco y cultivaban maíz en barcos o barcazas con un entramado de pajas. Otro ejemplo lo constituyen, los Jardines Colgantes de Babilonia, que eran jardines hidropónicos por que se alimentaban del agua que fluía por canales. Esta técnica de cultivo también existía en la antigua China, India, Egipto, y en la cultura maya (Barbado, 2005).

En la Segunda Guerra Mundial los ejércitos norteamericanos en el Océano Pacífico se abastecían en forma hidropónica. Cuando los Estados Unidos ocuparon Japón, se hicieron grandes botes hidropónicos para abastecer a los soldados. En Japón, por falta de espacio y de agua, la tecnología norteamericana se desarrolló a niveles asombrosos; la NASA la utilizó desde hace aproximadamente 30 años para alimentar a los astronautas. El intento científico documentado más antiguo para descubrir los nutrientes de las plantas tuvo lugar en 1600, cuando el belga Jan Baptista van Helmont mostró que las plantas obtienen sustancias del agua, posteriormente se descubrió que la planta toma minerales tanto del suelo como del agua, que las hojas expulsan dióxido de carbono al aire y que las plantas están compuestas por elementos derivados del agua, tierra, sol y aire (Barbado, 2005). En la actualidad es utilizada comercialmente en países con limitaciones serias de suelo y agua.



2.2 Hidroponía vertical

El cultivo de plantas en columnas verticales se ha desarrollado en Europa, principalmente en Italia y España. Inicialmente este sistema se construyó con barriles o bidones de metal colocados verticalmente unos sobre otros, llenados con grava o una mezcla de turba. En los laterales de los contenedores se efectuaban una serie de boquetes que permitían colocar las plantas en el medio; posteriormente, se han utilizado tubos de asbesto-cemento con boquetes colocados en espiral. El riego y la nutrición se efectúan con un sistema de riego por goteo colocado en la parte superior de cada una de las columnas. Si se utiliza la grava como medio, la solución de nutrientes puede reciclarse colocando la columna sobre un canal colector, que conduciría de vuelta a esta hasta un depósito central.

En Italia se ha perfeccionado este sistema construyendo una columna formada por pequeños tubos modulares colocados unos sobre otros. Cada uno de los módulos tiene una serie de salientes en forma de media taza en las cuales se colocan las plantas en lugar de los simples boquetes, utilizándose como medio, una mezcla con turba. Todo esto forma un sistema abierto que permite el exceso de solución de nutrientes y su drenaje hasta la base de la columna. Este sistema es particularmente apropiado en el cultivo de fresas (Resh, 1982).

Actualmente, se tiene un sistema que consiste en tubos verticales o columnas, fabricados de plástico u otros materiales diversos, relleno por sustratos (Tezontle, fibra de coco, agrolita, vermiculita, aserrín, entre otros) de forma que, a lo largo de los tubos se establecen las plantas. Este sistema está relativamente extendido en algunos países, como España o Suiza entre otros, en el cultivo de la fresa, en el que se han utilizado tubos plásticos de 15 cm de diámetro y hasta 2 m de altura en los que existen orificios en cuyo interior se asientan las plantas de fresa sobre el sustrato confeccionado con una mezcla de turba y arena, de manera que en cada tubo se colocan hasta 32 plantas. Los tubos se colocan entre sí, a 1 m entre filas y a 0.5 m entre líneas, de forma que llegan a resultar densidades de plantaciones de 64 plantas m^{-2} , lo que conlleva elevadísimos rendimientos, de hasta 120 t ha^{-1} (Maroto, 2002).



2.3 Ventajas de la Hidroponía

- I. Provee a las raíces en todo momento de un nivel de humedad constante, independiente del clima o de la etapa de crecimiento del cultivo.
- II. Reduce el riesgo por excesos de irrigación.
- III. Evita el gasto inútil de agua y fertilizantes.
- IV. Asegura la irrigación en toda el área radicular.
- V. Reduce considerablemente los problemas de enfermedades producidas por patógenos del suelo.
- VI. Aumenta los rendimientos y mejora la calidad de producción.

2.4 Solución Nutritiva

El cultivo en solución nutritiva recibe también los nombres de cultivo en agua, acuacultura, quimicultura o nutricultura. Ellis y Swaney (1963) definen al cultivo en agua diciendo que “... en su sentido más puro es un sistema que involucra el crecimiento de flores y vegetales sumergiendo sus raíces en una solución acuosa de nutrientes” (Sholto, 1994).

El principio básico del cultivo en solución nutritiva versa en que las raíces de las plantas se desarrollen parcialmente o totalmente en un medio líquido que contenga todos los elementos nutritivos necesarios. Las soluciones nutritivas (Cuadro 1), generalmente contienen: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, azufre y magnesio (denominados macroelementos porque son más demandados por la biota) (Resh, 1982). Y en menor medida: Manganeso, Boro, Hierro, Cobre, Molibdeno, Cloro y Zinc (microelementos, que son demandados en cantidades traza) (Sholto, 1994). En el Cuadro 2 se presentan algunos de los macro y microelementos utilizados en soluciones hidropónicas en sus diferentes compuestos.



**Cuadro 1. Macro y microelementos necesarios para el desarrollo de las plantas
(Resh, 1982)**

Macronutrientes	Micronutrientes
Nitrógeno	Boro
Fósforo	Hierro
Potasio	Cobre
Calcio	Molibdeno
Azufre	Cloro
Magnesio	Zinc
	Molibdeno

Cuadro 2. Solución hidropónica más tecnificada (Sholto, 1994)

Compuestos	
Nitrato de Calcio	Sulfato de Zinc
Sulfato de Potasio Soluble	Sulfato de Cobre
Sulfato de Magnesio	Sulfato de Manganeso
Ácido Fosfórico	Sulfato Ferroso
Nitrato de Potasio	Ácido Bórico en Polvo



Para administrar las sales en solución, se aplican mezclas de, por ejemplo, Sulfato de Magnesio (involucra al Azufre); Fosfato mono potásico (Fósforo y Potasio) y Nitrato de Calcio (incluye Nitrógeno). Las soluciones que contienen estas tres sales se consideran completas, ya que proporcionan a las plantas los principales elementos requeridos para su nutrición.

2.5 pH y Conductividad Eléctrica

Existen diversos factores que deben de tomarse en cuenta para un adecuado control y manejo de la solución nutritiva, la cual repercutirá directamente en la calidad del producto obtenido. Entre ellos está la oxigenación de la solución nutritiva, el control del potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE), con los que se puede monitorear si la planta está absorbiendo los nutrientes necesarios disueltos en el agua para un adecuado desarrollo. El comportamiento de los cultivos ante el pH varía dependiendo de sus necesidades.

2.5.1 Potencial de Hidrógeno (pH)

El pH indica el grado de acidez o alcalinidad de una solución nutritiva, cuyo parámetro para medirlas se llama potencial de hidrógeniones. El control del factor pH va de 1 a 14, siendo 7 neutral; el rango ideal para nuestro cultivos hidropónicos debe ser de 5.5 -6.5 (ligeramente ácida), si su valor es mayor de siete, es alcalina. Es muy importante mantener la solución nutritiva en intervalos de 5.8 a 7.0 de lo contrario, la disponibilidad de los nutrientes varía y las plantas se ven afectadas. Si el pH es mayor de 7 es necesario agregar unas gotas de vinagre con un gotero y medir poco a poco hasta lograr el intervalo adecuado; si es menor de 5.5 se le añade una pizca de bicarbonato de sodio (Valle, 1992).



2.5.2 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es una unidad de medida que señala el contenido de sales en una solución, e indica la actividad de las sales disueltas para poder ser absorbidas por las raíces de las plantas. El rango de conductividad eléctrica requerido para un adecuado crecimiento del cultivo se encuentra entre 1.5 y 2.5 dS/m⁻¹. La conductividad se puede medir con un conductímetro, y se hace importante cuando el cultivo es para explotación comercial básicamente, en el sistema de raíz flotante, esto se controla de una manera muy sencilla (Alpízar, 2006).

2.6 Sustrato

Actualmente, el término sustrato en la agricultura se aplica a todo material sólido, natural, de síntesis, mineral u orgánico distinto del suelo *in situ*, que colocado en un contenedor o bolsa, en forma pura o de mezcla, permite el desarrollo del sistema radicular y el crecimiento del cultivo (Abad y Noguera, 2000) y que puede intervenir o no en la nutrición de la planta. Por su parte Burés (1998), lo define como cualquier medio que se utilice para cultivar plantas en contenedores entendiendo por contenedor cualquier recipiente que tenga una altura limitada y que su base se halle a presión atmosférica.

En cuanto a las funciones principales de un sustrato Abad y Noguera (2000) indican que las funciones más importantes de un sustrato están proporcionar un medio adecuado para el crecimiento de las raíces (aportar agua, aire y nutrimentos), construir una base apropiada para el anclaje y soporte a la raíz. Mientras que Abad *et al.*, (2005) sugieren que la finalidad de los sustratos en cualquier cultivo es producir una planta/cosecha de calidad en el periodo más corto, con bajos costos de producción, además no debe provocar un impacto ambiental.



2.6.1 Propiedades físicas del medio de cultivo

Las propiedades físicas de los medios de cultivo son de importancia. Una vez que el medio este en el contenedor, y la planta esté creciendo en él, no es posible modificar las características físicas básicas de dicho medio. Esto contrasta con las características químicas de los sustratos, que pueden ser modificadas mediante técnicas de cultivo apropiadas, realizadas por el mismo agricultor.

La caracterización física estudia la distribución volumétrica del material sólido, el agua y el aire, así como su variación en función del potencial matricial. Los métodos de determinación de las relaciones aire-agua de los sustratos difieren de los métodos utilizados en los suelos con idéntico fin. Las curvas de retención de agua de los suelos agrícolas se miden usualmente en un amplio intervalo de succiones (0-1,5 MPa). Por el contrario, las plantas cultivadas en contenedores no pueden ser sometidas a tensiones hídricas elevadas, debido al volumen limitado del medio en que crecen y se desarrollan. Es por esto que, en la determinación de las curvas de liberación de agua de los sustratos, se aplica un intervalo de succiones mucho más estrecho (0-100 cm de tensión de columna de agua [c.a.]). La metodología analítica más ampliamente difundida para ello es la desarrollada por De Boodt *et al.*, (1974).

2.6.1.1 Espacio poroso total

Es el volumen total del medio de cultivo no ocupado por partículas orgánicas ni minerales. Su nivel óptimo se sitúa por encima de 85% del volumen del sustrato (Abad *et al.*, 1993).

El total de poros existentes en un sustrato se divide entre: 1) Poros «capilares» de tamaño menor a 30 μm , que son los que retienen el agua y, 2) Poros «no capilares» o macroporos, de tamaño mayor a 30 μm , que son los que se vacían después que el sustrato ha drenado, permitiendo así la aireación. Sin embargo los poros no drenan completamente y una fina película de agua es retenida alrededor de las partículas del sustrato. Esta película de agua disminuye en espesor a medida que el medio se seca (Raviv *et al.*, 1986; Bunt, 1988).



La caracterización del volumen poroso muestra que la porosidad puede ser intraparticular, cuando se refiere a los poros situados en el interior de las partículas del sustrato, o interparticular, cuando está constituida por los poros existentes entre las diferentes partículas. En adición, si el material presenta porosidad intraparticular, el comportamiento de los fluidos (fase acuosa y fase gaseosa) será distinto, según que esta porosidad sea abierta o cerrada (ocluida). En el caso de porosidad cerrada, no existe comunicación posible entre los poros del interior de las partículas y los que están en el exterior, entre dichas partículas. En consecuencia, los poros internos no influirán sobre la distribución del agua y del aire en el sustrato, siendo su único efecto el proporcionar cierta ligereza a dicho sustrato. Si, por el contrario, la porosidad es abierta, el agua puede circular por el interior de las partículas, pudiendo participar, en consecuencia, en la nutrición hídrica de las plantas (Gras, 1987; Lamaire *et al.*, 1989).

Consecuentemente, una alta porosidad total no indica por sí misma una buena estructura del sustrato, sino que es necesario conocer la relación entre la fracción de la porosidad que proporciona el agua y aquella que proporciona la aireación.

2.6.1.2 Distribución del tamaño de las partículas

El tamaño de las partículas afecta al crecimiento de las plantas a través del tamaño de los poros. La distribución del tamaño de las partículas y de los poros determina el balance entre el contenido en agua y aire del sustrato a cualquier nivel de humedad.

Los materiales de textura gruesa, con tamaño de partículas superior a 0,9 mm, con poros grandes, superiores a 100 μm , retienen cantidades reducidas de agua y están bien aireados. Los materiales finos, con partículas inferiores a 0.25 mm y tamaño de poros inferiores a 30 μm , retienen grandes cantidades de agua difícilmente disponible y están mal aireados. El mejor sustrato se define como aquel material de textura gruesa a media, con una distribución de tamaño de los poros entre 30 y 300 μm , equivalente a una distribución del tamaño de las partículas entre 0.25 y 2.5 mm, que retiene suficiente agua fácilmente disponible y posee, además, un adecuado contenido en aire (Puustjärvi, 1983).



Muchos sustratos (arena, grava, perlita, etc.) están constituidos por una mezcla de partículas con tamaños diferentes. Las propiedades físicas de estos sustratos variaran en función de la distribución del tamaño de sus partículas, siendo por tanto de importancia fundamental la caracterización granulométrica de los materiales utilizados como medios de cultivo.

2.6.1.3 Densidad aparente

Se define como la masa seca del material sólido por unidad de volumen aparente del medio húmedo, es decir incluyendo el espacio poroso entre las partículas. La densidad aparente juega un papel importante ya que los sustratos y los contenedores se transportan durante su manejo y manipulación y, consecuentemente, su peso ha de ser tenido en cuenta. En adición, el anclaje de las plantas debería ser considerado también como un parámetro de importancia. En los invernaderos, donde el viento no es un factor limitante, la densidad del sustrato puede ser tan baja como 0.150 g/cm^3 (White, 1974; Poole *et al.*, 1981).

2.6.1.4 Capacidad de retención de agua

Para el óptimo crecimiento de las plantas en contenedor es necesario que la distribución de tamaños de poro sea la adecuada para que el sustrato retenga cantidades convenientes de agua y aire. Pero no es suficiente que la cantidad total de agua contenida en un medio de cultivo sea la necesaria para la planta, ya puede ser retenida con una fuerza muy elevada, superior a la de succión que es capaz de ejercer la planta (Ansonera, 1994).

Lo que más debe de interesar es la capacidad de retención de agua disponible (Ad), y, esta se define como la cantidad de agua retenida por el sustrato entre su capacidad de contenedor y el PMP (García, 1999). El valor de la Ad dependerá de la cantidad total de agua retenida por el sustrato y de la forma en que dicha agua se halla distribuida entre los poros (Ansonera, 1994).



Existen dos tipos de fuerzas que retienen el agua en los poros más pequeños del sustrato, estas son; las capilares y las osmóticas, las fuerzas capilares son el resultado de la atracción del agua por las superficies, son tanto mayores cuanto menor es el diámetro de los poros como consecuencia de partícula menor (García, 1999).

2.6.2 Propiedades químicas del medio de cultivo

Las propiedades químicas de los sustratos caracterizan las transferencias de materia entre el sustrato y la solución del sustrato: Reacciones de disoluciones e hidrolisis de los constituyentes minerales (químicas), reacciones de intercambio de iones (fisicoquímicas) y reacciones de biodegradación de la materia orgánica (bioquímica).

Los materiales orgánicos son los componentes que contribuyen en mayor grado a la química de los sustratos, debido principalmente a la formación y presencia de las sustancias húmicas, proceso de la descomposición de la materia orgánica (Nuez, 2001).

2.6.2.1 Capacidad de intercambio catiónico

Se define como la suma de los cationes cambiables que pueden ser absorbidos por unidad de peso (o de volumen) del sustrato. Dichos cationes quedan así retenidos frente al efecto lixivante del agua y están usualmente disponibles para la planta.

El valor óptimo para la capacidad de intercambio catiónico de los sustratos depende estrechamente de la frecuencia de la fertirrigación (Lemaire *et al.*, 1989). Si la fertirrigación se aplica permanentemente, la capacidad de adsorción de cationes no representa ninguna ventaja, siendo recomendable en este caso la utilización de materiales inertes, con muy baja o nula capacidad de intercambio catiónico. Si, por el contrario, la fertirrigación se aplica de modo intermitente, será interesante la utilización de sustratos con moderada o elevada capacidad de intercambio catiónico, en todo caso superior a 20 meq/100 g (Abad *et al.*, 1993).

Los materiales orgánicos poseen una elevada capacidad de intercambio catiónico y una alta capacidad tampón frente a cambios rápidos en la disponibilidad de los



nutrientes y en el pH. Una capacidad de intercambio catiónico elevada representa un depósito de reserva para los nutrientes, mientras que los materiales con baja capacidad de cambio, como la mayoría de los sustratos minerales, retienen cantidades reducidas de nutrientes y requieren una aplicación frecuente y regular de fertilizantes. Se puede prevenir los cambios rápidos en la acidez o la alcalinidad de los sustratos, usando materiales orgánicos en las mezclas de cultivo (Puustjärvi, 1983).

La materia orgánica, especialmente las sustancias húmicas, contienen grupos funcionales cargados negativamente (carboxílico, fenólico, enólico, etc.), que son los responsables de la capacidad de los materiales orgánicos para retener los cationes en forma no lixiviable. Durante el proceso de intercambio catiónico, los iones orgánicos cargados negativamente son capaces de adsorber cationes (NH_4^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , etc.) en proporciones variables, en función de la afinidad del catión por los centros de adsorción y de su concentración en la disolución.

Ciertos materiales de naturaleza arcillosa (vermiculita, p. ej.) tienen la propiedad de adsorber o fijar cationes superficialmente, mediante sustituciones catiónicas o isomorfias en los cristales del mineral. Algunos autores han indicado que los materiales para el cultivo hidropónico de hortalizas, como el tomate, deberían presentar una bajísima o nula capacidad de cambio catiónico, es decir, deberían ser químicamente inertes, con objeto de permitir un mejor control nutricional de las plantas (García, 1999) o bien, de evitar problemas de salinización excesiva del sustrato (Lemaire *et al.*, 1989).

2.6.2.2 Disponibilidad de nutrientes

La mayoría de los sustratos minerales no se descomponen biológica ni químicamente y, desde un punto de vista práctico, se pueden considerar desprovistos de nutrientes. Por el contrario, los sustratos orgánicos difieren marcadamente entre sí en el contenido en nutrientes asimilables. Así, algunos (turba rubia, mantillo de bosque, etc.) poseen un nivel reducido de nutrientes asimilables, mientras que otros (compost, por ejemplo) presentan niveles elevado, dependiendo dicho nivel del origen del compost y del proceso de compostaje. En cualquier caso según Raviv *et al.*, (1986) para un crecimiento óptimo de

las plantas, deberían añadirse siempre nutrientes adicionales como fertilizantes de base y/o como fertilizantes durante el ciclo de cultivo (fertilización de cobertera).

2.6.2.3 Salinidad

Se refiere a la concentración de sales presentes en la solución del sustrato. Las causas que provocan un incremento en la salinidad del sustrato, después de estar este colocado en el contenedor son (Bunt, 1988; Lemaire *et al.*, 1989):

- I. La presencia de fertilizantes insolubles, como los de liberación lenta, cuando se degradan para producir nitratos, o bien, cuando liberan sales mediante difusión, en una cuantía superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas.
- II. Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución fertilizante es superior a las cantidades absorbidas por las plantas o las perdidas por lixiviación.
- III. Cuando el sustrato presenta una elevada capacidad de intercambio catiónico y, al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrientes.

Todas estas situaciones pueden ser prevenidas en gran parte conociendo las cantidades de fertilizantes requeridas por el cultivo y evitando las aplicaciones excesivas de abonos.

2.6.3 Características de los sustratos utilizados en hidroponía.

- ✎ Ser de naturaleza inerte. Esto permite un buen control de la nutrición, que es casi imposible lograr en suelo debido a la gran cantidad de reacciones que en éste tienen lugar.

- ✎ Tener una relación aire/agua equilibrada, para evitar los problemas de falta de aireación por riegos excesivos con la consecuente falta de oxigenación de las raíces.
- ✎ Ser de fácil lavado de sales. Esto evita el exceso de sales y las pérdidas de producción que se suceden en cultivos en suelo (especialmente los arcillosos o suelos con capa freática alta) (Sánchez, 1988).

2.6.4 Sustratos comúnmente utilizados en cultivos hidropónicos

- ✎ La perlita es un material obtenido mediante un tratamiento térmico a unos 1000 – 1200 °C de rocas sílice volcánicas, del grupo de las riolitas. Se presenta en partículas blancas cuyas dimensiones varían entre 1.5 y 6 mm, con una densidad baja, posee una capacidad de retención de agua de hasta cinco veces su peso y una elevada porosidad, la CIC es nula y la durabilidad está limitada por el tipo de cultivo (Terrés *et al.*, 2001).
- ✎ El tezontle es una roca ígnea extrusiva de origen volcánico (escoria volcánica) que se origina por el enfriamiento de lava y está constituido por silicatos de aluminio y bióxido de hierro; los colores varían de rojo a naranja, gris y negro. Wallach *et al.*, (1992) y Raviv *et al.*, (2002) mencionaron que el tezontle se caracteriza por su alta porosidad y área superficial. Existen varios tipos de tezontle que se diferencian entre sí por su viscosidad, color y contenido de Fe, Mn, Ca y Mg, estas diferencias se relacionan con el contenido de sílice presente en la roca y la temperatura de erupción, por lo que sus características físicas son determinadas principalmente por su composición mineralógica (Raviv *et al.*, 2002). Este material se somete a un proceso industrial de trituración para obtener la granulometría adecuada, se usa la fricción para perder ángulos y aristas, hasta que adquiere una forma redondeada de 2 a 50 mm. La textura es porosa (vesicular), por lo que es un material ligero, poco resistente, además de ofrecer buen drenaje y casi no aportar nutrientes, guarda el calor, no es permeable, ni aislante. A pesar del valor que tiene en la agricultura de México, no se tiene el conocimiento específico de sus propiedades físicas y micromorfológicas.

- ✎ Turba.- En los cultivos hidropónicos no es recomendable usar únicamente turba como sustrato por considerarse poco uniforme. Sin embargo, en pequeñas cantidades pueden añadirse agregados de arena y vermiculita para mejorar la aireación. Un porcentaje que oscile entre 25% y 40% de turba por volumen agregado a las arenas gruesas será una buena ayuda para la retención de humedad (Sholto, 1994).

- ✎ Vermiculita.- Es un mineral con la estructura de la mica, y se prepara expandiendo por calor en hornos a temperaturas cercanas a 1093.3 °C. El agua se convierte en vapor, separándose los estratos y formando trozos pequeños y porosos como esponjas. El calentamiento a tales temperaturas da lugar a una esterilización perfecta. Químicamente, la mica es un silicato hidratado de aluminio, magnesio y hierro. Al expandirse toma un peso muy ligero (0.1 a 0.16 g cm⁻³) con reacción neutra y excelentes propiedades tampón, siendo insoluble en agua, es capaz de absorber grandes cantidades de esta (11.3 a 15.1 L m⁻³). Tiene una capacidad de intercambio de cationes relativamente alta y por tanto, puede retener nutrientes en reserva e irlos cediendo posteriormente. Sus contenidos en magnesio y potasio, aunque bajos, son fácilmente disponibles para las plantas. La vermiculita para la horticultura se clasifica en cuatro tamaños: N° 1, con partículas de 5 a 8 mm; N° 2, el tamaño más regular, de 2 a 3 mm; N° 3, de 1 a 2 mm, y N° 4, el más útil como medio de germinación, de 0.75 a 1 mm. La vermiculita expandida no debe someterse a presiones ni compactaciones cuando está húmeda, puesto que se destruirá su estructura porosa (Resh, 1982).

2.7 Luz como factor determinante en el crecimiento vegetal

De los factores ambientales que afectan a las plantas, la luz es la que presenta la mayor heterogeneidad espacio-temporal. En una formación vegetal más o menos densa las hojas se superponen en niveles o capas sombreándose unas a otras. La luz es rápidamente absorbida por las primeras capas de hojas y lo que consigue penetrar hasta



las capas más bajas (1 a 2% de la luz incidente) es una luz progresivamente menos intensa, y empobrecida longitudes de onda ya absorbidas o, según se mire, enriquecida en longitudes de onda transmitidas a través del dosel. Esta distribución desigual en la luz que llega a las distintas partes de las plantas tiene consecuencias directas en la composición pigmentaria de las mismas. En el curso de un día a medida que cambia el ángulo de incidencia solar, las hojas que están siendo soleadas en un momento dado pueden dejar de estarlo momentos después y viceversa. En resumen se puede decir que a largo plazo la respuesta de una planta a la luz es la resultante de integrar las respuestas parciales de cada uno de sus elementos como hojas, ramas, etc. (Manrique, 2003).

La luz es un factor imprescindible para llevar a cabo una serie de procesos fisiológicos en las plantas, el más importante de todos es la fotosíntesis. Los pigmentos vegetales involucrados en este proceso son las antocianinas (azul, roja y púrpura en color) y los carotenoides (naranjas y amarillos en color) que absorben la luz entre 450-500 nm (azul y verde) pueden cambiar energía con la clorofila para ayudar en la fotosíntesis. Los fitocromos absorben la luz roja (660 nm) y la luz roja extrema (730 nm) y son responsables de fotomorfogénesis y las respuestas de fotoperiodismo. Las hojas absorben eficazmente la luz en las longitudes de onda de las regiones del azul (400–500 nm) y rojo (500–600 nm) del espectro de radiación solar visible. Los fitocromos, fotoreceptores de las plantas, tienen su máxima sensibilidad en las regiones del rojo (R) y rojo lejano (RL) del espectro. Baja relación R:RL causa una reducción en la proporción de fitocromos que están en forma activa y esta reducción estimula la elongación del tallo. Alta relación R:RL favorece la fotosíntesis y, por tanto, mayor producción de azúcares y materia seca, estimulando el crecimiento. De acuerdo con Tognoni (1999) las longitudes de onda que las plantas utilizan son llamadas de luz fotosintéticamente activa o PAR (400 a 700 nm, cerca de 45 a 50% de la radiación global).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400-700nm) se puede expresar en términos de energía ($W m^{-2}$) o de cuantos ($mol m^{-2}S^{-1}$). Cuando el PAR se expresa en unidades cuánticas, recibe el nombre especial de densidad de flujo fotónico fotosintético (PPFD). Sin embargo, se ha sugerido que el término *densidad* no es adecuado porque no es compatible con las unidades del Sistema Internacional de Unidades (unidades SI, donde SI se refiere al Sistema Internacional), ya que densidad puede referirse a áreas o volumen (Taiz, 2006).



La calidad de la luz varía ligeramente en la naturaleza, principalmente de acuerdo con la localización de la producción o invernadero. La calidad de luz tiene influencia en la tasa de fotosíntesis. A mayor altitud, las plantas están más expuestas a longitudes de las fracciones azul y ultravioleta del espectro de radiación. A nivel del mar, la luz es en parte filtrada y su calidad disminuida. Plantas que son cultivadas en una condición o influencia de mucha sombra reciben abundante luz de las fracciones azul y roja y tienen un crecimiento débil, creciendo más largas y delgadas, además de una tasa fotosintética más baja. Intensidades de luz muy altas pueden reducir el crecimiento por resultado de un estrés hídrico (Tognoni, 1999).

La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra se reduce por varios factores, entre ellos, la absorción de la radiación, en intervalos de longitud de onda específicos, por los gases de la atmósfera, dióxido de carbono, ozono, el vapor de agua, difusión atmosférica por partículas de polvo, moléculas y gotitas de agua, por reflexión de nubes y por inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de la radiación. México es un país con alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio resultando la zona norte una de las más soleadas del mundo (Tognoni, 1999).

2.8 Fotosíntesis

El término fotosíntesis significa literalmente “síntesis utilizando luz”, los organismos fotosintéticos utilizan la energía solar para la síntesis de compuestos orgánicos que no pueden formarse sin este aporte de energía. Más específicamente, la energía luminosa dirige la síntesis de carbohidratos a partir de dióxido de carbono y agua, generando oxígeno. La energía almacenada en estas moléculas puede ser aprovechada posteriormente en otros procesos celulares de la planta y como fuente de energía para todas las formas de vida (Taiz, *et al.*, 2006).

Todas las estructuras verdes de una planta, incluidos los tallos verdes y las frutas inmaduras, tienen cloroplasto, pero las hojas son los principales sitios de fotosíntesis en la mayoría de las plantas. Hay alrededor de medio millón de cloroplastos por milímetro



de superficie de una hoja. El color de la hoja proviene de la clorofila, el pigmento verde ubicado dentro de los cloroplastos. Es la energía lumínica absorbida por los cloroplastos la que impulsa la síntesis de moléculas orgánicas en el cloroplasto. Los cloroplastos se encuentran principalmente en las células del mésofilo, el tejido interior de la hoja. El dióxido de carbono entra en la hoja y el oxígeno sale, vía los poros microscópicos denominados estomas (del griego, que significa “boca”). El agua absorbida por las raíces es enviada hasta las hojas mediante los haces vasculares. Las hojas también utilizan los haces vasculares para exportar azúcar hasta las raíces y otras partes no fotosintéticas de la planta (Campell *et al.*, 2005).

2.8.1 Fototropismo

Un tropismo es una respuesta de crecimiento, que implica la curvatura de una parte de la planta, provocada por un estímulo externo que determina la dirección del movimiento, la parte de la planta se dirige hacia el estímulo o que se aleje de él. Si la respuesta trópica es hacia el estímulo se dice que es positiva; si es en sentido contrario es negativa. La respuesta de crecimiento, conocida actualmente como fototropismo, se produce por la elongación de las células del ápice que se encuentra en el lado que no recibe luz; elongación que se produce bajo la influencia de la fitohormona auxina. Se ha demostrado que la luz más eficaz en la inducción de la migración de esta hormona en el ápice del brote es la que está comprendida entre las longitudes de onda de 400 y 500 nanómetros. Esta observación indica que el efecto está mediado por el pigmento que absorbe la luz azul (Raven *et al.*, 1992).

2.8.2 Gravitropismo

El gravitropismo, o geotropismo, es una respuesta a la gravedad. Las plántulas manifiestan un gravitropismo muy notorio, si se tumba una plántula, sus raíces crecerán hacia abajo (gravitropismo positivo) y su brote crecerá hacia arriba (gravitropismo negativo). Este mecanismo se explicó originalmente por la redistribución asimétrica de la auxina en favor



del lado inferior mediante un transporte polar lateral de la molécula, desde el lado superior del órgano hacia el lado inferior. En estas condiciones, el lado inferior del vástago crecería hacia arriba. En la raíz, el lado superior se elongaría más que el lado inferior, y por lo tanto la raíz crecería hacia abajo. Cuando las dos partes de la planta están en posición vertical, las asimetrías laterales en la concentración de auxina desaparecería, y el crecimiento continuaría en dirección vertical. Recientemente se ha sugerido que el calcio juega un papel clave al vincular la gravipercepción y el gravitropismo en las raíces a través de su control sobre el transporte hormonal. (Raven *et al.*, 1992).

2.8.3 Fotoperiodismo

El fotoperiodismo es la influencia de la duración de los periodos de luz y oscuridad sobre el crecimiento, desarrollo y reproducción de las plantas. Dicho proceso controla la floración, el crecimiento vegetativo, los alargamientos de los entrenudos, la germinación de las semillas y la caída de las hojas. Según sea el tiempo, periodo y relación con la duración del día y de la noche, el proceso de floración varia en las diferentes plantas, por esto, se les clasifica en tres clases principales:

- ✎ Plantas de menos de 12 horas: requieren para florecer un fotoperiodo no mayor de cierto número de horas al día (días son más cortos que las noches): plantas microhemeras. Ejemplos: especies de regiones tropicales o subtropicales como el arroz (*Oryza sativa*) de la familia Poaceae, el tabaco (*Nicotiana tabacum*) de la familia Solanaceae y el sorgo (*Sorghum bicolor*) de la familia Poaceae.
- ✎ Plantas más de 12 horas: requieren un fotoperiodo mayor que cierto número de horas (días más largos que las noches): plantas macrohemeras. Ejemplos: plantas de riego templado como el trigo (*Triticum sativum*) de la familia Poaceae y la avena (*Avena sativa*) también de la familia Poaceae.
- ✎ Plantas de día neutro: florecen tras un cierto periodo de crecimiento vegetativo independientemente del fotoperiodo (sitios con variaciones fotoperiodicas mínimas). Ejemplos: plantas de regiones tropicales como el moriseco (*Bidens*



pilosa) de la familia *Asteraceae* y el tomate (*Lycopersicon esculentum*) de la familia *Solanaceae*.

La fotoperiodicidad que controla el proceso de floración está relacionada con la participación de un pigmento proteico: el fitocromo. El fitocromo tiene la capacidad de captar luz roja e infrarroja. El fitocromo se encuentra en las hojas (Vargas, 2011).

2.9 Características generales de las especies cultivadas

2.9.1 *Lactuca sativa* L.

El origen de la lechuga no parece estar muy claro, algunos autores afirman que procede de la India, aunque hoy día los botánicos no se ponen de acuerdo, por existir un seguro antecesor de la lechuga, *Lactuca cariola* L., que se encuentra en estado silvestre en la mayor parte de las zonas templadas. Mallar (1978), menciona que las variedades cultivadas actualmente, son una hibridación entre especies distintas. El cultivo de lechuga se remonta a 2500 años de antigüedad, siendo conocida por griegos y romanos. Las primeras lechugas de las que se tiene referencia son las de hoja suelta, aunque las acogolladas ya eran conocidas en Europa en el siglo XVI.

Lactuca sativa L. es una planta anual y autógama, perteneciente a la familia *Asteraceae*. La raíz, que no llega nunca a sobrepasar los 25 cm. de profundidad, es pivotante, corta y con ramificaciones. 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 los limbos pueden ser lisos, ondulados o aserrados. El tallo es cilíndrico y ramificado. La inflorescencia son capítulos florales amarillos dispuestos en racimos o corimbos. Las semillas están provistas de un vilano plumoso (Giaconi, 2004).

El sistema radical de las plantas adultas es moderadamente extenso, las raíces pivotantes penetran hasta profundidades de 1.20 a 1.50 m. Las ramificaciones primarias se extienden lateralmente a una distancia de 15 a 20 cm y luego se dirigen hacia abajo. Las ramificaciones secundarias son más numerosas. Frecuentemente, llenan la capa



superior del suelo. Existe una relación directa entre la densidad del sistema radical y la capacidad del suelo. En suelos compactos el sistema radicular es más denso y más superficial que en suelos sueltos (Cuadro 5). La inflorescencia es una panícula. Las flores individuales son perfectas, con 5 estambres y un ovario de una sola cavidad. Comúnmente son autopolinizadas. Los frutos llamados semillas, son muy pequeños; cada uno contiene un solo embrión y se siembra superficialmente. Se ha demostrado que para una rápida germinación es necesario que haya abundancia de oxígeno y una temperatura promedio de 23°C.

El principal factor ambiental en el cultivo de la lechuga es la temperatura. Para el desarrollo de cabezas firmes y sólidas son necesarias temperaturas nocturnas uniformemente frescas, de 7.2 a 10°C, combinadas con temperaturas, en días soleados, uniformemente frescas, de 12.8 a 26.7°C (Cuadro 5). Las temperaturas nocturnas elevadas, particularmente durante la etapa de formación de las cabezas, parece ser el principal factor ambiental responsable de la falta de firmeza (Giacconi, 2004). Los suelos preferidos por la lechuga son los ligeros, arenoso-limosos, con buen drenaje, situando el pH óptimo entre 6.7 y 7.4 (Cuadro 5). 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.

Las plagas que comúnmente ataca a la lechuga son variadas, entre ellas encontramos Trips o la mosca blanca (Cuadro 3). Y para controlarlas se aplican bioplaguicidas como infusión de manzanilla, infusión de manzanilla y ajo, cebolla y ajo, entre otros.

Cuadro 3. Plagas presentes en lechuga (Giaconi, 2004)

Nombre común	Nombre científico
Pulgón de la papa	<i>Macrosiphum solanifolii</i>
Pulgón Verde	<i>Myzus persicae</i>
Mosca minadora	<i>Lirio myzahuidobrensis</i>
Pulgones	<i>Myzus persicae</i>

Las variedades de lechuga bajo estudio son:

Great Lakes: es un grupo o subtipo. Forma una cabeza grande; es resistente al tizón pardo y a la necrosis marginal. Está representada por muchas líneas que se identifican por número y difieren entre sí por características como tamaño, uniformidad y tiempo necesario de cosecha. Un defecto de *Great Lakes* es que sus peciolos y “codos” son demasiado grandes. El codo es la curvatura pronunciada hacia afuera de la nervadura central de la hoja.

Parris Island Cos: similar a *Dark Green Coss* (tamaño mediano, hojas color verde oscuro), excepto que las hojas son de color verde gris y tienen tolerancia al mosaico, por lo que sustituye a las anteriores ventajas; unos días más tardía que *Dark Green*, pero se prefiere en muchos lugares (Casseres, 1980).

2.9.2 *Beta vulgaris* var. *Ford hook* y *Beta vulgaris* var. *Bresanne*

La acelga es una remolacha que se cultiva por sus peciolos y hojas suculentas. Durante el primer año las plantas forman una raíz principal carnosa, un tallo corto y un gran número de hojas simples y bien desarrolladas. Durante el segundo año forman los tallos florales que sostienen el fruto y las semillas. Las hojas exteriores maduran primero. A

medida que se cortan se forman nuevas hojas. En esta forma la planta está en producción durante una temporada de crecimiento relativamente larga (Vavilov, 1992).

Los primeros informes que se tienen de esta hortaliza la ubican en la región del Mediterráneo y en las Islas Canarias. Aristóteles hace mención de la acelga en el siglo IV a.C. La acelga ha sido considerada como alimento básico de la nutrición humana durante mucho tiempo, es una planta bianual y de ciclo largo que no forma raíz o fruto comestible. El sistema radical de la acelga es de una raíz bastante profunda y fibrosa. Las hojas constituyen la parte comestible y son grandes de forma oval tirando hacia acorazonada; tiene un pecíolo o penca ancha y larga, que se prolonga en el limbo; el color varía, según variedades, entre verde oscuro fuerte y verde claro. Los pecíolos pueden ser de color crema o blancos (Vavilov, 1992).

Para que se presente la floración necesita pasar por un período de temperaturas bajas. El vástago floral alcanza una altura promedio de 1.20 m. La inflorescencia está compuesta por una larga panícula. Las flores son sésiles y hermafroditas pudiendo aparecer solas o en grupos de dos o tres. El cáliz es de color verdoso y está compuesto por 5 sépalos y 5 pétalos.

La acelga es una planta de clima templado, que vegeta bien con temperaturas medias; le perjudica bastante los cambios bruscos de temperatura. Las variaciones bruscas de temperatura, cuando las bajas siguen a las elevadas, pueden hacer que se inicie el segundo periodo de desarrollo, subiéndose a flor la planta. La planta se huela cuando las temperaturas son menores de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y detiene su desarrollo cuando las temperaturas bajan de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. En el desarrollo vegetativo las temperaturas están comprendidas entre un mínimo de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un máximo de 27 a 33°C , con un medio óptimo entre 15 y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Cuadro 5). Las temperaturas de germinación están entre $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ de mínima y 30 a $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ de máxima, con un óptimo entre 18 y $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

No requiere luz excesiva, perjudicándole cuando ésta es elevada, si va acompañada de un aumento de la temperatura. La humedad relativa está comprendida entre 60 y 90% en cultivos de invernadero (Cuadro 5). En algunas regiones tropicales y subtropicales se desarrolla bien, siempre y cuando esté en zonas altas y puede comportarse como perenne debido a la ausencia de invierno marcado en estas regiones (Vavilov, 1992).



La acelga no ha merecido gran atención de los genetistas; existen pocas variedades bien definidas. Las hay de verano y de invierno; de hojas lisas y de hojas crespas; blancas y verdes.

✎ Acelgas blancas: Se denominan así por tener peciolo de color blanco y se agrupan en el tipo “penca blanca”. Lyon blonde: Hojas color verde claro, lisas, tallos blancos, muy anchos y carnosos. Cultivo de verano (Giaconi, 2004).

✎ Acelgas verdes: Su denominación deriva del color verdoso de sus tallos. *Lucullus*: planta erecta; hojas levemente crespas de color verde muy claro; peciolo verdoso, de poco diámetro. *Verde corriente*; No corresponde a un tipo bien definido, mostrando plantas con tallos verdosos y plantas con tallos blancos; tampoco exhibe uniformidad en sus hojas, las hay crespadas y semilisas, resiste bien a los rigores del invierno (Giaconi, 2004).

Las variedades de acelga bajo estudio son:

✎ *Ford hook*: Planta alta, vigorosa; hojas anchas, encrespadas, de color verde oscuro. Peciolo blanco, muy anchos y gruesos. Tolera bajas temperaturas.

✎ *Bresanne*: Hojas grandes, ovaladas, lisas, de color verde claro. Peciolo blanco, muy gruesos y carnosos (Giaconi, 2004).

Las plagas que atacan a la acelga se presentan en el Cuadro 4, estas generalmente se combaten con biopreparados, tales como; infusión de manzanilla, ajo, cebolla o chile piquín (Giaconi, 2004).



Cuadro 4. Plagas de la Acelga. (Giaconi, 2004)

Nombre común	Género o especie
Gusano blanco	<i>Melolontha</i>
Mosca Minadora	<i>Lirio myzahuidobrensis</i>
Caracol café europeo	<i>Helix aspera</i>
Gusano de alambre	<i>Agrotis bilitura</i>
Gusano gris	<i>Agrotis lutescens</i>

Cuadro 5. Características de las especies estudiadas.

Especie	Lechuga	Acelga
Nombre común		
Nombre científico	<i>Lactuca sativa L.</i>	<i>Beta vulgaris var. cicla</i>
Ciclo de vida	Anual y Bianual	Bianual
Familia	<i>Asteraceae</i>	<i>Chenopodiaceae</i>
Origen	Asia	Mediterráneo
Temperatura °C	16 – 22	14 – 18
Humedad relativa (%)	60 al 80	60 al 90
Clase textural del suelo	arenoso-limosos	arcilloso
pH del suelo	6.0 – 6.8	6.0 – 6.7
Luz	7.000 a 9.000 mw/m ²	7.000 a 9.000 mw/m ²
Cosecha (días)	90 - 100	60

IV. Justificación

Actualmente la hidroponía ofrece una alternativa viable para producir hortalizas. El sistema de mangas verticales, representa un sistema de producción para espacios reducidos, sin embargo considerando que las mangas tienen una forma geométrica en forma de cilindro, donde no todas las plantas tienen acceso a la misma cantidad de luz, es necesario evaluar los tamaños y la biomasa de los individuos para determinar la rentabilidad comercial del sistema así como la viabilidad para el autoconsumo.

Por lo que en este trabajo se plantearon las siguientes preguntas:

¿El tipo de sustrato utilizado en las mangas verticales, determina el desarrollo y el rendimiento de los cultivos de acelga y lechuga?

¿La heterogeneidad de la luz que incide sobre las mangas verticales, es un factor limitante para el desarrollo de los cultivos?

¿La heterogeneidad de la luz que incide sobre las mangas verticales afecta el contenido de clorofila en las plantas de acelga y lechuga?

¿La producción de hortalizas en un sistema de mangas verticales, es rentable y permite la comercialización o solo el autoconsumo?



IV. Objetivos

4.1 Objetivo general

Comparar y evaluar el rendimiento de *Lactuca sativa L.* (var. *Parris island cos* y var. *Great lakes-407*) y *Beta vulgaris* (var. *Ford hook* y var. *Bresanne*) bajo dos sustratos y orientaciones diferentes en un sistema de cultivo hidropónico de mangas verticales, y evaluar su viabilidad como alternativa para diseñar huertos en espacios reducidos.

4.2 Objetivos específicos

- ✎ Evaluar el efecto de dos sustratos inertes (tezontle y agrolita) en el cultivo hidropónico de acelga y lechuga.
- ✎ Conocer el efecto de la energía lumínica proveniente de cuatro puntos cardinales diferentes sobre el crecimiento de los cultivos de acelga y lechuga.
- ✎ Evaluar la producción de clorofila en función a los cuatro puntos cardinales como una medida indirecta de la tasa fotosintética.
- ✎ Cuantificar el rendimiento de las dos variedades de lechuga y de acelga en el sistema de mangas.
- ✎ Cuantificar la relación costo/beneficio para las dos variedades de cada especie.

4.3 Hipótesis

El cultivo de dos variedades de acelga y dos variedades de lechuga en el sistema de mangas verticales presentará los mejores rendimientos en el sustrato tezontle, como una respuesta a su capacidad para retener humedad y mantener una mejor aereación, así mismo la orientación más próxima al norte por ser la de mayor incidencia lumínica, presentará los mejores rendimientos.



V. Metodología

En el diagrama de la Figura 1 se presenta un esquema general de los pasos utilizados en la presente investigación y en los apartados siguientes se describen con mayor detalle éstos mismos.

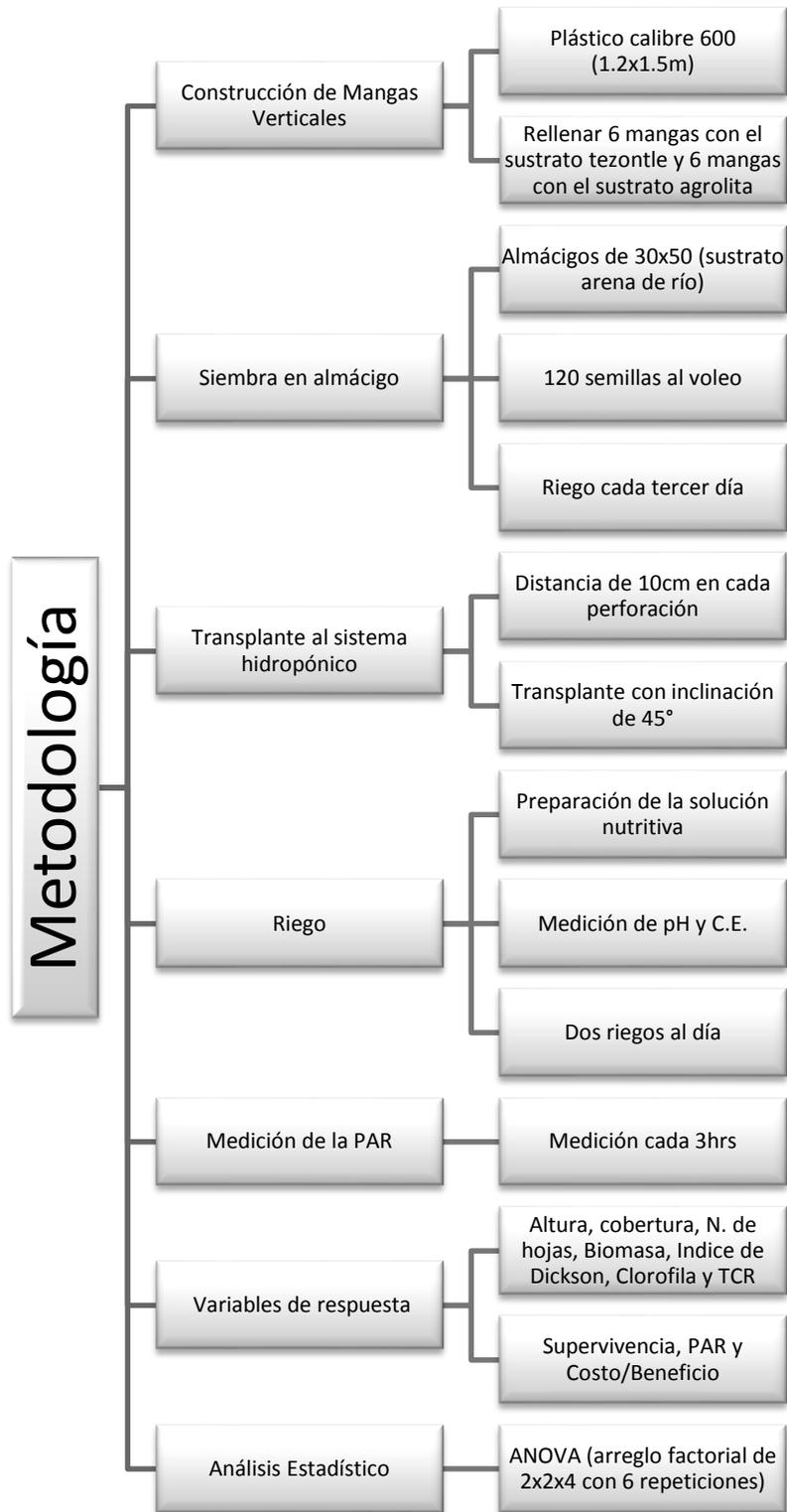


Figura 1. Diagrama de la metodología aplicada.

5.1 Construcción de mangas verticales

Para cada manga vertical se utilizó plástico negro de calibre 600, de 1.8 m de longitud por 1.2 m de ancho. Para formar la manga, el pedazo de plástico se cerró por uno de los extremos y posteriormente se rellenoó con el sustrato respectivo (agrolita o tezontle) y se procedió a cerrar la manga por el otro extremo. Una vez conformada la manga se realizaron incisiones triangulares sobre sus cuatro caras y, utilizando un patrón triangular (tres bolillos), se realizó el transplante de las dos variedades de lechuga y acelga.

Los sustratos que se utilizaron fueron agrolita de la casa comercial Hydroenvironment® México y tezontle, de tamaño de partícula entre 5-10 mm, ambos agregados de forma separada, los cuales fueron humedecidos un día anterior, estos fueron comprimidos dentro de las mangas, para mantenerlas firmes y el riego se aplicó por medio de mangueras.

El diseño experimental consistió en seis mangas por sustrato y en cada manga se cultivaron cuatro individuos de cada especie y variedad. Teniendo un total de 24 plantas por manga (Cuadro 6).

Cuadro 6. Diseño experimental

Especies	Número de repeticiones	Número de individuos /manga (agrolita)	Número de individuos /manga (Tezontle)
Acelga lisa	6	4	4
Acelga rugosa	6	4	4
Lechuga orejona	6	4	4
Lechuga iceberg	6	4	4

5.2 Siembra en almácigo

La siembra de las dos especies, se realizó en un almácigo de 50 x 30 cm, con una profundidad de 10 cm, en el cual se colocó arena de río como sustrato. La siembra se realizó al voleo, sobre el sustrato húmedo, las semillas se cubrieron con una capa de sustrato de 1.5 a 2.5 mm.

Una vez que las plántulas emergieron, se les mantuvo a media sombra para favorecer la supervivencia. Se aplicaron riegos cada tercer día para mantener el sustrato húmedo.

5.3 Trasplante

Previo al trasplante, el almácigo no se regó un día anterior, con el fin de que el sustrato (agrolita) estuviera seco y así facilitara la extracción de la raíz, sin causar daño a la misma. Después de eso, la raíz se humedeció en solución nutritiva, se evitó el contacto con la luz solar, posteriormente se trasplantaron las plántulas a las mangas verticales, haciendo un orificio en el sustrato, lo suficientemente profundo, para que la raíz entrara fácilmente y no sufriera daños.

El trasplante se realizó cuando las plántulas alcanzaron una altura de 5 a 8 cm o presentaron 4 hojas y se realizó durante la mañana, para que las raíces no sufrieran estrés hídrico, después de realizar el trasplante, las mangas se cubrieron con un sombreadero (50% de luz) para proteger a las plántulas de la radiación solar directa, durante las dos primeras semanas después del trasplante.

5.4 Trasplante de plántulas a las mangas verticales

Previo a la siembra se regaron las mangas durante tres días con solución nutritiva Hydroenvironment® México. El percolado de la solución se drenó por la parte inferior de las mangas, el cual fue recirculado cada vez que se aplicó el riego. En este percolado semanalmente se midió el pH y la C.E, manteniéndolo en el intervalo recomendado para evitar deficiencias nutrimentales (6.5 a 6.6 de pH y 1.5 a 3 $\mu\text{S}/\text{m}^{-2}$, respectivamente).

Para el control del pH, cuando fue inferior a 6.5 se agregó cal, y cuando fue mayor a 6.6 se agregó vinagre. Con la C.E. si el intervalo fue inferior a $1.5 \mu\text{S}/\text{m}^2$ se adicionó más solución nutritiva, y cuando fue mayor a $3 \mu\text{S}/\text{m}^2$ (excedente la solución nutritiva), se adicionó más agua.

Con las mangas colgadas en el soporte del sistema, se marcaron los lugares a perforar, en cada uno de ellos se realizó el trasplante, de acuerdo a la distancia sugerida para el cultivo (10 cm entre planta). Las perforaciones se hicieron en un patrón tres bolillo para así evitar el traslape de raíces, los orificios donde se colocaron las plántulas tuvieron un ángulo de inclinación de 45° , con el fin de que quedaran bien acomodadas las raíces hacia abajo.

5.5 Riego

Diariamente se administraron riegos con la solución nutritiva Hydroenvironment®, la cual se preparó de acuerdo a las recomendaciones del proveedor, se utilizó una dosis de 30g en 20L de agua desde el momento del trasplante hasta la cosecha.

La solución nutritiva se aplicó mediante un sistema de riego por goteo, con un sistema de mangueras colocadas en cada una de las mangas, se regaron mediante una bomba de agua, y se aplicó el riego dos veces al día, uno en la mañana y otro en la tarde.

5.6 Medición de la Radiación fotosintéticamente Activa

Para evaluar el efecto de la luz sobre las mangas verticales, se midió la Radiación fotosintéticamente Activa (PAR) con un Ceptómetro Accupar LP80. La lectura se realizó en las plántulas situadas en la parte media de cada manga y en cada punto cardinal (NE, NW, SE y SW). Esto se hizo cada mes a las 9:00, 12:00 y 15:00 h, durante todo el periodo de cultivo (3 meses).

5.7 Variables de respuesta

Se midieron cuatro plantas en cada orientación cardinal (NE, SE, NW, SW) quincenalmente y se midieron las siguientes variables:

Altura: Se tomó desde la parte basal hasta la altura máxima de las hojas.

Cobertura: Se midió cada planta en forma de cruz, para tomar su diámetro total.

$$C = \left(\frac{D1 + D2}{4} \right)^2 \pi$$

Donde D1: diámetro 1 y D2: diámetro 2

Tasa de Crecimiento Relativo: Se calculó de acuerdo a (Hunt *et al.*, 2002):

$$TCR = \frac{\ln(P2) - \ln(P1)}{t2 - t1}$$

Donde P1: altura inicial, P2: altura final, t1: tiempo inicial y t2: tiempo final (en días)

Clorofila: En las 192 plantas de la muestra, se evaluó el contenido de clorofila, realizando las lecturas en las plantas localizadas en la parte superior, intermedia e inferior de cada manga, con el clorofilómetro *Field Scout Chlorophyllometer CM 1000*.

Biomasa peso seco: Se midió el peso de la raíz y de la parte aérea después de secarse en una estufa a 70°C durante 24 horas (Birchler, 1998).

Índice de Dickson: Es una medida integral del vigor de la planta. Se tomaron datos del peso seco de la raíz y parte aérea, la altura y el diámetro, de las plantas de los tratamientos. Este índice se calculó de la siguiente manera:

Índice de calidad de Dickson (QI) (Dickson *et al.*, 1960):

$$QI = \frac{\text{peso seco total (g)}}{\frac{\text{altura tallo (cm)}}{\text{diámetro tallo (mm)}} + \frac{\text{peso seco tallo (g)}}{\text{Peso seco raíces (g)}}}$$

Supervivencia: Se obtuvo mediante conteo semanal de las plantas vivas.



Estudio de factibilidad del proyecto

Se realizó una evaluación de los costos y los beneficios, así como la tasa de depreciación y finalmente el índice costo/beneficio para el modelo de mangas verticales (Ramírez, 2004).

Análisis Estadístico

Las variables de respuesta para cada especie, se analizaron de manera independiente. Para cada una de ellas se aplicó un ANOVA con arreglo factorial de 2x2x4, con 6 repeticiones (Escalante, 2008).

Las medias se compararon por Tukey ($p \leq 0.05$) con el paquete estadístico NCSS (ver. 07.1.20) & Infostat (ver. 2012).



VI. Resultados y Discusión

Como parte de los resultados obtenidos en el presente trabajo, en ambas especies la variable contenido de clorofila, no presentó diferencias estadísticas significativas ($p \geq 0.05$), en relación a ninguno de los tratamientos (sustrato, variedad y orientación). En el caso de la lechuga, las variables que no tuvieron diferencias estadísticas ($p \geq 0.05$) fueron número de hojas y TCR. Mientras que para la acelga las variables sin diferencias significativas ($p \geq 0.05$) fueron la cobertura y biomasa.

Por lo tanto solo se analizaron las variables que presentaron diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) para las dos especies y dos variedades en cada tratamiento.

6.1 Efecto del sustrato, variedad y orientación para la lechuga.

De las variables de respuesta, la altura presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para los factores sustrato, variedad y orientación (Figura 2). Del sustrato, el tezontle tuvo mejores resultados en cuanto a este parámetro.

La mayor altura en la lechuga con tezontle se atribuye a factores como la granulometría, utilizada en este trabajo (5-10mm). Vargas *et al.*, (2008) menciona que la granulometría del sustrato determina el tamaño y distribución de los poros y en consecuencia la proporción agua-aire, régimen de riego y desarrollo de las plantas; por lo que el análisis granulométrico se ha considerado como una práctica importante en la caracterización de los sustratos. El mismo autor cita que el tamaño de granulometría óptima en tezontle para favorecer la porosidad, capacidad de aireación y agua total disponible, es en promedio una granulometría de 6.5-8.5mm. En el caso del tamaño de granulometría de tezontle utilizado en este trabajo, se utilizó un tamaño medio de partícula de 7.5mm, lo cual está en el intervalo reportado por Vargas *et al.* (2008).

Por otro lado Ojodeagua *et al.*, (2008) mencionan que el tezontle con tamaño de partícula entre 0.5 y 10mm, permite una capacidad de retención de agua de 35%, la cual es intermedia a un tezontle con diferente tamaño de partícula.

En relación a la agrolita, este es un sustrato que también permite una alta capacidad de retención de agua (70%), sin embargo, esto puede reducir significativamente el porcentaje de aireación y en su momento afectar el crecimiento vegetal (Urbina *et al.*, 2011). Posiblemente esto sucedió con los resultados obtenidos en este trabajo, presentándose plantas con menor altura en agrolita.

De acuerdo con varios autores (Burés, 1997; Abad *et al.*, 2004; Blok *et al.*, 2008), la mayoría de los sustratos utilizados en hidroponía (fibra de coco, cascarilla de arroz, lana de roca y aserrín), presentan desventajas como: 1) pérdida de volumen y disminución de porosidad debido a la compactación del sustrato, 2) disminución de capacidad de aireación y aumento de retención de humedad, y 3) alteración del tamaño de partículas. Además, en el proceso del cultivo se presenta la compresibilidad del sustrato por acción de fuerzas mecánicas durante la manipulación, compactación durante el transporte o contracción del sustrato cuando se presenta variación en el contenido de humedad (humedecimiento y secado), y segregación de partículas finas al fondo del contenedor durante el riego, lo que hace que se pierda la forma y acomodo original del sustrato y se presente alteración en las relaciones agua/aire del mismo (Lemaire, 1995; Abad *et al.*, 2005). En este trabajo, la agrolita presentó características similares a lo descrito anteriormente, por ejemplo, sus partículas se compactan, reduciendo las relaciones de agua/aire.

Handreck (1983) consigna que un sustrato de corteza de pino y arena, con un tamaño de partícula de 0.25 a 0.5 mm de diámetro modificó la capacidad de aireación y agua total disponible. Noguera *et al.*, (2003) reportaron que el tamaño de partícula de 0.5 mm del polvo de coco modifican significativamente la relación agua-aire. Por su parte, Prasad y NiChualáin (2004) también establecen que sustratos preparados con turba y mezclas de turba, polvo de coco, corteza, composta de desecho de plantas y piedra pómez, con diferentes proporciones de partículas (menores a 1 mm de diámetro), afectan la retención de humedad. Concluyen que a medida que el porcentaje de partículas menores a 1 mm aumenta, la capacidad de aireación disminuye. En este trabajo el

sustrato tezontle, con una moderada retención de humedad favoreció la translocación de agua y de minerales a los puntos de crecimiento de las plantas, generando individuos con mayores alturas, lo cual se vió reflejado en las dos variedades de lechuga, presentando los mejores resultados la variedad orejona (Figura 2).

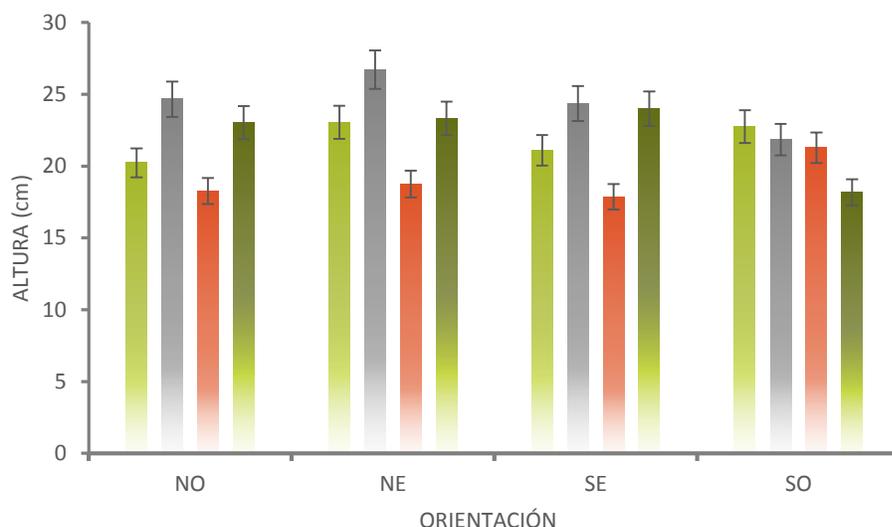


Figura 2. Altura para las plantas de lechuga orejona en agrolita y tezontle bajo cuatro orientaciones de luz (■ Lechuga Orejona – Sustrato Agrolita, ■ Lechuga orejona – Sustrato tezontle, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato agrolita, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato tezontle).

Las diferencias entre las variedades se atribuyen a las características fenotípicas y genéticas entre ellas. Por ejemplo la lechuga Iceberg presenta un crecimiento arrosetado, mientras que la lechuga orejona presenta un crecimiento vertical, lo cual determina las diferencias en cobertura.

En relación a la orientación de la luz, las dos variedades de lechugas, presentaron mayor altura en el NE, con una longitud de onda promedio de $420.8 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, y la orientación que presentó la menor altura fue SE con una longitud de $306.02 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{mg}$, lo cual representa para el lado NE un incremento del 27% de luz. Esto debido a que la radiación solar es mayor en la orientación sur (Coombs, 1988) (Figura 3).

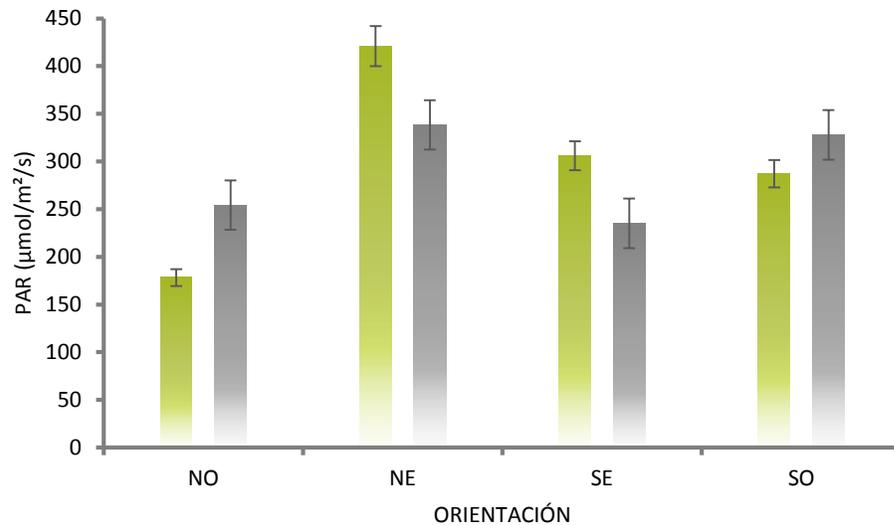


Figura 3. PAR por orientación de incidencia de luz (■ Agrolita, ■ Tezontle).

Con relación a la cobertura de las plantas de lechuga, éstas presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en los factores variedad, sustrato y orientación, resultando el tezontle el de mejor resultados, con un incremento del 63.59% (Figura 4).

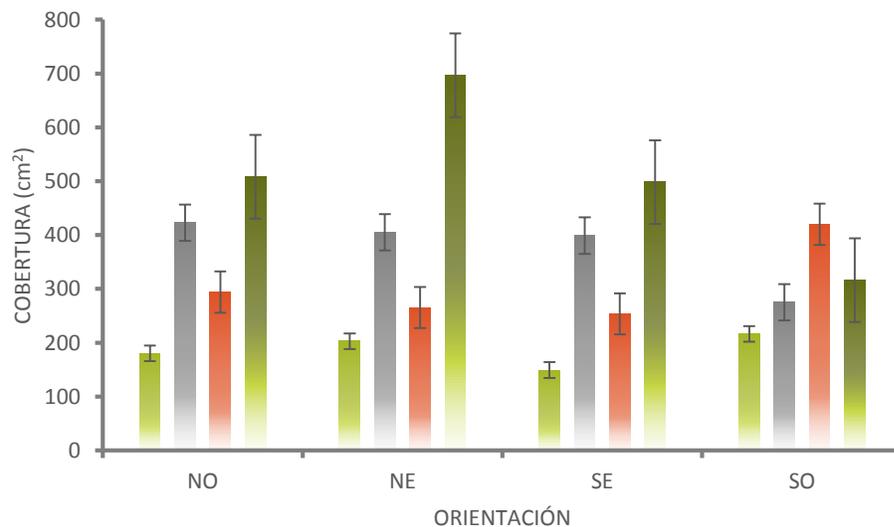


Figura 4. Cobertura para las variedades de lechuga en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Lechuga Orejona – Sustrato Agrolita, ■ Lechuga orejona – Sustrato tezontle, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato agrolita, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato tezontle).

Como se comentó anteriormente, el sustrato tezontle presenta los mejores resultados, en cuanto a granulometría, y por lo tanto porosidad y retención de humedad. Es importante mencionar que el agua que retiene el sustrato contiene sales minerales (solución hidropónica) necesarias para el crecimiento vegetal. Dentro de las sales más

importantes para el desarrollo foliar, están el nitrógeno y potasio. El nitrógeno, además de incrementar el desarrollo foliar también contribuye para la formación de protoplasma, el cual es necesario para la formación de las paredes celulares (Russel, 1968).

El potasio por su lado, incrementa la eficiencia de la hoja para elaborar azúcares y almidón, por lo que la acción del potasio complementa a la del nitrógeno, el cual, aumenta el tamaño de la hoja, mientras el potasio aumenta su eficiencia para elaborar sustancias benéficas para el desarrollo de las hojas (Tamhane, 1979).

La biomasa en general para todas las orientaciones de luz presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para el factor sustrato (Figura 5 y Figura 6), resultando el tezontle, para la orientaciones NE, el que presentó plantas con una mayor biomasa, la cual resultó de un 48-64% más alta que en relación a las plantas que crecieron en las otras exposiciones solares (Figura 5).

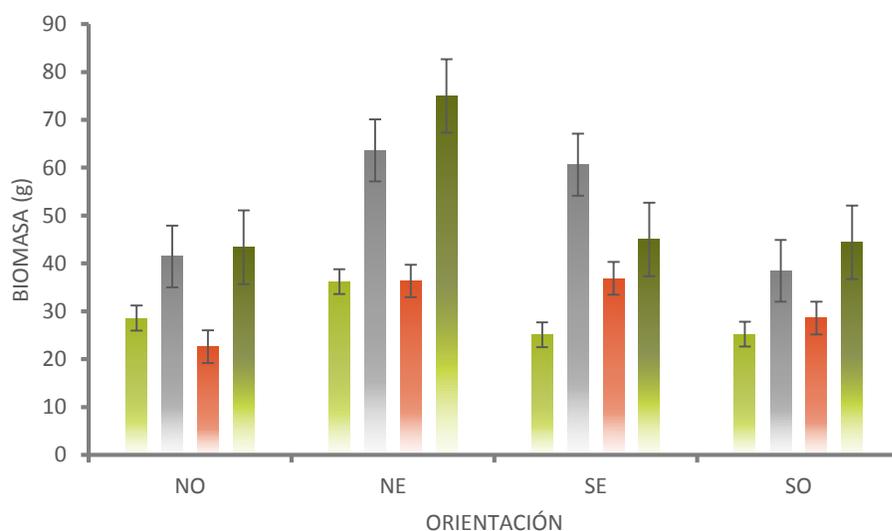


Figura 5. Biomasa para las variedades de lechuga en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Lechuga Orejona – Sustrato Agrolita, ■ Lechuga orejona – Sustrato tezontle, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato agrolita, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato tezontle).

El éxito de los cultivos hidropónicos requiere entre otros aspectos el estudio, acondicionamiento y evaluación de las propiedades físicas y químicas de aquellos materiales factibles de ser usados como sustrato, así como de la evaluación del comportamiento de las plantas en el sustrato (Luque, 1981 y Terés *et al.*, 1995). En ese sentido Maloupa *et al.*, (1992) indicaron que el tamaño y distribución de las partículas

alteran las propiedades físicas del sustrato, las que a su vez modifican las relaciones agua-aire y por lo tanto el crecimiento de la planta.

De esta forma Vargas *et al.*, (2008) relaciona que las fracciones granulométricas del tezontle influyen en forma significativa sobre las características de densidad aparente, densidad real, capacidad de aireación y capacidad de retención de humedad. Los valores de densidad aparente y real aumentan a medida que disminuye el tamaño de partícula. Cuando el diámetro de partícula se reduce por debajo de 0.50 mm la capacidad de aireación se reduce significativamente y por lo tanto el tamaño y la biomasa de las plantas.

En relación al índice de Dickson (ID) los valores más altos representan plantas de mejor calidad, ya que, este índice relaciona la altura con la cobertura y biomasa (Reyes *et al.*, 2005), estas variables presentaron los mejores valores para el sustrato tezontle, debido a las características ya citadas en párrafos anteriores (Figura 6).

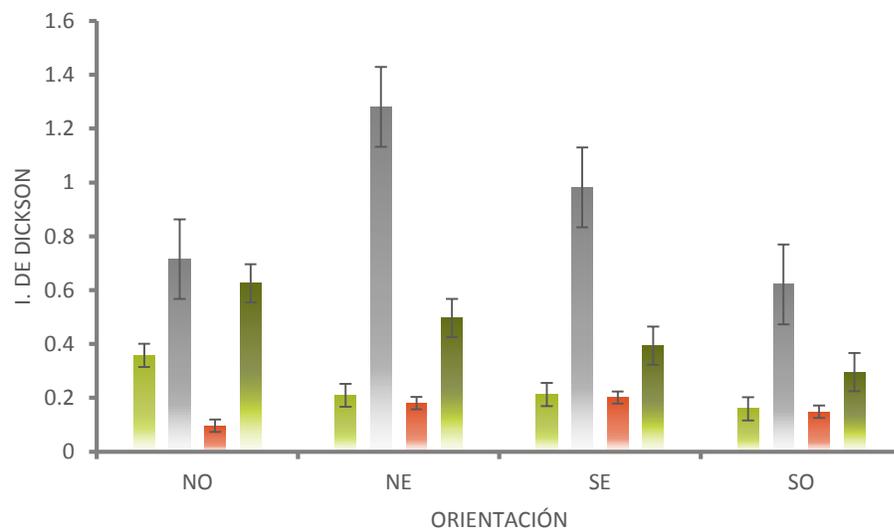


Figura 6. Índice de Dickson para las variedades de lechuga en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Lechuga Orejona – Sustrato Agrolita, ■ Lechuga orejona – Sustrato tezontle, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato Agrolita, ■ Lechuga Iceberg – Sustrato tezontle).

6.2 Análisis de los tratamientos sustrato, variedad y orientación para la acelga

La altura presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en relación al sustrato, resultando al igual que en la lechuga el tezontle el de mejor resultados (Figura 7). Para los factores variedad y orientación de luz, no hubo diferencias significativas.

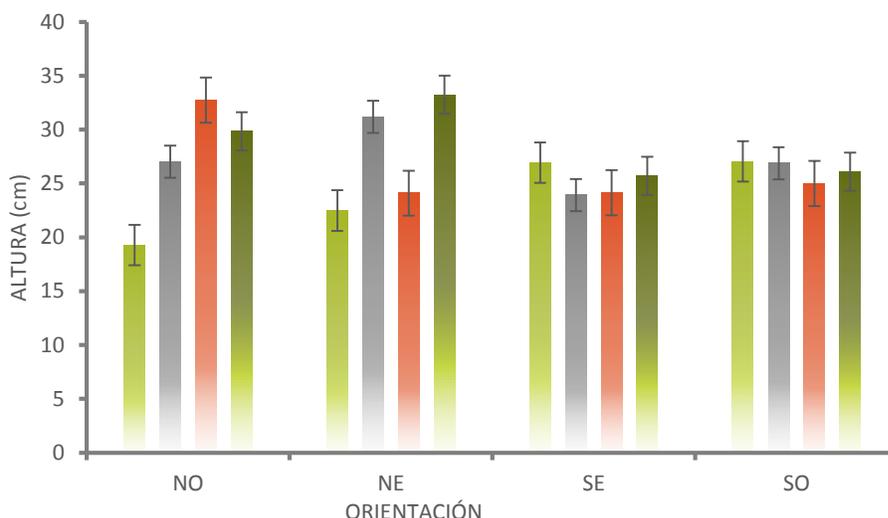


Figura 7. Altura para las plantas de acelga rugosa y lisa en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Acelga rugosa – Sustrato Agrolita, ■ Acelga rugosa – Sustrato tezontle, ■ Acelga lisa – Sustrato agrolita, ■ Acelga lisa – Sustrato tezontle).

Es importante mencionar, que en general, la calidad de las plantas ornamentales y hortalizas depende principalmente del sustrato que se utilice para su cultivo, y un sustrato ideal es aquel que permite una adecuada penetración de las raíces y que retenga agua y aire en cantidades suficientes para un óptimo desarrollo. Además, debe tener una influencia directa sobre el suministro de nutrimentos necesarios para las especies que se desarrollen en él (Bunt, 1988). Es importante utilizar sustratos que sean capaces de mantener una gran cantidad de raíces en un reducido espacio con suficiente agua y aire disponible, combinados con un programa integral de manejo y fertilización, que permitan un adecuado crecimiento de las plantas (Cabrera, 1995). Cabrera (1997) menciona que para obtener plantas de alta calidad es necesario comprender el micro-ambiente que se genera en el contenedor y cómo éste es afectado por las propiedades físicas y químicas de los sustratos utilizados. De acuerdo a Cabrera (1999), la porosidad del sustrato es la

característica física más importante para el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y el valor óptimo de ésta debe ser mayor a 70%.

El tezontle es un material considerado inerte, con valores de pH cercanos a la neutralidad, baja Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC), buena aireación, y con capacidad de retención de humedad que es dependiente del diámetro de la partícula; adicionalmente no contiene sustancias tóxicas y tiene estabilidad física (Bastida, 1999).

Vargas *et al.*, (2008) reportan que las densidades aparente y real en tezontle aumentaron conforme disminuyó el tamaño de la partícula; mientras que el espacio poroso total se incrementó con el aumento en el tamaño de partícula.

En lo que a propiedades químicas respecta, Cruz *et al.*, (2012) reportaron valores de pH, Conductividad Eléctrica (CE) y CIC para tezontle de 7.1, 0.08 dSm⁻¹ y 2.7 cmol kg⁻¹, respectivamente.

A diferencia de las propiedades físicas, las propiedades químicas pueden ser modificadas durante el ciclo productivo. El pH, la conductividad eléctrica (CE), la capacidad de amortiguamiento y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), concentración de nutrimentos disponibles así como de metales pesados y elementos tóxicos son las propiedades químicas más importantes de un sustrato. Ansorena (1994) indica como intervalos óptimos los valores de pH y CE de 5.2 a 6.3 y de 0.75 a 3.49 dSm⁻¹ respectivamente (Cabrera, 1999).

Al mantener un pH de 6.5 a 6.8, haciendo que la solución nutritiva sea acida, para su fácil adquisición por parte de la raíz, adquiriendo fácilmente micro y macronutrientes necesarios para el crecimiento vegetativo. Así como la CE, manteniendo un intervalo no mayor a 3 dSm⁻¹, haciendo que se disuelvan las sales de la solución nutritiva en el agua.

El número de hojas, presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el factor sustrato, presentando los mejores resultados también en el sustrato tezontle (Figura 8). Para los factores variedad y orientación de luz, no existieron diferencias significativas.

Las propiedades físicas de los sustratos son consideradas de mayor importancia que las químicas; esto es, si la estructura física del sustrato es inadecuada, difícilmente podrá mejorarse una vez que se ha establecido el cultivo (Ansorena, 1994; Cabrera,

1999; Pastor, 1999). Las propiedades físicas más importantes son aquellas relacionadas con los poros; es decir, la granulometría, la porosidad y el reparto de las fases sólida y gaseosa (Peñuelas y Ocaño, 2000). Cabrera (1999), menciona que un sustrato debe tener por lo menos una porosidad total 70%, y que valores inferiores pueden generar problemas como asfixia de raíces por la deficiente disponibilidad de aire o por el exceso de agua dentro del sustrato. Por lo tanto, el tezontle al presentar estas propiedades físicas, las raíces de los cultivos tuvieron una disposición óptima de agua, oxigenación y nutrimentos necesarios para el crecimiento del área foliar.

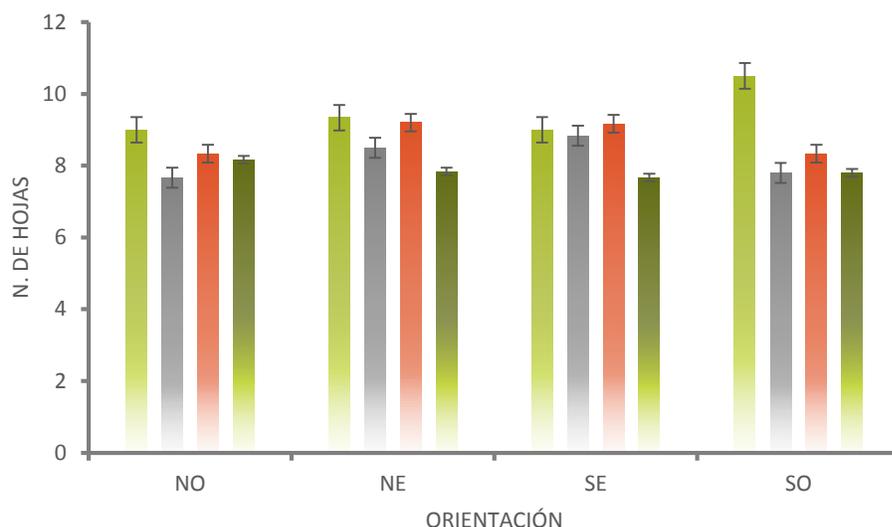


Figura 8. Número de hojas para las variedades de acelga en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Acelga rugosa – Sustrato Agrolita, ■ Acelga rugosa – Sustrato tezontle, ■ Acelga lisa – Sustrato agrolita, ■ Acelga lisa – Sustrato tezontle).

Para el Índice de Dickson, también se presentó una diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en el factor sustrato (Figura 9). Lo que significa una mejor calidad de plantas de acelga cuando esta se cultiva en tezontle.

El éxito de los cultivos hidropónicos requiere entre otros aspectos el estudio, acondicionamiento y evaluación de las propiedades físicas y químicas de aquellos materiales factibles de ser usados como sustrato, así como de la evaluación del comportamiento de las plantas en el mismo (Luque, 1981; Terés *et al.*, 1995). En ese sentido Maloupa *et al.*, (1992) indicaron que el tamaño y distribución de las partículas alteran las propiedades físicas del sustrato, las que a su vez modifican las relaciones agua-aire y por lo tanto el crecimiento y biomasa de la planta.

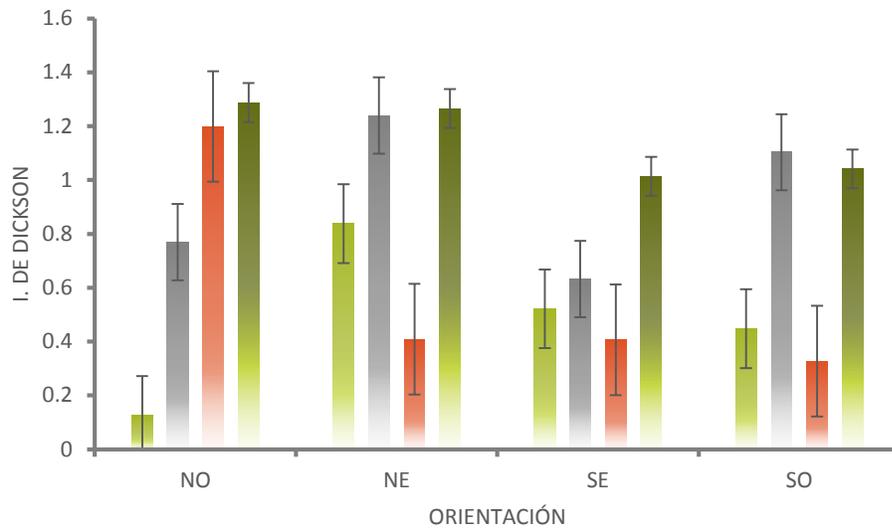


Figura 9. Índice de Dickson para las variedades de acelga en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Acelga rugosa – Sustrato Agrolita, ■ Acelga rugosa – Sustrato tezontle, ■ Acelga lisa – Sustrato agrolita, ■ Acelga lisa – Sustrato tezontle).

En la variable TCR, también se presentó diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en el factor sustrato (Figura 10).

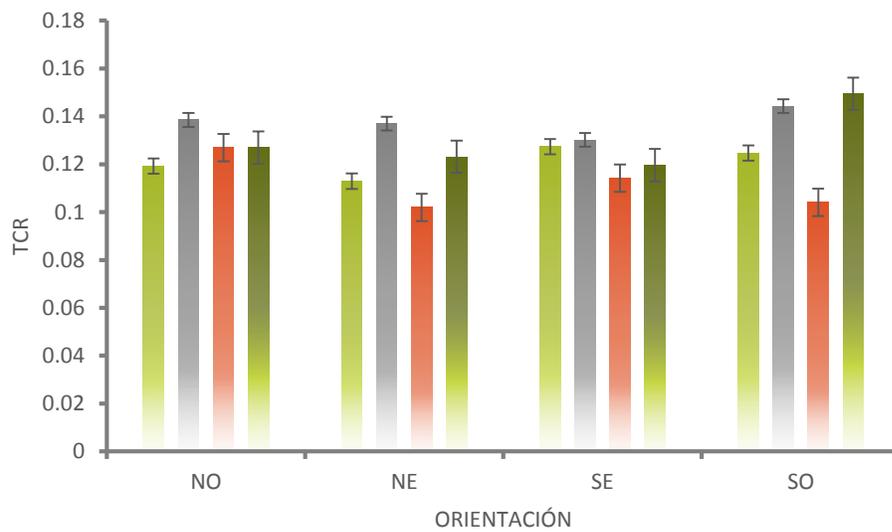


Figura 10. TCR para las variedades de acelga en dos sustratos y cuatro orientaciones de luz (■ Acelga rugosa – Sustrato Agrolita, ■ Acelga rugosa – Sustrato tezontle, ■ Acelga lisa – Sustrato agrolita, ■ Acelga lisa – Sustrato tezontle).

Diferentes trabajos han dado importancia a la granulometría del sustrato para la obtención de resultados óptimos en cultivos de importancia económica y alimenticia, Gallegos (2008) reporta datos importantes relacionados al sustrato tezontle en comparación a la piedra pómez, donde describe (Cuadro 7) los diferentes porcentajes de disponibilidad de agua para la planta, en donde el tezontle obtiene los mejores resultados en disponibilidad.

Cuadro 7. Caracterización física y química de tezontle y piedra pómez

Parámetro	Unidad	Sustratos	
		Tezontle	Piedra pómez
Densidad aparente	g cm ⁻³	1.19	0.71
Densidad real	g cm ⁻³	2.45	1.60
ADD	%	15.3	28.3
AR	%	10.3	3.7
AFD	%	14.8	2.0
CA	%	11.0	21.5
EPT	%	51.43	55.63
MS	%	48.57	44.38

ADD- Agua difícilmente disponible, AR – Agua de reserva, AFD- Agua fácilmente disponible, CA- Capacidad de aireación, EPT- Espacio poroso total, MS- Materia seca (Gallegos, 2008).

Así mismo como el espacio poroso y capacidad de aireación, lo cual indica que la raíz tendrá mayor facilidad de adquirir los nutrientes y por lo tanto de favorecer el crecimiento de las plantas, lo cual fue comprobado en este estudio.

6.4 Supervivencia

En la Figura 11 se muestra el número de plantas que sobrevivieron al trasplante. En la primera semana, el sustrato agrolita no presentó mortandad, en cambio en el tezontle se obtuvo una supervivencia del 93.75%.

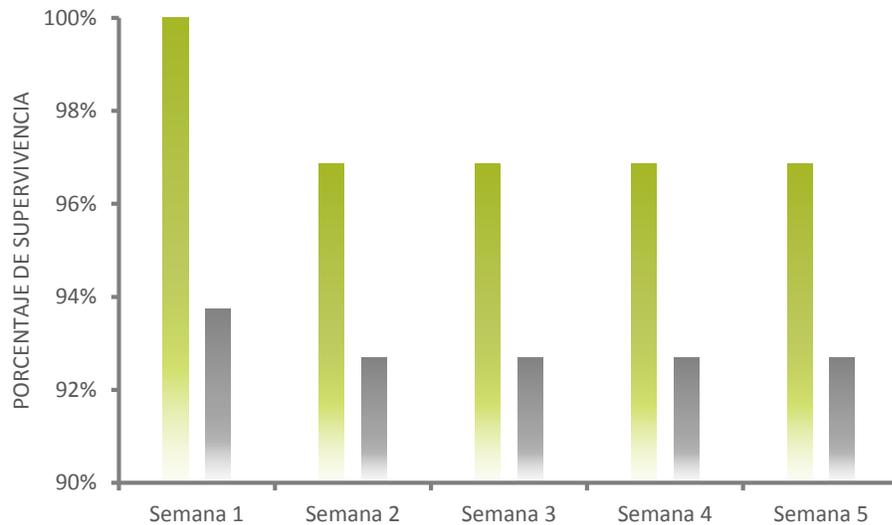


Figura 11. Supervivencia en los dos sustratos (■ agrolita y ■ tezontle) durante el transcurso del cultivo

La supervivencia en los cultivos hidropónicos supone un margen alto en comparación con los cultivos en suelo, ya que en estos últimos no se tiene los cuidados necesarios para el control de patógenos. En la hidroponía, al tener los cuidados y condiciones óptimas para el crecimiento del cultivo se obtendrá una tasa de supervivencia mayor al 90%. (Cassares, 1980)

En este trabajo se obtuvieron tasas de supervivencias del 97% para el sustrato agrolita y un 92.7% en el sustrato tezontle, se observan que las tasas de supervivencia son mayores al 90%, lo cual indica que ambos sustratos son aceptables para el cultivo de la acelga.

En la agrolita la tasa de supervivencia fue mayor por la fácil manipulación del sustrato al momento del trasplante, así como la alta capacidad de retención de humedad para mantener a la raíz en condiciones favorables. Mientras tanto el tezontle, al presentar una difícil manipulación en el trasplante, y la rápida evaporación de la solución nutritiva en las partes expuestas del sustrato, se requirió de práctica y experiencia para realizar un trasplante exitoso, así como la manipulación de la raíz al intentar reacomodar el sustrato, evitando lastimarla o aplastarla.



6.5 Costos para la producción de lechuga y acelga en un sistema hidropónico mangas verticales

6.5.1 Construcción del sistema Hidropónico Mangas verticales

Conforme a los insumos utilizados para la elaboración del sistema hidropónico mangas verticales y para el cultivo de lechuga y acelga se describen a continuación los costos de producción (Cuadro 8 y 9).

Cuadro 8. Costos de producción

Sistema hidropónico mangas verticales				
Concepto	Cantidad	Unidad	Precio unitario (m.n.)	Costo (m.n.)
Material				
Almácigos	1	Pieza	\$10	\$10
Bomba	1	Pieza	\$120	\$120
Cubetas	12	Litros	\$5	\$60
Cinta plateada	1	Pieza	\$15	\$15
Embudos	12	Piezas	\$5	\$60
Tambo para la S. N.	1	Pieza	\$80	\$80
Manguera	8	Metros	\$3.75	\$30
Uniones en T, L & Y	13	Piezas	\$5	\$65
Cinta de aislar	1	Pieza	\$13	\$13
Sombreadero	6	Metros	\$25	\$150
Plástico calibre 600 (1.2x1.5 m)	12	Metros	\$6.66	\$80
Medidor portátil de pH	1	Pieza	\$889.5	\$889.5
Medidor portátil de Conductividad eléctrica	1	Pieza	\$1189	\$1189
Mano de obra				
Construcción del sistema hidropónico	1	Jornales	\$67	\$83.75
Total				\$2845.25

Cuadro 9. Presupuesto de insumos para el cultivo de lechuga y acelga

Cultivo de lechuga y acelga				
Concepto	Cantidad	Unidades	Precio unitario (m.n.)	Costo (m.n.)
Insumos				
Agua	20 / Semanales	Litros	\$6	\$216
Semillas (lechuga y acelga)	120	Semillas	\$7.5	\$15
Solución nutritiva	1	Kilogramo	\$120	\$120
Mano de obra	108	Horas	\$67	\$904.5
Sustrato				
Agrolita	6	Costales	\$99	\$1188
Tezontle	4	Costales	\$30	\$240
Total relativo a agrolita				\$2443.5
Total relativo a tezontle				\$1495.5

6.5.2 Índice Costo/Beneficio

La evaluación del índice costo/beneficio (C/B) se realizó conjuntamente para los cultivos de lechuga y acelga, en una área de 9 m³. Las variables para determinar este índice son descritas en el Cuadro 8, por otro lado los beneficios son el número de cosechas y el precio en el mercado.

Cohen y Franco (2006) mencionan que cuando las ganancias son mayores que la inversión inicial tenemos un proyecto aconsejable, capaz de reeditarnos lo invertido más un excedente para continuar invirtiendo o bien tenerlo como parte de las ganancias.

El índice de costo/beneficio, para el sistema hidropónico Mangas Verticales, en la primera cosecha fue de 0.66, es decir <1 lo que implica que no es rentable, sin embargo,

para la siguientes cosechas, al requerir únicamente los insumos (agua, solución hidropónica, semillas) y de la mano de obra, el índice de C/B fue de 2.29, lo que indica que este sistema es rentable, esto implica que se obtienen ganancias a partir de la segunda cosecha (Cuadro 10).

Cuadro 10. Relación costo/beneficio del sistema hidropónico de Mangas Verticales

Sistema hidropónico M. V.	Costo \$ Agrolita / Tezontle	Beneficio \$	Relación C/B Agrolita / Tezontle
Primera cosecha	5288.75 / 4340.75	2880	0.54 / 0.66
Segunda cosecha	1255.5	2880	2.29
Tercera cosecha	1255.5	2880	2.29
Cuarta cosecha	1255.5	2880	2.29

El área de trabajo fue de 9 m³, lo que indica que el rendimiento de los cultivos, en este sistema hidropónico, se obtiene altos rendimientos a comparación a otros sistemas hidropónicos o de suelo. Por lo tanto su implementación en áreas urbanas y periurbanas es óptima, por su alto rendimiento por cultivo, así como por el máximo aprovechamiento de espacio.

VII. Conclusiones

En general el sistema de mangas verticales permite el cultivo hidropónico de lechuga y de acelga, presentando altos rendimientos (g/m^3), independientemente del sustrato utilizado; sin embargo el mejor sustrato en donde se obtuvieron resultados óptimos para la producción fue el tezontle, donde se favoreció la altura, cobertura, biomasa y en general la calidad de la planta para la lechuga, y altura, cobertura, número de hojas, TCR, y calidad de planta para la acelga, independientemente de la variedad.

La mejor orientación solar para favorecer el desarrollo de estas dos especies, es el noroeste.

La orientación solar no presentó diferencias estadísticas significativas para el contenido de clorofila en las plantas de las dos especies.

El sistema es rentable y recomendable para la producción de autoconsumo y pequeña comercialización, a partir del segundo ciclo de producción.

La hipótesis se cumplió totalmente, ya que por un lado el mejor sustrato para el cultivo de lechuga y acelga es el tezontle, y en relación a la mejor orientación solar, la noreste presentó plantas de mejor calidad.



Referencias

- Abad, M. 1993. Sustratos para el cultivo sin suelo: inventario y características. En Cánovas, F.; Díaz, J.R. (eds). Curso Superior de Especialización sobre Cultivos sin Suelo. I.E.A. / F.I.A.P.A., Almería: 63-80.
- Abad B, M.; Noguera, M. P. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. pp. 137-183. En: M. Urrestarazu G. (ed). Manual de cultivo sin suelo. Mundi- Prensa. Almería, España.
- Abad, B. M.; Noguera, M. P.; Carrión B. C. 2004. Los Sustratos en los cultivos sin suelo. En: M. G. URRESTARAZU (Ed). Tratado de cultivo sin suelo. 2nd ed. Mundi-Prensa. Almería, España. pp. 113-158.
- Abad, B. M.; Noguera, M. P. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. Capítulo 8. En CADAHIA C. (Ed).Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Abad, B. M.; Noguera, M. P.; Carrión B. C. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación. p. 299-352. In: Fertirrigación cultivos hortícola y ornamentales. C. Cadahía (Coord.). 3ra ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Alpízar, A. L. 2006. Hidroponía Cultivo sin suelo. Editorial Tecnológica de Costa rica. Cartago, Costa Rica. 77-79
- Ansorena, M. J. 1994. Sustratos propiedades y caracterización. Ediciones Mundi-Prensa. 172 p.
- Barbado, J. 2005. Hidroponía. Albatros SACI. Argentina. pp. 11-12, 37-38.
- Bastida, A. 1999. El medio de cultivo de las plantas. Sustratos para hidroponía y producción de plantas ornamentales. Serie de Publicaciones AGRIBOT Núm. 4 Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Preparatoria Agrícola. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 72 p.

- Blok, C.; De Kreij C.; Baas, R.; Wever, G. 2008. Chapter 7. Analytical Methods Used in Soilless Cultivation. In *Soilless Culture: Theory and Practice*. RAVIV, M.; LIETH J. H. (Eds.). Editorial Elsevier. United Stated of America. pp. 245-290.
- Birchler, T.; Rose, R. W.; Royo, A.; Pardos, M. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Invest. Agr: Sist. Recur. For.* Vol. 7 (1 y 2).
- Bunt, A. C. 1988. *Media and Mixes for Container-Grown Plant*. 2nd ed. Unwin Hyman Ltd., London, Great Britain. 309 p.
- Burés, S. 1998. Introducción a los sustratos. Aspectos generales. p. 19-31. In: *Tecnología de sustratos. Aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal*. J. Narciso Pastor S. (Ed.) Universitat de Lleida.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ed. Agrotecnias. Madrid, España. 341 p.
- Cabrera, R. I. 1995. Fundamentals of container media management, Part. 1. Physical properties. Rutgers Cooperative Extension Factsheet No. 950. 4 p.
- Cabrera, R. I. 1997. Fundamentals of container media management. Part 2. Measuring physical properties. Rutgers Cooperative Extension Factsheet No. 881. 2 p.
- Cabrera, R. I. 1999. Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 5(1):5-12.
- Casseres, E. 1980. Producción de hortalizas. Instituto interamericano de Ciencias Agrícolas. 3ª ed Costa Rica. pp. 184-186
- Cohen, E.; Franco, R. 2006. Evaluación de proyectos sociales. Siglo veintiuno. México, D.F. 171-180 pp.
- Coombs, J.; Hall, D. O.; Long, S. D.; Scurlock, J. M. 1988. *Técnicas en fotosíntesis y bioproductividad*. Futura. Chapingo, México.



- Cruz, C. E.; Sandoval, V. M.; Volke, H. V. H.; Can, Ch. A.; Sánchez, E. J. 2012. Efecto de mezclas de sustratos y concentración de la solución nutritiva en el crecimiento y rendimiento de tomate. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3:1361-1373.
- De Boodt, M.; Verdonck, O.; Cappaert, I. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37: 2054-2062
- Dickson, A.; Leaf, A. L.; Hosner, I. E. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedlings stock in nurseries. *Forest Chronicle* 36: 10-13.
- Douglas, J. S. 1985. *Advanced guide to hydroponics*. Drake Pub. Inc. New York.
- Durany, V., 1982. *Hidroponía, cultivo de plantas sin tierra*. Sintesis. Barcelona.
- Escalante-Estrada, J. A.; Kohashi-Shibata, J. 1982. Efecto del sombreado artificial sobre algunos parámetros del crecimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) *Agrociencia*. 48: 29-38.
- Escalante-Estrada, J. A.; Kohashi-Shibata, J. 1993. *El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México.
- Escalante-Estrada, J. A. 1999. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra*. 17: 149-157.
- Escalante, E. J. 2008. *Seis-Sigma: Metodología y técnicas*. Limusa. México, D.F.
- Gallegos, C. D. 2008. *Volumen óptimo de piedra pómez y tezontle como sustratos para la producción de jitomate en hidroponía*. UMSNH. DGB. Uruapan, Mich.
- García, E. 1999. *Modificaciones al sistema de clasificación de Köpen para las condiciones de la República Mexicana*. UNAM. México, D. F.
- Giaconi, V.; Escaff, M. 2004. *Cultivo de hortalizas*. Editorial Universitaria S.A. Decimoquinta Edición, Chile. pp. 84, 89

- Gras, R. 1987. Propriétés physiques des substrats. In: >Blanc, D. (Ed.) Les Cultures hors Sol. 2e éd. Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Paris>: 79-126.
- Handreck, K. A. 1983. Particle size and the physical properties of growing media for containers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 14:209-222.
- Hunt R.; Causton, D. R.; Shipley, B., Askew, A. P. 2002. A modern tool for classical growth analysis. *Annals of Botany*90: 485-488.
- Juárez, S. H., 2010. Propagación por la técnica de hidroponía vertical (lechuga, acelga y espinaca). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. México, D.F.
- Lemaire, F.; Dartigues, A.; Rivière, L. M.; Charpentier, S. 1989. Cultures en Pots et Conteneurs. INRA - PHM Revue Horticole, Paris-Limoges
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae* 396: 273-284.
- Luque, A. 1981. Physical and physical chemical properties of the volcanic materials used in hydroponics. *Acta Hortic*. 126: 51-57.
- Maloupa, E.; Mitsios, I.; Martínez, P. F.; Bladenopoulou, S. 1992. Study of substrates use in gerbera soilless culture grown in plastic greenhouse. *Acta Hortic*. 323: 139-144.
- Manrique, E. R. (2003). Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de la luz para la fotosíntesis. *Ecosistemas* 12. Asociación Española de Ecología Terrestre. España. *Ecosistemas*, vol. XII, núm. 1, enero-abril, 2003, pp. 1-11
- Maroto J. V. 2002. *Elementos de Horticultura General*. Mundi-Prensa. 3ª ed. Madrid.
- Mondragón, J. C. 2003. El nopal (*Opuntia spp.*) como forraje. FAO. México. pp. 138
- Noguera, P.; Abad, M.; Puchades, R.; Maquieira, A. and Noguera, V. (2003). Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 34: 593-605



- Nuez, F. 2001. El cultivo del tomate. Mundi-prensa, España, p.p. 137-145
- Ojodeagua, J. L., Castellanos R. Z. J., Muñoz, R. J. J., Alcántar G. G., Tijerina C. L., Vargas, T., P., Enríquez, R. S. Eficiencia de suelo y tezontle en sistemas de producción de tomate en invernadero Revista Fitotecnia Mexicana, vol. 31, núm. 4, octubre-diciembre, 2008, pp. 367-374, Sociedad Mexicana de Fitogenética, A.C. México
- Pastor, S. J. N. 1999. Utilización de sustratos en viveros. Terra 17(3):231-235.
- Peñuelas, R. J. L. y Ocaño, B. L. 2000. Cultivo de plantas forestales en contenedor. 2ª edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 190 p.
- Poole, R.T.; Conover, C.A.; Joiner, J.N. 1981. Soils and potting mixtures. In: <Joiner, J.N. (Eds.). Foliage Plant Production. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.>: 179-202.
- Prasad, M.; NíChualáin, D. 2004. Relationship between particle size and air space of growing media. Acta Horticulturae. 648: 161-166.
- Puustjärvi, V. 1983. Nature of changes in peat properties during decomposition. Pear and Plant Yearbook 1981-2, 5-20.
- Radford, P. 1967. Growth analysis formulae, their use and abuse. Crop Science. 7(3): 171-175.
- Raviv, M.; Wallach, R.; Silber, A.; Bar-Tal, A. 2002. Substrates and their analysis. Pp. 25-101. In: D. Savvas and H. Passam (eds). Hydroponic production of vegetable and ornamental. Embryo publications. Athens, Greece.
- Raviv, M.; Chen, Y; Inbar, Y. 1986. Peat and peat substitutes as growth media for container-grown plants. In: >Chen, Y.; Avnimelech, Y. (Eds.). The Role of Organic Matter in Moderns Agriculture. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht<: 257-287.
- Resh, H. M. 1982. Cultivos hidropónicos, nuevas técnicas de producción, Mundi-prensa. Madrid. España.

- Resh, H. M. 1987. Cultivos hidropónicos, nuevas técnicas de producción. Mundi-prensa. 2ª ed. Madrid. España.
- Russel, J. E.; Russel, W. E. (1968). Las condiciones del suelo y el crecimiento de las plantas. 4ª edición. Aguilar S.A. Madrid, España. 35-49 pp
- Sholto, D .J. 1994. Hidroponía, como cultivar sin tierra.El Ateneo.6ª Ed.
- Stainer, A. A., (1977). The evelopment of soiless culture an introduction to the congress, TWOSC Proc.
- Sánchez del Castillo, F. 1988. Principios y métodos de cultivo (tercera edición) Universidad Autónoma de Chapingo, México. 3ª ed. México.
- Taiz, L. 2006. Fisiología Vegetal. Universitat Jaume I. 3ª ed.
- Tamhane, R. V. 1979. Suelos: su química y fertilidad en zonas tropicales. Ed. Diana. México. 297-301 pp.
- Terés, V.; Arrieta, A. 1995. A method for evaluation of air volumes in substrates. Acta Hortic. 401: 41-48.
- Terrés, V. L.; Artetxe, A.; Beunza, A.; Sáins de la Maza, E.; Lenzaun, M. 2001. Physical properties of the substrates. Proc. 5th IS Protect. Cult. Mild Winter Clim (eds) Fernández, Martínez & Castilla. Acta Hort. 559: 663-668.
- Tognoni, Alpi, A. 1999. Cultivo en invernadero. Mundi-Prensa. Madrid, España. 347 pp.
- Urbina-Sánchez, E.; Baca-Castillo, G. A.; Núñez-Escobar, R.; Colinas-León, M. T.; Tijerina-Chávez, L.; Tirado-Torres, J. L. 2011. Zeolita como sustrato en el cultivo hidropónico de gerbera. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. México. Terra Latinoamericana, vol. 29, núm. 4, octubre-diciembre, 2011, pp. 387-394
- Vavilov, N. I. 1992. Estudios sobre el origen de las plantas cultivadas. ACME, Buenos Aires, Argentina.
- Vargas, G. 2011. Botánica general: desde los musgos hasta los árboles. EUNED, Costa Rica.

- Vargas, T. P.; Castellanos, R. J. Z.; Muñoz-Ramos, J. J.; Sánchez, G. P.; Tijerina, Ch. L.; López, R. R. M.; Martínez, S. C. y Ojodeagua, A. J. L. (2008). Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agric. Téc. Méx.* 34(3):323-331.
- Valle, F. H. (1992). *Prácticas de relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmosfera.* Universidad Autónoma Chapingo, México.
- Wallach, R., F.F. da Silva and Y. Chen. 1992. Hydraulic characteristics of tuff (scoria) used as a container medium. *Journal of America Society Horticultural Science* 117: 415-421.
- White, J.W. 1974. Criteria for selection of growing media for greenhouse crops. *Florist's Review*, 155 (4009): 28-30, 73-75.



Anexos

Variedad de Lechuga	Sustrato	Orientación	Altura	Cobertura	N. de hojas	Clorofila	Biomasa	I. de Dickson	TCR
LO	Agrolita	NO	14.6	125.6814	9	198	14.5	0.4371	0.0626
LO	Agrolita	NO	19.7	123.7022	12	322.5	29.5	0.2954	0.0816
LO	Agrolita	NO	25.6	264.4612	11	249	49.1	0.7116	0.0898
LO	Agrolita	NO	21.8	120.7628	9	180.5	21	0.0955	0.1012
LO	Agrolita	NO	18.7	183.8539	12	287	47	0.5240	0.0727
LO	Agrolita	NO	21	263.0220	10	319.5	10.4	0.0823	0.0707
LO	Agrolita	NE	19.7	185.0575	11	263.5	15.6	0.1755	0.0937
LO	Agrolita	NE	24.3	231.0033	12	262.5	61.2	0.3062	0.0872
LO	Agrolita	NE	18	168.5641	9	259	29.5	0.1986	0.0833
LO	Agrolita	NE	21.6	149.5712	11	213.5	39.8	0.1001	0.1237
LO	Agrolita	NE	23.7	182.6542	11	200	22.5	0.1791	0.0758
LO	Agrolita	NE	31	300.1811	10	210	48.6	0.2971	0.0824
LO	Agrolita	SE	25.7	180.2665	9	175	44.2	0.2996	0.0777
LO	Agrolita	SE	25.4	142.0805	13	235.5	50.3	0.5077	0.1014
LO	Agrolita	SE	17.6	215.1225	15	167	15.6	0.0925	0.0906
LO	Agrolita	SE	17.7	83.3229	6	159.5	10.9	0.0755	0.0940
LO	Agrolita	SE	18.3	141.0261	10	283	23.7	0.2866	0.0636
LO	Agrolita	SE	21.9	134.7822	9	277	5.88	0.0130	0.0772
LO	Agrolita	SO	22.7	169.7167	10	252	21.4	0.1791	0.0794
LO	Agrolita	SO	23.3	157.2544	10	186.5	27.4	0.1931	0.1223
LO	Agrolita	SO	23	139.9756	12	165	17.9	0.0912	0.0962
LO	Agrolita	SO	27	220.3533	13	192	22.7	0.0944	0.1264
LO	Agrolita	SO	15.5	151.7468	16	340	27.3	0.2005	0.0574
LO	Agrolita	SO	25	459.9606	17	453	34.7	0.1977	0.0927
LI	Agrolita	NO	17.3	224.3176	7	235.5	17.4	0.0984	0.0692
LI	Agrolita	NO	14.3	207.3942	9	138.5	22.3	0.0992	0.0814
LI	Agrolita	NO	20.3	274.6459	13	159	22.9	0.0975	0.1103
LI	Agrolita	NO	16.9	134.7822	6	291	20.41	0.0882	0.1058
LI	Agrolita	NO	22.5	629.0175	12	259	30	0.0986	0.0866
LI	Agrolita	NE	21.8	330.0636	11	318	102.7	0.4118	0.1051
LI	Agrolita	NE	19.1	333.2916	9	1110.5	40.8	0.3045	0.1130
LI	Agrolita	NE	18.3	211.2407	9	206	21.7	0.0984	0.0822
LI	Agrolita	NE	17.6	188.6919	7	192.5	14.4	0.0930	0.1166
LI	Agrolita	NE	18.4	240.5282	10	180.5	14.4	0.0781	0.0745
LI	Agrolita	NE	17.3	288.0232	8	192.5	23.9	0.0983	0.0282
LI	Agrolita	SE	10.1	62.2114	4	175	50.8	0.4925	0.0611
LI	Agrolita	SE	15	142.0805	6	165.5	16.3	0.0956	0.0525
LI	Agrolita	SE	28.1	383.5963	9	321	56	0.3027	0.0924
LI	Agrolita	SE	16	81.7128	5	197.5	6.45	0.0289	0.0881

LI	Agrolita	SE	13.6	60.8212	8	194.5	10.6	0.0819	0.0668
LI	Agrolita	SE	24.4	791.7304	9	287	81.2	0.2039	0.0581
LI	Agrolita	SO	26.2	459.9606	10	209.5	38.2	0.1955	0.0837
LI	Agrolita	SO	19.6	581.0690	10	225.5	32.6	0.0999	0.0834
LI	Agrolita	SO	22.5	441.1503	6	227.5	32.9	0.2996	0.1027
LI	Agrolita	SO	17.7	264.4612	4	180.5	16.05	0.0482	0.1081
LI	Agrolita	SO	20.4	352.9894	9	235.5	23.2	0.0990	0.0711
LO	Tezontle	NO	22.5	884.0461	14	354	49.5	1.4739	0.1027
LO	Tezontle	NO	25.7	258.7278	11	314	57.1	0.8295	0.1264
LO	Tezontle	NO	28.3	361.3637	12	192	37.2	0.3931	0.0861
LO	Tezontle	NO	24.3	356.3273	12	281.5	36.7	0.5969	0.0853
LO	Tezontle	NO	22.5	254.4690	11	307.5	26.7	0.2833	0.0767
LO	Tezontle	NE	25.2	399.3769	16	291	74	3.7185	0.0914
LO	Tezontle	NE	26.6	371.5424	12	265.5	35.1	0.3879	0.0922
LO	Tezontle	NE	28.7	420.9125	14	257.5	28.2	1.2003	0.1017
LO	Tezontle	NE	24.9	363.0503	14	244.5	45.7	0.4022	0.1312
LO	Tezontle	NE	25.1	220.3533	10	203	45.7	0.9129	0.0757
LO	Tezontle	NE	29.8	655.9724	11	272.5	153.4	1.0637	0.0769
LO	Tezontle	SE	20.5	356.3273	10	200	50	1.3935	0.0817
LO	Tezontle	SE	26.9	307.9075	11	266.5	34.8	0.0983	0.0825
LO	Tezontle	SE	26.4	706.8583	16	247.5	133.4	2.2682	0.0685
LO	Tezontle	SE	24.3	315.7320	11	263	45.5	0.7075	0.0872
LO	Tezontle	SE	22.2	461.8632	10	219	41.5	0.9106	0.0876
LO	Tezontle	SE	25.9	246.0574	13	213	58.6	0.5118	0.0948
LO	Tezontle	SO	25.4	338.1630	12	266	40.8	0.2993	0.0784
LO	Tezontle	SO	19.5	216.4243	7	181	24.1	0.0983	0.1099
LO	Tezontle	SO	26.2	441.1503	12	212	48.1	0.6066	0.0738
LO	Tezontle	SO	23.6	283.5287	10	170	43.7	0.5049	0.0746
LO	Tezontle	SO	17.7	169.7167	11	307.5	22.5	0.4338	0.0701
LO	Tezontle	SO	18.7	202.3205	13	210.5	51.6	1.7869	0.0959
LI	Tezontle	NO	22.4	646.9246	12	309.5	83.9	2.2327	0.1088
LI	Tezontle	NO	27.8	522.7924	7	235	17.7	0.2883	0.1126
LI	Tezontle	NO	24.7	443.0137	10	214	33.7	0.0996	0.1215
LI	Tezontle	NO	18.4	532.9732	9	236	51.7	0.3074	0.0877
LI	Tezontle	NO	21.9	395.8426	7	196	29.9	0.1978	0.1216
LI	Tezontle	NE	22.8	876.1588	14	225.5	72	0.5102	0.1104
LI	Tezontle	NE	27.4	975.9063	12	239.5	145.5	0.3054	0.0987
LI	Tezontle	NE	25.6	733.0141	12	264	61.8	0.9325	0.0799
LI	Tezontle	NE	22.4	420.9125	8	306	94.5	0.3079	0.0928
LI	Tezontle	NE	22	844.9628	9	274.5	62.3	0.3101	0.0786
LI	Tezontle	NE	19.8	330.0636	8	162	13.8	0.6123	0.0602
LI	Tezontle	SE	19.3	258.7278	6	155	15	0.0915	0.0906
LI	Tezontle	SE	26.7	469.5130	9	157.5	46.8	1.0087	0.0984
LI	Tezontle	SE	28.7	583.2072	9	183	42.2	0.1967	0.0593

LI	Tezontle	SE	24.5	655.9724	11	261	104.6	0.4111	0.1166
LI	Tezontle	SE	20.8	524.8207	9	192.5	16.5	0.2612	0.0777
LI	Tezontle	SO	11.6	186.2650	6	175.5	8.8	0.0895	0.1092
LI	Tezontle	SO	17.8	263.0220	6	292	10.15	0.0417	0.0751
LI	Tezontle	SO	23.8	363.0503	9	291.5	70.4	0.4139	0.0969
LI	Tezontle	SO	19.5	452.3893	9	231	88.3	0.6371	0.0732

Variedad de Lechuga									
Variedad de Lechuga	Sustrato	Orientación	Altura	Cobertura	N. de hojas	Clorofila	Biomasa	I. de Dickson	TCR
AR	Agrolita	NO	15.9	157.2544	8	356.5	16.9	0.0974	0.1177
AR	Agrolita	NO	12.3	215.1225	11	358.5	11.1	0.1725	0.0595
AR	Agrolita	NO	21.7	253.0573	9	224.5	18.61	0.0843	0.1491
AR	Agrolita	NO	18.2	129.6869	7	221	18.3	0.0916	0.1316
AR	Agrolita	NO	17.9	314.1593	10	245.5	36.4	0.1006	0.1143
AR	Agrolita	NO	29.7	485.0010	9	305	78	0.2038	0.1434
AR	Agrolita	NE	18.6	376.6848	11	249	49.6	0.7399	0.1177
AR	Agrolita	NE	25.8	506.7075	11	198	154.3	1.8455	0.1017
AR	Agrolita	NE	18.3	358.0022	10	238	38.5	0.3053	0.0954
AR	Agrolita	NE	13.4	118.8229	5	189	7.05	0.0413	0.0948
AR	Agrolita	NE	36.9	629.0175	10	229	254.1	2.0388	0.1396
AR	Agrolita	NE	21.9	378.4068	9	179	171.75	0.0560	0.1283
AR	Agrolita	SE	26.8	611.3618	11	142	155	0.7371	0.1300
AR	Agrolita	SE	17.3	156.1450	9	230.5	23	0.0990	0.0692
AR	Agrolita	SE	26.8	564.1044	7	176.5	103.3	0.2052	0.1061
AR	Agrolita	SE	21.8	217.7300	3	144.5	36.65	0.0995	0.1881
AR	Agrolita	SE	29.3	506.7075	10	183.5	191.2	1.0536	0.1308
AR	Agrolita	SE	39.6	1794.5091	14	243.5	245.6	0.9361	0.1400
AR	Agrolita	SO	20.4	435.5838	13	144.5	67.2	0.3114	0.0846
AR	Agrolita	SO	32.8	485.0010	11	291	63.4	0.3018	0.1293
AR	Agrolita	SO	25.5	201.0619	7	229.5	33.1	0.0980	0.1317
AR	Agrolita	SO	25.2	189.9112	8	207	69.4	0.4128	0.1766
AR	Agrolita	SO	20	297.1181	13	223.5	54.1	0.6297	0.0743
AR	Agrolita	SO	38.4	1052.0880	11	287.5	238.1	0.9353	0.1517
AL	Agrolita	NO	24.9	496.7820	7	228.5	75.7	0.8400	0.1031
AL	Agrolita	NO	35.4	709.2165	8	136	145.1	1.0414	0.1446
AL	Agrolita	NO	33.1	520.7681	10	155.5	136.1	0.9370	0.1349
AL	Agrolita	NO	34.4	271.7163	7	189	6.1	0.7387	0.1592
AL	Agrolita	NO	24.2	376.6848	9	287	25.1	0.5035	0.0899
AL	Agrolita	NO	44.5	1779.5237	9	287	460.1	3.1318	0.1297
AL	Agrolita	NE	19.2	166.2708	10	259.5	37.3	0.2015	0.0982
AL	Agrolita	NE	11.7	206.1199	9	213	15.9	0.1967	0.0410
AL	Agrolita	NE	16.3	134.7822	7	239	36.9	0.2036	0.1099
AL	Agrolita	NE	23.4	568.3220	10	225	43.3	0.3011	0.0900
AL	Agrolita	NE	49.9	2989.9244	10	221.5	331.6	1.1410	0.1706



AL	Agrolita	SE	29.5	303.2599	9	194	62.5	0.4061	0.1369
AL	Agrolita	SE	20.4	106.5962	7	291.5	38.7	0.2013	0.0869
AL	Agrolita	SE	21	286.5211	11	202.5	90.9	0.6364	0.1148
AL	Agrolita	SE	19.1	123.7022	8	196	18.15	0.0480	0.1295
AL	Agrolita	SE	16.7	180.2665	11	254	15.5	0.0938	0.0768
AL	Agrolita	SE	38.1	1086.8654	9	224	148.7	1.0523	0.1400
AL	Agrolita	SO	22	435.5838	8	159	29.3	0.1936	0.0935
AL	Agrolita	SO	22.8	318.8893	7	268.5	29.1	0.1964	0.0954
AL	Agrolita	SO	27.6	394.0814	7	207.5	60	0.2022	0.1204
AL	Agrolita	SO	14.9	128.6796	7	276	8.46	0.0376	0.0866
AL	Agrolita	SO	20.5	392.3241	10	304	35.1	0.5041	0.0851
AL	Agrolita	SO	42.2	918.6331	11	344	191.7	0.8301	0.1434
AR	Tezontle	NO	31	924.0131	10	264.5	108.4	0.9383	0.1441
AR	Tezontle	NO	19.8	199.8073	8	162	50.1	1.2846	0.1505
AR	Tezontle	NO	38.5	486.9547	9	125	65.5	0.8044	0.1243
AR	Tezontle	NO	23.8	192.3617	4	160.5	24.7	0.2740	0.1355
AR	Tezontle	NO	24.3	358.0022	8	241.5	56	0.6195	0.1504
AR	Tezontle	NO	24.8	207.3942	7	224	38.8	0.6970	0.1262
AR	Tezontle	NE	19.8	280.5521	7	208.5	30.7	0.7041	0.1129
AR	Tezontle	NE	25.4	260.1553	9	191.5	90.3	0.9456	0.1158
AR	Tezontle	NE	45.2	568.3220	9	166	10.5	2.5044	0.1698
AR	Tezontle	NE	31.2	286.5211	7	196	122.8	0.5180	0.1492
AR	Tezontle	NE	34.4	799.2290	9	223.5	118.2	1.2807	0.1311
AR	Tezontle	NE	31.2	827.0262	10	211	105.1	1.4863	0.1432
AR	Tezontle	SE	14.7	492.8393	8	211.5	63.1	0.9705	0.0496
AR	Tezontle	SE	29.5	824.4796	8	218.5	97.8	1.2702	0.1736
AR	Tezontle	SE	26.9	318.8893	8	145.5	24.7	0.1882	0.1363
AR	Tezontle	SE	30.8	532.9732	7	199	132.6	1.0663	0.1752
AR	Tezontle	SE	29.6	314.1593	13	181	39.7	0.2902	0.1386
AR	Tezontle	SE	12.1	104.7741	9	239.5	2.29	0.0086	0.1077
AR	Tezontle	SO	25.8	441.1503	7	156.5	45.6	1.0152	0.1267
AR	Tezontle	SO	21.7	471.4352	7	254	23.8	0.2801	0.1537
AR	Tezontle	SO	27.7	258.7278	7	275	18	0.1700	0.1420
AR	Tezontle	SO	33.6	551.5459	9	239.5	161.1	2.4207	0.1588
AR	Tezontle	SO	25.6	718.6884	9	262.5	74.1	1.6316	0.1401
AL	Tezontle	NO	33.2	897.2703	8	173	117.7	4.2820	0.1328
AL	Tezontle	NO	32.4	395.8426	9	330	43.6	0.5907	0.1509
AL	Tezontle	NO	32.3	742.6431	12	189	67.2	0.8170	0.1001
AL	Tezontle	NO	31	439.2909	7	198	53.4	0.7026	0.1568
AL	Tezontle	NO	29.2	762.0895	6	226	186.2	1.1586	0.1052
AL	Tezontle	NO	20.9	110.2876	7	237.5	11.7	0.1742	0.1160
AL	Tezontle	NE	31.6	410.0741	8	256.5	55	0.9114	0.1081
AL	Tezontle	NE	27.7	473.3614	8	193	90	0.9428	0.1404
AL	Tezontle	NE	46.1	1372.2791	10	200	196.2	2.7690	0.0947

AL	Tezontle	NE	26.1	162.8602	6	231	41.1	0.2987	0.1453
AL	Tezontle	NE	34.1	886.6831	8	208.5	93.7	2.2735	0.1119
AL	Tezontle	NE	33.9	371.5424	7	247.5	54	0.3987	0.1383
AL	Tezontle	SE	17	231.0033	5	217	12.3	0.3572	0.1135
AL	Tezontle	SE	25.1	545.3196	8	196	36.39	0.0100	0.1201
AL	Tezontle	SE	27.1	937.5318	9	168.5	67.4	1.0470	0.0910
AL	Tezontle	SE	29.7	622.3672	8	283.5	84.8	1.0494	0.1497
AL	Tezontle	SE	26	392.3241	7	230.5	85.4	2.2334	0.1365
AL	Tezontle	SE	29.4	504.7145	9	276	108	1.3870	0.1068
AL	Tezontle	SO	26.7	441.1503	7	283	40.7	0.2975	0.1528
AL	Tezontle	SO	31.3	479.1636	7	200.5	31.7	0.4708	0.1112
AL	Tezontle	SO	26.7	481.1055	8	262.5	125.4	1.2748	0.1843
AL	Tezontle	SO	26.7	688.1345	6	264.5	66.1	1.2650	0.1547
AL	Tezontle	SO	19	401.1500	11	122	62.1	1.8968	0.1445